

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 532.5.013.12; 532.517.3; 544.773

**О ламинарно-турбулентном переходе
в течениях наножидкостей***

В.Я. Рудяк¹, А.В. Минаков^{1,2,3}, Д.В. Гузей^{1,2}, В.А. Жигарев²,
М.И. Пряжников^{1,2}

¹Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет

²Сибирский федеральный университет, Новосибирск

³Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: valery.rudyak@mail.ru

В работе представлены экспериментальные данные по изучению ламинарно-турбулентного перехода при течении наножидкостей в трубе. Показано, что переход в течениях таких жидкостей наблюдается при меньших числах Рейнольдса, чем в базовой жидкости. Степень дестабилизации течения растет с увеличением концентрации наночастиц и уменьшением их размера. С другой стороны, в турбулентном режиме течения наличие частиц в потоке приводит к подавлению мелкомасштабных турбулентных пульсаций. Приводятся корреляции измеренных коэффициентов вязкости рассмотренных наножидкостей.

Ключевые слова: наножидкость, ламинарно-турбулентный переход, наночастицы, течение в трубе, гидродинамическое сопротивление, вязкость.

Бурное исследование наножидкостей (дисперсных жидкостей с наночастицами), имеющее место в последние два десятилетия, связано, с одной стороны, с их существующими и возможными приложениями, а с другой, с нестандартными свойствами. Сегодня уже известно, что вязкость и теплопроводность наножидкостей не описываются классическими теориями и соотношениями. Можно ожидать, что необычные теплофизические свойства наножидкостей будут определять и нестандартные свойства их течений. Это тем более важно, что, например, теплообменные свойства наножидкостей качественно различны в ламинарном и турбулентном режимах течения [1]. С этой точки зрения важно обладать информацией о ламинарно-турбулентном переходе в течениях наножидкостей. Специального экспериментального изучения ламинарно-турбулентного перехода до сих пор не проводилось. Известно две–три работы, в которых экспериментальные данные по переходу были получены при изучении вынужденной тепловой конвекции наножидкостей, и они весьма противоречивы. Так, в работе [2] отмечалось, что ламинарно-турбулентный переход в течении наножидкости смещается в сторону больших чисел Рейнольдса, то есть это течение более устойчиво, чем течение базовой жидкости. С другой стороны, в работе [3] утверждалось прямо противоположное.

* Работа выполнена при частичном финансировании РНФ (проект №14-19-00312).

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы экспериментально выявить основные качественные характеристики ламинарно-турбулентного перехода в течениях наножидкостей в круглом миниканале.

Измерительный участок представляет собой латунную трубку внутренним диаметром 5 мм и длиной 1,045 м. Измерения перепада давления вдоль канала проводились при помощи дифференциального манометра ОВЕН ПД200. Расход жидкости контролировался расходомером. Перед входом в измерительный участок поток стабилизировался на длине 2,5 м. В ходе экспериментов расход жидкости варьировался от 0,1 до 2,4 л/мин, что соответствует диапазону чисел Рейнольдса от 800 до 12000. Помимо интегрального перепада давления с помощью пьезоэлектрических датчиков давления 014MT, установленных на выходе измерительного участка в тройниках для отвода давления, измерялись пульсации давления. Электрический сигнал пьезодатчиков подавался на двухкаскадный усилитель заряда LP-03 и обрабатывался с использованием АЦП Е14-140.

Течения наножидкостей изучались на основе дистиллированной воды с наночастицами оксида кремния средним размером частиц 25 и 100 нм (наночастицы компании “Плазмотерм”, Москва). Объемная концентрация частиц варьировалась от 0,5 до 2 %. Вязкость исследованных наножидкостей существенно больше вязкости обычных дисперсных жидкостей. В рассматриваемых экспериментах она измерялась с помощью ротационного вискозиметра BrookfieldDV2T. Все измерения проведены при температуре 25 °С. Данные измерения коэффициента вязкости μ наножидкости с частицами средним размером 25 и 100 нм хорошо (с точностью порядка 1–2 %, т. е. с точностью проводимых измерений) описываются соответственно формулами

$$\mu = \mu_0(1 + 4,4\varphi + 552\varphi^2), \quad \mu = \mu_0(1 + 3,9\varphi + 80\varphi^2), \quad (1)$$

где φ — объемная концентрация наночастиц, а μ_0 — коэффициент вязкости базовой жидкости.

К одному из главных маркеров, регистрирующих различные режимы течения (ламинарный и турбулентный) и ламинарно-турбулентный переход, относятся данные о зависимости коэффициента гидродинамического сопротивления $\lambda = (2d\Delta P)/(\rho U^2 L)$ от числа Рейнольдса $Re = \rho U D / \mu$. Здесь D — диаметр канала, U — средняя скорость жидкости, по ее расходу, ρ — плотность жидкости, ΔP — измеренный перепад давления, L — длина измерительного участка. Эта зависимость при различных концентрациях наночастиц представлена на рис. 1а. Для сравнения на графиках приведены коэффициенты сопротивления для течений Пуазейля и Блазиуса в круглом канале. Полученные

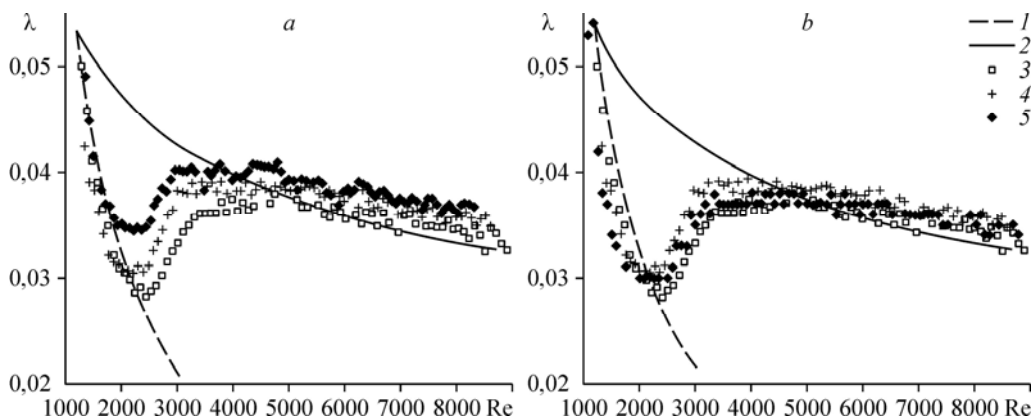


Рис. 1. Зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса для различных концентраций наночастиц (а) и от их диаметра (б).

1 — зависимость Пуазейля, 2 — зависимость Блазиуса, 3 — вода, 4 — вода + SiO₂ 1 %, 25 нм, 5 — вода + SiO₂ 2 %, 25 нм (а) и вода + SiO₂ 1 %, 100 нм (б).

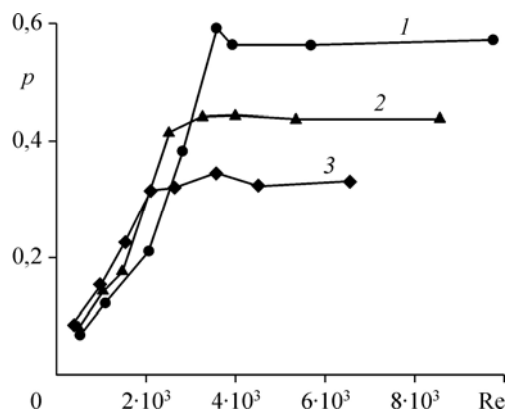
экспериментальные данные свидетельствуют о том, что ламинарно-турбулентный переход в наножидкости начинается раньше, то есть при меньших числах Рейнольдса, чем у базовой жидкости (воде). Сдвиг перехода в сторону меньших чисел Рейнольдса увеличивается с ростом концентрации наночастиц. Так, для воды отклонение от ламинарной зависимости начинается при $Re \sim 2300$, для однопроцентной наножидкости — при $Re \sim 2100$, а для двухпроцентной — при $Re \sim 2000$. Поскольку коэффициент вязкости наножидкости зависит не только от концентрации наночастиц, но также от их размера (см. (1)), то стоит ожидать соответствующей зависимости и коэффициента сопротивления, что подтверждают эксперименты. На рис. 1*b* представлена зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса для наножидкостей с частицами средним размером 25 и 100 нм при их объемной концентрации, равной 2 %. Действительно, отклонение от ламинарной зависимости для коэффициента сопротивления тем больше, чем меньше диаметр наночастиц.

Помимо среднего перепада давления в канале также были измерены пульсации давления на выходе измерительного участка. Зависимость максимальной амплитуды пульсаций p от числа Рейнольдса при размере наночастиц, равном 25 нм, представлена на рис. 2. Пульсации давления наножидкостей ведут себя качественно по-разному в ламинарном и в турбулентном режимах течения. Уровень пульсаций давления в наножидкости при всех докритических числах Рейнольдса примерно на 30–40 % выше, чем в базовой жидкости, то есть частицы дестабилизируют течение. С другой стороны, в турбулентном режиме течения наблюдается обратная картина. Анализ спектров свидетельствует о том, что наночастицы значительно снижают пульсации давления в средней и высокочастотной частях спектра. Это говорит о подавлении мелкомасштабных турбулентных пульсаций. Одновременно в низкочастотной части спектра пульсации давления с ростом концентрации частиц, напротив, увеличиваются. Данный эффект существенно зависит от размера частиц. Дестабилизация течения мелкими частицами ранее отмечалась для течений газозвесей [4, 5]. Наночастицы являются мезоскопическими объектами. В метрике несущей жидкости они — материальные точки. Поэтому наночастицы всех размеров будут дестабилизировать течение. Теоретически такая дестабилизация была предсказана в работе [6] при изучении устойчивости плоского течения Пуазейля наножидкостей на основе этиленгликоля также с частицами диоксида кремния. Можно утверждать, что ламинарно-турбулентный переход во всех наножидкостях будет происходить при меньших числах Рейнольдса, чем в базовых жидкостях.

Исследования по влиянию макроскопических частиц на турбулентные течения были начаты давно. В работе [7] было показано, что при отношении размера частиц d к колмогоровскому масштабу δ , имеющему значения $d/\delta > 0,1$, интенсивность турбулентных пульсаций растет, а при отношении $d/\delta < 0,1$, наоборот, снижается. Следуя результатам этой работы, можно утверждать, что чем меньше частицы, тем больший эффект снижения турбулентных пульсаций должен наблюдаться. Именно об этом свидетельствуют данные измерений, представленные на рис. 2. Можно показать, что для частиц размером 25 нм в диапазоне чисел Рейнольдса от 2200 до 10000 отношение d/δ

Рис. 2. Зависимость максимальной амплитуды пульсаций давления (в килопаскалях) в наножидкостях от числа Рейнольдса при разной объемной концентрации частиц.

1 — вода, 2 — 1 % Al_2O_3 + вода,
3 — 2 % Al_2O_3 + вода.



изменяется в интервале $3 \cdot 10^{-5} \div 3,5 \cdot 10^{-4}$. Таким образом, всюду в исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса согласно критерию, предложенному в работе [7], интенсивность турбулентности в наножидкости по сравнению с базовой должна снижаться.

Список литературы

1. Гузей Д.В., Минаков А.В., Рудяк В.Я. Исследование теплоотдачи наножидкостей в турбулентном режиме течения в цилиндрическом канале // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2016. № 2. С. 65–75.
2. Liu D., Yu L. Single-phase thermal transport of nanofluids in a minichannel // J. Heat Transfer. 2011. Vol. 133. P. 031009-1–031009-11.
3. Zhang J., Diao Y., Zhao Y., Zhang Y. Thermal-hydraulic performance of SiC-water and Al₂O₃-water nanofluids in the minichannel // J. Heat Transfer. 2015. Vol. 138. P. 021705-1–031009-11.
4. Saffman P.G. On the stability of laminar flow of a dusty gas // J. Fluid Mech. 1962. Vol. 13, pt. 1. P. 120–128.
5. Rudyak V.Ya., Isakov E.B., Bord E.G. Hydrodynamic stability of the Poiseuille flow of dispersed fluid // J. Aerosol Sci. 1997. Vol. 28, No. 1. P. 53–66.
6. Rudyak V.Ya., Bord E.G. Nanofluid Poiseuille flow instability // Book of Abstracts of the 13th Asian Symp. on Visualization. Novosibirsk: Parallel, 2015. P. 191–192.
7. Gore R.A., Crowe C.T. Effect of particle size on modulating turbulent intensity // Int. J. Multiphase Flow. 1989. Vol. 15. P. 279–285.

*Статья поступила в редакцию 1 февраля 2016 г.,
после доработки — 28 марта 2016 г.*