

03

## Измерение коэффициента теплоотдачи наножидкости на основе оксида меди в цилиндрическом канале

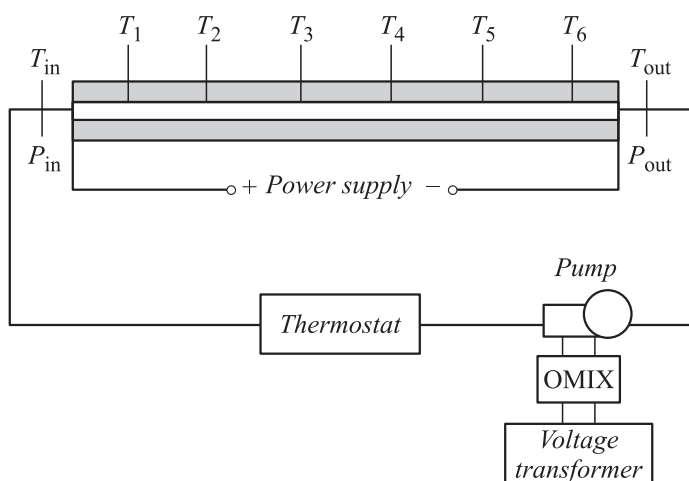
© Д.В. Гузей, А.В. Минаков, В.Я. Рудяк, А.А. Дектерев

Сибирский федеральный университет, Красноярск  
Институт теплофизики им. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
E-mail: gudimas@yandex.ru

Поступило в Редакцию 3 октября 2013 г.

Экспериментально исследован коэффициент теплоотдачи наножидкости при ее течении в цилиндрическом канале. Исследуемая наножидкость была приготовлена на основе дистиллированной воды и наночастиц CuO. Концентрация наночастиц изменялась в диапазоне от 0.25 до 2% по объему. Для стабилизации наножидкости использовался биополимер ксантановая камедь, его массовая концентрация не превышала 0.03%. Установлена значительная интенсификация теплообмена. При концентрациях частиц выше 0.25% наножидкость оказывалась неньютоновской. Получены оценки реологических параметров наножидкости и коэффициента теплопроводности.

Попытки применения жидкости с использованием микрочастиц для целей интенсификации теплообмена известны с середины 70-х годов. На этом пути достичь существенных эффектов не удалось, так как крупные частицы достаточно быстро седиментируют. Жидкости, в которых дисперсным компонентом являются наночастицы (наножидкости), лишены этого недостатка. Уже первые эксперименты показали, что даже малые добавки наночастиц к жидкости могут приводить к значительному росту ее теплопроводности и теплоотдачи, а критический тепловой поток может увеличиваться в разы (см., например, [1–4]). Несмотря на огромное количество работ, в которых исследуется теплопроводность наножидкостей и их теплообмен, полученные результаты часто противоречивы. В большинстве работ отмечается увеличение теплоотдачи при использовании наночастиц. Вместе с тем имеются и публикации, где демонстрируется ее уменьшение при добавлении наночастиц [5]. Необходимо поэтому дальнейшее исследование всех



**Рис. 1.** Схема измерительной установки.

указанных процессов. Ключевым в данной проблеме является даже не теплопроводность наножидкости, а ее коэффициент теплоотдачи. В данной работе для наножидкости на основе воды и наночастиц CuO именно он экспериментально изучается.

Установка представляет замкнутый контур с циркулирующим теплоносителем (рис. 1). С помощью насоса рабочая жидкость из резервуара подается в обогреваемый участок, после прохождения которого поступает в термостат. Расход жидкости в контуре регулируется системой ЛАТР. Обогреваемый участок представляет собой медный цилиндрический канал с толщиной стенки 1 мм, диаметром  $d = 4$  мм и длиной 1 м. В качестве нагревателя используется намотанная на канал нихромовая нить толщиной 0.1 мм с общим сопротивлением 320  $\Omega$ . Канал с нагревателем теплоизолирован. Мощность нагрева регулируется источником тока GPS-6030D. Для измерения локальной температуры канала на его стенках на равном расстоянии друг от друга закреплено 6 хромель-копелевых термопар ( $T_i$  на рис. 1). Измерение температуры осуществлялось измерителями ТРМ-200. Температура на входе в обогреватель и на его выходе измерялась термопарами  $T_{in}$  и  $T_{out}$  (рис. 1).

В качестве теплоносителя использовалась наножидкость на основе дистиллированной воды и наночастиц  $\text{CuO}$  с объемной концентрацией  $\varphi$ , равной 0,25, 0,5, 1 и 2%. Для приготовления наножидкости применялся стандартный двухшаговый процесс и использовался порошок  $\text{CuO}$  производства ООО „Передовые порошковые технологии“, г. Томск. Наночастицы сферические, насыпная плотность порошка равна  $2,2 \text{ g/cm}^3$ . Средний размер наночастиц равнялся 55 нм. После добавления в воду необходимого количества нанопорошка емкость с наножидкостью для разрушения конгломератов наночастиц помещалась в ультразвуковой смеситель УЗДН-А. Для стабилизации наножидкости использовался также ПАВ (биополимер ксантановая камедь), его массовая концентрация не превышала 0,03%. Наножидкость с добавкой этого ПАВ не изменяла своих физических свойств по крайней мере в течение двух месяцев.

Расход теплоносителя в контуре изменялся от 50 до 550 g/min. Данный диапазон соответствовал ламинарному течению для всех теплоносителей, за исключением воды и наножидкости с концентрацией 0,25%. В последнем случае ламинарно-турбулентный переход наблюдается, начиная с расхода около 400 g/min. Таким образом, для трех жидкостей имел место ламинарный режим течения, а для четвертой — ламинарный и переходный.

Проведенные измерения показали, что добавление наночастиц существенно увеличивают и локальный, и средний коэффициенты теплоотдачи флюида. Степень этого увеличения растет с увеличением концентрации наночастиц. При малых расходах (до примерно 300 g/min), когда с определенностью можно говорить о ламинарном режиме течения как для рассматриваемых наножидкостей, так и для воды, степень этого увеличения растет практически пропорционально объемной концентрации наночастиц. При дальнейшем увеличении расхода наблюдается резкий рост среднего коэффициента теплоотдачи воды. Начиная с расхода порядка 350 g/min средний коэффициент теплоотдачи воды сравнивается с соответствующим коэффициентом для наножидкостей с малыми концентрациями наночастиц, а затем начинает их превосходить. При расходе порядка 400 g/min средний коэффициент теплоотдачи воды становится выше, чем у 2-процентной наножидкости. Такое поведение связано с турбулизацией течения воды. Это же косвенно указывает на то, что турбулизации наножидкостей при данных расходах все еще не происходит. Почему?

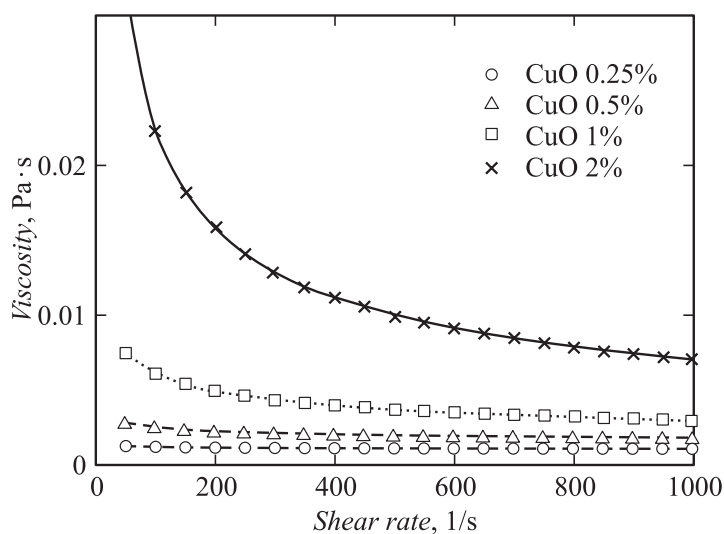


Рис. 2. Зависимость вязкости наножидкости от скорости сдвига.

Ламинарно-турбулентный переход определяется числом Рейнольдса. При заданном расходе вариации его значений для воды и наножидкостей могут быть связаны лишь с изменением плотности и коэффициента вязкости наножидкости. Но при указанных объемных концентрациях наночастиц изменение плотности жидкости приводит лишь к незначительному (не более нескольких процентов) изменению числа Рейнольдса и не может существенно сдвинуть границу ламинарно-турбулентного перехода. Таким образом, необходимо изучить вязкость наножидкости. Вязкость наножидкостей экспериментально изучалась в последнее десятилетие достаточно систематически (см. [6–9]) и цитированную там литературу). Надежно установлено, что добавление наночастиц, во-первых, существенно увеличивает вязкость несущей жидкости, а во-вторых, может приводить к изменению реологии флюида.

Вязкость наножидкости в представляемых экспериментах измерялась при помощи ротационного вискозиметра OFITE-900 при температуре 25°C. Точность измерений составляла порядка 1%. Прежде всего, было установлено, что коэффициент вязкости исследуемых наножидкостей существенно зависит от скорости сдвига. На рис. 2 представлена

Таблица 1. Зависимость реологических параметров наножидкости

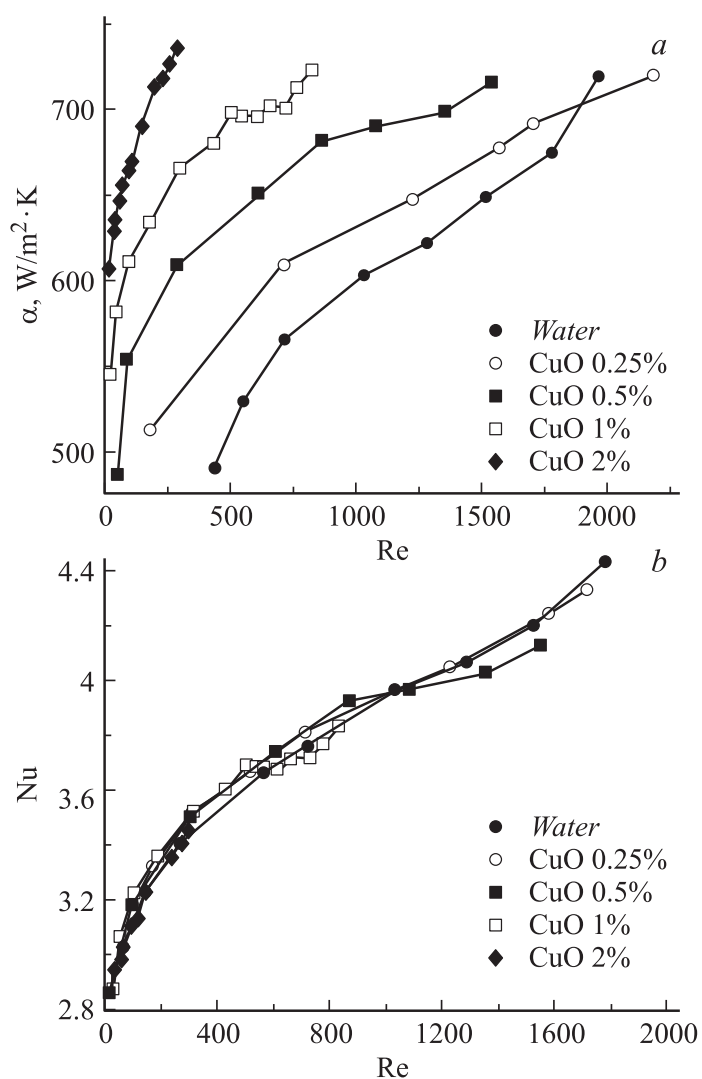
$\phi$ , %	$n$	$K$
2	0.502	0.223
1	0.697	0.025
0.5	0.853	0.005

зависимость эффективного коэффициента вязкости  $\mu$  наножидкостей от скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ . Коэффициент вязкости наножидкости с минимальной концентрацией наночастиц (0.25%) не меняется с ростом скорости сдвига, т. е. данная наножидкость является ньютоновской. Все остальные наножидкости оказываются неньютоновскими. Установлено, что их реология хорошо описывается моделью степенной жидкости:  $\mu = K\dot{\gamma}^{n-1}$ . Входящие в эту формулу параметры представлены в табл. 1. С увеличением концентрации наночастиц индекс наножидкости  $n$  уменьшается, а параметр  $K$ , напротив, растет.

В силу того, что вязкости исследуемых жидкостей существенно отличаются, течения несущей жидкости и наножидкостей при заданном расходе будут соответствовать различным числам Рейнольдса, а значит и разным режимам течения. По этой причине полезно проанализировать зависимость коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса. Соответствующая зависимость приведена на рис. 3, а. Поскольку исследуемая наножидкость имеет неньютоновские свойства, то число Рейнольдса в данном случае определялось стандартным для степенной жидкости образом [10]:

$$\text{Re} = \frac{\rho U^{2-n} d^n}{K \cdot 8^{n-1} \left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n},$$

где  $U$  — средняя скорость течения, определяемая расходом,  $d$  — диаметр трубки. На рис. 3 приведены данные для среднего коэффициента  $\bar{\alpha} = GC_p(t_i - t_o)S^{-1}(\bar{t}_w - t_s)^{-1}$ . Здесь  $G$  — расход жидкости,  $S$  — площадь боковой поверхности трубки,  $t_o$ ,  $t_i$  — температуры жидкости на выходе и на входе в канал,  $t_s$  — средняя температура жидкости в трубке,  $t_s = (t_i + t_o)/2$ ,  $\bar{t}_w$  — средняя арифметическая температура стенки трубки, полученная усреднением по данным шести термопар,  $C_p$  — теплоемкость теплоносителя:  $C_p = \rho^{-1}[(1 - \Phi)\rho_f C_{pf} + \Phi\rho_p C_{pp}]$ , где  $\rho_f$  — плотность транспортной жидкости,  $\rho_p$  — плотность мате-



**Рис. 3.** Зависимость среднего коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса (a) и числа Нуссельта Nu от числа Рейнольдса (b).

**Таблица 2.** Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от концентрации

$\phi, \%$	0.25	0.5	1	2
$\lambda_r$	1.06	1.13	1.24	1.4

риала наночастицы,  $C_{Pf}$  и  $C_{Pp}$  — теплоемкость несущей жидкости и материала частиц соответственно.

Интенсификация теплообмена при использовании наножидкостей при фиксированном числе Рейнольдса оказывается весьма значительной. Так, коэффициент теплоотдачи для однопроцентной наножидкости более чем на 40% выше аналогичного значения для воды практически при всех Re. Используемый в данных экспериментах насос не позволил получить расходы, превышающие 500 g/min. Поэтому для двухпроцентной наножидкости удалось достичь лишь чисел Рейнольдса порядка 300. Полученная для этой наножидкости зависимость коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса чрезвычайно круто идет вверх (рис. 3, *a*). Аппроксимируя зависимость коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса для двухпроцентной наножидкости, можно с уверенностью сказать, что превышение коэффициента теплоотдачи оказывается двукратным или даже больше. Естественно, с уменьшением концентрации наночастиц этот эффект монотонно снижается. При значении числа Рейнольдса выше 2000 для воды имеет место ламинарно-турбулентный переход, что интенсифицирует ее теплообмен.

Если считать, что зависимость числа Нуссельта  $Nu = (\bar{\alpha}d)/\lambda$  от числа Рейнольдса носит универсальный характер, то по данным представленных экспериментов можно оценить эффективные значения коэффициента теплопроводности  $\lambda$  рассмотренных наножидкостей. Для этого следует подобрать  $\lambda$  так, чтобы зависимость числа Нуссельта от числа Рейнольдса для этих жидкостей совпала с аналогичной зависимостью для воды. Такое сопоставление проведено на рис. 3, *b*. Как видно, все данные неплохо согласуются между собой, если соответствующие коэффициенты теплопроводности задаются значениями, приведенными в табл. 2 (здесь  $\lambda_r = \lambda_n/\lambda_w$ ,  $\lambda_n$  и  $\lambda_w$  — соответственно коэффициенты теплопроводности наножидкости и воды). Полученные значения коэффициента теплопроводности наножидкости на основе воды и частиц CuO согласуются и с прямыми его измерениями [11].

Полученные значения коэффициента теплопроводности существенно превышают значения, предсказываемые теорией Максвелла, и хорошо аппроксимируются соотношением  $\lambda_r = 1 + 28.2\phi - 400\phi^2$ .

Теплопроводность наножидкостей зависит от размера и, согласно данным [12], увеличивается с ростом размера частиц. Поэтому коэффициент теплоотдачи можно увеличить, если использовать наножидкости с более крупными частицами. Энергетически это также выгоднее, поскольку более крупные частицы имеют меньшую вязкость [7–9].

Определяющее соотношение для рассматриваемых наножидкостей получено здесь при фиксированной температуре. Однако в [7,9] показано, что при не слишком высоких концентрациях наночастиц зависимость коэффициента вязкости наножидкости от температуры определяется соответствующей зависимостью несущей жидкости. Поэтому полученное здесь определяющее соотношение также достаточно универсально.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 12-08-33061 и 13-01-00052), ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 гг. (соглашение № 16.740.11.0642, 14.A18.21.0344, 8756, 14.132.21.1750) и гранта президента РФ МК-6296.2013.8.

## Список литературы

- [1] *Das S.K., Choi S.U.S., Yu W., Pradeep T.* Nanofluids Science and Technology. New Jersey: Wiley-Interscience, 2007. 397 p.
- [2] *Yu. W., France D.M., Choi S.U.S., Routbort J.L.* Review and assessment of nanofluid technology for transportation and other application. Argonne National Laboratory, ANL/ESD/07-9. 2007. 78.
- [3] *Терехов В.И., Калинина С.В., Леманов В.В.* // Теплофизика и аэромеханика. 2010. № 2. С. 173–188.
- [4] *Рудяк В.Я., Белкин А.А., Томилина Е.А.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 14. С. 49–54.
- [5] *Pak B., Cho Y.I.* // Experimental heat transfer. 1998. V. 11. P. 151–170.
- [6] *Mahbubul I.M., Saidur R., Amalina M.A.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 2012. V. 55. P. 874–885.
- [7] *Рудяк В.Я., Димов С.В., Кузнецов В.В., Бардаханов С.П.* // ДАН. 2013. Т. 450. № 1. С. 43–46.



- [8] *Рудяк В.Я., Димов С.В., Кузнецов В.В.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 17. С. 53–59.
- [9] *Rudyak V.Ya.* // Advances in Nanoparticles. 2013. V. 2. P. 266–279.
- [10] *Metzner A.B., Reed J.C.* // Aiche Journal. 1955. V. 1. P. 434–440.
- [11] *Sahooli M., Sabbaghi S.* // J. Nanofluids. 2012. V. 1. P. 155–160.
- [12] *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.