

УДК 661.847.22:536.223

**РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДЯЩИХ  
СВОЙСТВ НАНОСУСПЕНЗИЙ С СОДЕРЖАНИЕМ ОКСИДА ЦИНКА****А.П. Коскин<sup>1</sup>, С.А. Попов<sup>2</sup>, А.В. Щербашина<sup>1,3</sup>**<sup>1</sup>*Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН*<sup>2</sup>*ООО «Новые технологические решения»*<sup>3</sup>*Новосибирский государственный технический университет*

Теплопроводность ряда жидкостей с низкой диэлектрической проницаемостью может быть существенно увеличена при введении в них наночастиц, при условии получения устойчивых наносuspензий. В ходе работы подобран состав базовой теплоотводящей жидкости с содержанием тетраэтиленгликоля (ПЭГ200) и коммерчески доступного керосина (КО25). Разработаны методы синтеза устойчивых наноразмерных золей 0,5–3 вес. % ZnO/ПЭГ200-КО25 с использованием олеата цинка в качестве дисперсанта. Подготовлена экспериментальная установка для тестирования теплоотводящих свойств жидкостей (в том числе наносuspензий). Показано, что в автоконвекционном режиме теплоотводящие свойства синтезированных наносuspензий превышают коммерчески-доступные образцы полиметилсилоксановых жидкостей.

*Ключевые слова:* наночастицы оксида цинка, теплопроводность, теплоотведение, наносuspензии, передача тепла.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-7-15

**Введение**

Для охлаждения перегреваемых частей электрооборудования оптимально использование жидкостных теплоносителей [1]. С точки зрения эффективности теплоотведения лучше те жидкости, что хорошо проводят тепло, сохраняя при этом остальные требуемые свойства, такие как низкая электропроводность, работоспособность в широком интервале температур и термическая устойчивость. В этом качестве чаще всего используют полиметилсилоксановые жидкости. Они обладают хорошими диэлектрическими свойствами (PMS-X, где X – вязкость жидкости).

Теплопроводность ряда жидкостей может быть существенно увеличена при введении в них коллоидных наночастиц («nanofluids»). В частности, высокая теплопроводность зафиксирована для коллоидов с содержанием углеродных нанотрубок, нанодисперсных алмазов, а также ряда наночастиц металлов и металлооксидов [2–13]. Процессы теплопередачи в системах данного типа активно исследовались в ряде работ как экспериментально, так и теоретически. Разработаны методы синтеза ряда коллоидов, отличающихся типом наночастиц и составом базовой жидкости. Исследованы процессы теплопередачи таких коллоидов в автоконвекционном режиме и в режиме с принудительным оборотом теплоносителя. Улучшенная теплопроводность коллоидов является основой для инноваций в области интенсификации теплообмена, что имеет большое значение для ряда промышленных процессов и задач микроэлектроники.

В качестве базовой теплоотводящей жидкости, в которой диспергируются наночастицы, может быть использован этиленгликоль (ЭГ). ЭГ хорошо удерживает

---

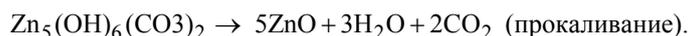
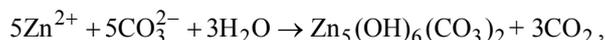
Работа выполнена в рамках государственного задания ИК СО РАН (Проект № АААА-А17-117041710086-6)

частицы во взвешенном состоянии и обладает высокой теплопроводностью, однако его гигроскопичность значительно ухудшает диэлектрические свойства. Альтернативой ЭГ выступают низкомолекулярные полиэтиленгликоли (ПЭГ; до 400 г/моль), обладающие малой вязкостью (вязкость ЭГ при 25 °С – 16.2 сР, ПЭГ200 – 60 сР), что принципиально для большинства приложений с использованием теплоносителей.

Целью настоящей работы является разработка составов и методов синтеза наночастиц для композиций типа ZnO/ПЭГ200-керосин, а также исследование их теплопроводящих свойств в автоконвекционном режиме. Использование ZnO для модифицирования базовой жидкости (состав ПЭГ200-керосин) обусловлено его низкой токсичностью, дешевизной производства и высокой теплопроводностью. В предложенной нами композиции ПЭГ200 как повышает теплопроводность смеси за счет увеличения теплопроводности базовой жидкости, так и способствует удерживанию наночастиц ZnO во взвешенном состоянии. Добавка керосина, который использовался в качестве модельного насыщенного углеводорода, в свою очередь, снижает вязкость жидкости. Отметим, что ПЭГ200 и насыщенные углеводороды взаимно растворимы, в отличие от ЭГ и пропиленгликоля.

### 1. Экспериментальная часть

Стандартный метод синтеза наночастиц оксида цинка заключался в осаждении водных растворов солей предшественников ZnX (где X =  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{AcO}^-$ ) карбонатом аммония ( $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ ) до pH ~8 с получением золя гидроксид-карбоната цинка ( $\text{Zn}_5(\text{OH})_6(\text{CO}_3)_2$ ) [14–17]. Полученный золь отделяли центрифугированием, промывали и прокачивали при температурах 300–400 °С с образованием фазы ZnO (метод А), либо получали оксид цинка непосредственно в водной суспензии, повышая основность среды до pH ~9–10 (обработка раствором NaOH; метод Б). Полученный по методу Б оксид цинка центрифугировали и сушили при температуре 90 °С.



Полученные образцы подвергали механической активации (планетарная мельница Активатор-2SL). Далее, сухой оксид цинка экстрагировали (2 ч, 60 °С) базовой жидкостью (смеси состава керосин (K025) и тетраэтиленгликоль (м.в. – 200 г/моль; ПЭГ200)) в присутствии олеата цинка (до 5 вес. %) (ZnO-nf; рис.1). Также тестировался метод модификации золя ZnO олеиновой кислотой непосредственно в маточном растворе без выделения сухого оксида. Для этого осаждение ZnO вели непосредственно в присутствии олеиновой кислоты (до 5 вес. %). Полученный гидрофобный осадок отфильтровывали, промывали этиловым спиртом и диспергировали в базовой жидкости (ZnO-oa; рис. 1). Все полученные суспензии выстаивали в течение 24 часов отделяя выпавший осадок, анализировали содержание взвешенного оксида и исследовали теплопроводящие свойства. Последующее выстаивание наносуспензий (до 3 недель) не приводило к осаждению дополнительных количеств оксида. Для изучения влияния концентрации наночастиц на теплопроводящие свойства наносуспензий образец с содержанием 3 вес. % ZnO разбавляли чистой базовой жидкостью. Вязкость жидкостей измеряли ротационным вискозиметром Брукфильда (DV2TLV). Также получен-

ные образцы охарактеризовывались методом динамического рассеяния света (ДРС, Photocog compact) для определения гидродинамического радиуса диспергированных наночастиц. Для исследования морфологии наночастиц в полученных образцах использовалась электронная микроскопия (JEM-2010). Фазовый состав полученных оксидов регистрировался с использованием метода дифракции рентгеновских лучей (DRON-3M).

## 2. Результаты и обсуждение

### 2.1. Приготовление наносuspензий с содержанием оксида цинка

Общая схема протестированных в представленной работе методов синтеза наночастиц ZnO и наносuspензий с их содержанием приведена на рис. 1.

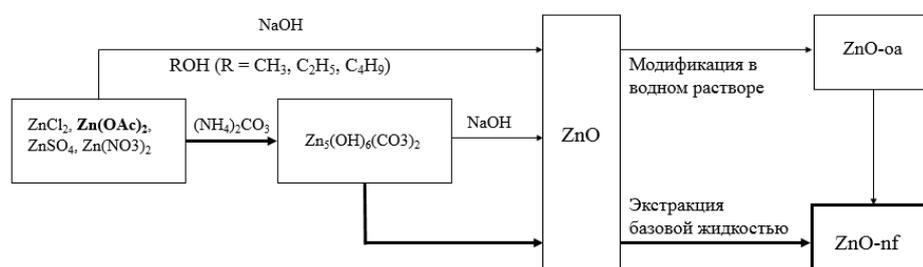


Рис. 1 – Схема синтеза наносuspензий с содержанием оксида цинка

Fig. 1 – The scheme of zinc oxide containing nanofluids synthesis

В результате проведенных экспериментов была подобрана оптимальная методика синтеза наносuspензий оксида цинка (ZnO-nf, размер частиц 20–50 нм), которая заключалась в последовательных стадиях синтеза гидроксид-карбоната цинка, последующего прокаливания при температуре 300 °С, механической активации и экстракции базовой жидкостью. Последующее выстаивание (24 часа, 20 °С) полученных наносuspензий приводило к осаждению фракции крупных частиц ( $\sim > 50$  нм), а также не модифицированных олеатом частиц и образованию устойчивых к седиментации образцов (до 3 вес. % ZnO). Предварительно с помощью данных термогравиметрии (ток аргона, 20–500 °С, 10 °С/мин) было показано, что разложение  $Zn_5(OH)_6(CO_3)_2$  начинается в диапазоне температур 280–300 °С. Таким образом, с целью снизить спекание частиц наиболее целесообразно прокаливать предшественник оксида цинка при температурах, не превышающих 300 °С. С использованием электронной микроскопии было обнаружено, что при осаждении  $ZnCl_2$ ,  $ZnSO_4$  и  $Zn(NO_3)_2$  карбонатом аммония, с последующим прокаливанием, происходит образование наночастиц ZnO преимущественно в форме «стержней» и «цветков». Ранее было показано, что для синтеза устойчивых наносuspензий в гидрофобных растворителях оптимально использование сферических наночастиц оксида [9]. Это предположительно связано с наименьшей площадью гидрофильной поверхности частиц. Другим необходимым условием получения устойчивых к седиментации наносuspензий является синтез частиц оксида цинка с размерами, не превышающими 80–100 нм. При синтезе ZnO в спиртовых растворах (осаждение предшественников оксида щелочами в метаноле, этаноле или изопропанол) образовывались наночастицы с наименьшими размерами (до 10–30 нм), однако данная методика требует большого расхода органических

растворителей [18]. Кроме того, при использовании данного метода не удалось подобрать способ модификации поверхности частиц оксида без выделения золя из спиртовой суспензии. Выделение золя из спиртовой суспензии приводило к существенной агломерации наночастиц. Также при выделении из суспензии оксида цинка, полученного по методу Б (осаждение карбонатом, с последующей обработкой щелочью) и модификацией олеиновой кислотой получить устойчивые наносуспензии не удалось. Это предположительно связано с быстрой пептизацией и укрупнением оксида цинка в воднощелочных растворах, что хорошо согласуется с данными работы [18]. По этой же причине для синтеза наносуспензий предпочтителен метод экстракции (согласно данным ДРС размер частиц  $ZnO-nf < ZnO-oa$ , рис. 1).

## 2.2. Исследование теплопроводящих свойств наносуспензий с содержанием оксида цинка

Для тестирования теплопроводящих свойств жидкостей, в том числе наносуспензий, была подготовлена экспериментальная установка (рис. 2, а). Эксперимент моделирует процесс отведения тепла от разогреваемых элементов в автоконвекционном режиме. Установка состояла из латунной кюветы (1, 7 мл) погруженной в термостатируемую среду (2, 20 °С). Внутри емкости вносили испытуемую жидкость (3, 5 мл) и погружали не соприкасающийся со стенками емкости и снабженный термопарой (5) нагревательный элемент (4). Перед проведением эксперимента жидкости дегазировались (продувание гелия), с целью снизить вклад растворенного газа в наблюдаемую теплопроводность.

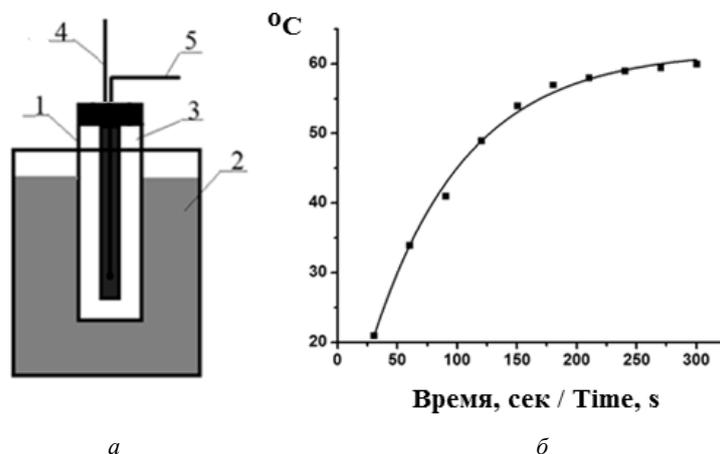


Рис. 2 – Исследование теплопроводящих свойств жидкостей:  
а – схема экспериментальной установки; б – определение равновесной температуры для типичного эксперимента

Fig. 2 – Investigation of the nanofluids thermal conductivity:  
a – scheme of the experimental setup; b – determination of an equilibrium temperature for a typical experiment

Благодаря высокой теплопроводности стенок кюветы на термопаре устанавливалась равновесная температура ( $T_{равн}$ ; характеристическое время  $\approx 5$  мин), обусловленная нагреванием элемента и отдачей тепла в термостатируемую среду через слой испытуемой жидкости (рис. 2, б) или с конвекционным потоком.

Таким образом, равновесная температура характеризует наблюдаемую теплопроводность наносuspензии, которая определяется теплопроводностью жидкости и ее вязкостью. Более низкая равновесная температура соответствует более эффективной теплопередаче.

В предварительных исследованиях был подобран состав бинарной базовой жидкости (рис. 2, табл. 1). В качестве ее компонентов использовались тетраэтиленгликоль и коммерчески-доступный керосин. КО25 использовался в качестве модельного насыщенного углеводорода и, схожие закономерности регистрировались в случае низковязких парафинов. Добавление керосина (1,7 сП) существенно снижало динамическую вязкость ПЭГ (с 60 сП, до 2–4 сП). Оптимальным, с точки зрения наблюдаемой теплопроводности, оказался состав с содержанием 0,68 объемных долей КО25. Данный состав композиции базовой жидкости сочетает в себе низкую вязкость, обусловленную содержанием насыщенных углеводородов и высокую теоретическую теплопроводность, которая характерна для гликолей.

Таблица 1 / Table 1

**Теплопроводящие свойства базовых жидкостей**  
**Heat-transfer properties of base fluids**

№	Базовая жидкость	Объемная доля КО25	$T_{\text{равн.}}$ °С
1	ПЭГ200	0	67,3
2	КО25/ПЭГ200	0,20	61,9
3	КО25/ПЭГ200	0,36	57,5
4	КО25/ПЭГ200	0,68	55,4
5	КО25/ПЭГ200	1,00	63,7

Для подобранного состава базовой жидкости (0,68 об. долей КО25/ПЭГ200) исследовалось влияние содержания наночастиц оксида цинка на наблюдаемую теплопроводность. В результате проведенного эксперимента было показано, что повышение содержания наночастиц ZnO свыше 1 % приводит к повышению равновесной температуры и соответственно к снижению наблюдаемой теплопроводности. Это предположительно связано с повышением вязкости наносuspензий в случае высоких концентрацией наночастиц ZnO (табл. 2). Кроме того, при увеличении концентрации ZnO в базовой жидкости согласно данным метода ДРС наблюдается увеличение среднего размера частиц (30–40 нм – 0,5 %, 40–50 нм – 3 %), что предположительно приводит к ухудшению теплопроводящих свойств. Тестирование наблюдаемой теплопроводности полученных наносuspензий позволило подобрать оптимальную концентрацию вводимых наночастиц (~1 %).

Таблица 2 / Table 2

**Теплопроводящие свойства нанодисперсий с содержанием оксида цинка**  
**Heat-transfer properties of zinc oxide containing nanofluids**

№	Концентрация nano-ZnO (вес.%)	Базовая жидкость (об. доля КО25)	Вязкость, сП	$T_{\text{равн.}}$ °С
1	–	PMS-20	20	62,3
2	$0,5 \pm 0,03$	КО25/ПЭГ200 (0,68)	1,9	51,1
3	$1 \pm 0,03$	КО25/ПЭГ200 (0,68)	2,5	49,7
4	$2 \pm 0,03$	КО25/ПЭГ200 (0,68)	3,8	52,3
5	$3 \pm 0,02$	КО25/ПЭГ200 (0,68)	5,0	52,5

### Заключение

В результате работы оптимизирован метод синтеза наночастиц оксида цинка и их метод последующего диспергирования с образованием устойчивых к седиментации наносуспензий (0,5–3 вес. % ZnO/ПЭГ200-КО25). Подготовлена экспериментальная установка для тестирования теплоотводящих свойств жидкостей (в том числе наносуспензий). Подобран оптимальный состав базовой теплоотводящей жидкости и содержание наночастиц ZnO. Показано, что в автоконвекционном режиме теплоотводящие свойства синтезированных наносуспензий ( $T_{\text{равн}} = 49,7\text{--}52,5$  °C) превышают коммерчески-доступную жидкость (PMS-20;  $T_{\text{равн}} = 62,3$  °C).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Review of heat transfer in nanofluids: conductive, convective and radiative experimental results / M. Lomascolo, G. Colangelo, M. Milanese, A. de Risi // *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – Vol. 43. – P. 1182–1198. – DOI: 10.1016/j.rser.2014.11.086.
2. **Saidur R., Leong K.Y., Mohammad H.A.** A review on applications and challenges of nanofluids // *Renewable Sustainable Energy Reviews*. – 2011. – Vol. 15, N 3. – P. 1646–1668. – DOI: 10.1016/j.rser.2010.11.035.
3. **Huminic G., Huminic A.** Application of nanofluids in heat exchangers: a review // *Renewable Sustainable Energy Reviews*. – 2012. – Vol. 16, N 8. – P. 5625–5638. – DOI: 10.1016/j.rser.2012.05.023.
4. Techniques for measuring the thermal conductivity of nanofluids: a review / G. Paul, M. Chopkar, I. Manna, P.K. Das // *Renewable Sustainable Energy Reviews*. – 2010. – Vol. 14, N 7. – P. 1913–1924. – DOI: 10.1016/j.rser.2010.03.017.
5. **Sarkar J.** A critical review on convective heat transfer correlations of nanofluids // *Renewable Sustainable Energy Reviews*. – 2011. – Vol. 15, N 6. – P. 3271–3277. – DOI: 10.1016/j.rser.2011.04.025.
6. Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultrafine particles (dispersion of  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ , and  $\text{TiO}_2$  ultrafine particles) / H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, N. Hishinuma // *Netsu Bussei*. – 1993. – Vol. 7, N 4. – P. 227–233. – DOI: 10.2963/jjtp.7.227.
7. Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles / S. Lee, S.U.S. Choi, S. Li, J.A. Eastman // *The Journal of Heat Transfer*. – 1999. – Vol. 121, N 2. – P. 280–289. – DOI: 10.1115/1.2825978.
8. **Wang X., Xu X., Choi S.U.S.** Thermal conductivity of nanoparticle fluid mixture // *The Journal of Thermophysics Heat Transfer*. – 1999. – Vol. 13, N 4. – P. 474–480. – DOI: 10.2514/2.6486.
9. Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles / H. Xie, J. Wang, T. Xi, Y. Liu, F. Ai, Q. Wu // *The Japanese Journal of Applied Physics*. – 2002. – Vol. 91, N 7. – P. 4568–4572. – DOI: 10.1063/1.1454184.
10. Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids / S.K. Das, N. Putra, P. Thiesen, W. Roetzel // *ASME The Journal of Heat Transfer*. – 2003. – Vol. 125, N 4. – P. 567–574. – DOI: 10.1063/1.1454184.
11. **Wen D., Ding Y.** Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based  $\gamma$ -alumina nanofluids // *The Journal of Nanoparticle Research*. – 2005. – Vol. 7, N 2–3. – P. 265–274. – DOI: 10.1007/s11051-005-3478-9.
12. **Li C.H., Peterson G.P.** Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids) // *The Japanese Journal of Applied Physics*. – 2006. – Vol. 84, N 1. – P. 1–8. – DOI: 10.1205/cherd.04253.
13. Thermal conductivity and specific heat capacity measurements of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanofluids / V. Barbes, R. Paramo, E. Blanco, M.J. Pastoriza-Gallego, M.M. Pineiro, J.L. Legido,

- C. Casanova // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2013. – Vol. 111, N 2. – P. 1615–1625. – DOI: 10.1007/s10973-012-2534-9.
14. Synthesis and surface modification of ZnO nanoparticles / H. Ruoyu, P. Tingting, Q. Jianzhong, L. Hongzhong // *Chemical Engineering Journal*. – 2006. – Vol. 119, N 2. – P. 71–81. – DOI: 10.1016/j.cej.2006.03.003.
  15. Size-controllable synthesis of spherical ZnO nanoparticles: size- and concentration-dependent resonant light scattering / Y. Jun, Zh Ronghui., Zh. Chengbin, S. Qun, L. Yi, L. Chongying, H. Xiandeng // *Microchemical Journal*. – 2012. – Vol. 100. – P. 61–65. – DOI: 10.1016/j.microc.2011.09.002.
  16. Synthesis of ZnO nanoparticles by thermal decomposition of basic zinc carbonate / Hutera B., Kmita A., Olejnik E., Tokarski T. // *Journal of Archives of Metallurgy and Materials*. – 2013. – Vol. 58, N 2. – P. 489–491. – DOI: 10.2478/amm-2013-0023.
  17. **Zhang S.Z., Li X.G.** Preparation of ZnO particles by precipitation transformation method and its inherent formation mechanisms // *Journal of Colloids and Surfaces A: Physicochem.* – 2003. – Vol. 226. – P. 35–44. – DOI: 10.1016/S0927-7757(03)00383-2.
  18. **Meulenkamp E.A.** Synthesis and growth of ZnO nanoparticles // *The Journal of Physical Chemistry*. – 1998. – Vol. 102, N 29. – P. 5566–5572. – DOI: 10.1021/jp980730h.

## THE COMPOSITION DEVELOPMENT AND THE HEAT TRANSFER INVESTIGATION OF ZINC OXIDE NANOFLUIDS

**Koskin A.P.<sup>1</sup>, Popov S.A.<sup>2</sup>, Shcherbashina A.V.<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup>*Borescov Institute of Catalysis, Novosibirsk, Russia*

<sup>2</sup>*“New technological solutions” Ltd, Berdsk, Russia*

<sup>3</sup>*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

Many industrial processes involve heat removal by means of cooling devices. In particular, the problem of the temperature control has become crucial in high heat fluxes applications, such as nuclear fission plants and systems for micro/nano power electronics (MEMS/NEMS). Nanofluids represent diluted suspensions of nanoparticles with a diameter of less than 100 nm. The present study is devoted to the liquid composition consists of zinc oxide nanoparticles (ZNP) in tetraethylene glycol (PEG200)/kerosene (KO25) base fluid. Zinc oxide nanoparticles samples were obtained by sol-gel technique using  $ZnX$  (II) (where  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $AcO^-$ ) as precursor, followed by calcination of  $Zn(CO_3)_y(OH)_x$  at 300–400 °C. Preparation methods of 0.5–3 wt.% ZnO/10–40 vol.% PEG200-KO25 nanofluids have been developed using zinc oleate (1–3 wt.%) as a dispersant. The observed thermal conductivity were measured using self-constructed experimental setup. An equilibrium temperature ( $T_{eq}$ ) established as a result of heat transfer to a medium and constant heating process. That parameter used to describe observed thermal conductivity. The lower viscosity of the prepared nanofluids leads to a greater observable thermal conductivity at auto-convection mode ( $T_{eq} = 49.7$ – $52.5$  and  $62.1$  °C for PMS-20).

*Keywords:* zinc oxide nanoparticles, thermal conductivity; nanofluids, heat transfer.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-7-15

## REFERENCES

1. Lomascolo M., Colangelo G., Milanese M., Risi A. de. Review of heat transfer in nanofluids: conductive, convective and radiative experimental results. *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 43, pp. 1182–1198. DOI: 10.1016/j.rser.2014.11.086.
2. Saidur R., Leong K.Y., Mohammad H.A. A review on applications and challenges of nanofluids. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, no. 3, pp. 1646–1668. DOI: 10.1016/j.rser.2010.11.035.
3. Humnic G., Humnic A. Application of nanofluids in heat exchangers: a review. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 2012, vol. 16, no. 8, pp. 5625–5638. DOI: 10.1016/j.rser.2012.05.023.

4. Paul G., Chopkar M., Manna I., Das P.K. Techniques for measuring the thermal conductivity of nanofluids: a review. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 2010. vol. 14, no. 7, pp. 1913–1924. DOI: 0.1016/j.rser.2010.03.017.
5. Sarkar J. A critical review on convective heat transfer correlations of nanofluids. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, no. 6, pp. 3271–3277. DOI: 10.1016/j.rser.2011.04.025.
6. Masuda H., Ebata A., Teramae K., Hishinuma N. Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultrafine particles (dispersion of  $\text{c-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ , and  $\text{TiO}_2$  ultrafine particles). *Netsu Bussei*, 1993, vol. 7, no. 4, pp. 227–233. DOI: 10.2963/jjtp.7.227.
7. Lee S., Choi S.U.S., Li S., Eastman J.A. Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles. *The Journal of Heat Transfer*, 1999, vol. 121, no. 2, pp. 280–289. DOI: 10.1115/1.2825978.
8. Wang X., Xu X., Choi S.U.S. Thermal conductivity of nanoparticle fluid mixture. *The Journal of Thermophysics Heat Transfer*, 1999, vol. 13, no. 4, pp. 474–480. DOI: 10.2514/2.6486.
9. Xie H., Wang J., Xi T., Liu Y., Ai F., Wu Q. Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles. *The Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, vol. 91, no. 7, pp. 4568–4572. DOI: 10.1063/1.1454184.
10. Das S.K., Putra N., Thiesen P., Roetzel W. Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids. *ASME The Journal of Heat Transfer*, 2003, vol. 125, no. 4, pp. 567–574. DOI: 10.1063/1.1454184.
11. Wen D., Ding Y. Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based  $\gamma$ -alumina nanofluids. *The Journal of Nanoparticle Research*, 2005, vol. 7, no. 2–3, pp. 265–274. DOI: 10.1007/s11051-005-3478-9.
12. Li C.H., Peterson G.P. Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids). *The Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 84, no. 1, pp. 1–8. DOI: 10.1205/cherd.04253.
13. Barbes V., Paramo R., Blanco E., Pastoriza-Gallego M.J., Pineiro M.M., Legido J.L., Casanova C. Thermal conductivity and specific heat capacity measurements of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanofluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2013, vol. 111, no. 2, pp. 1615–1625. DOI: 10.1007/s10973-012-2534-9.
14. Ruoyu H., Tingting P., Jianzhong Q., Hongzhong L. Synthesis and surface modification of ZnO nanoparticles. *Chemical Engineering Journal*, 2006, vol. 119, no. 2, pp. 71–81. DOI: 10.1016/j.cej.2006.03.003.
15. Jun Y., Ronghui Zh., Chengbin Zh., Qun S., Yi L., Chongying L., Xiandeng H. Size-controllable synthesis of spherical ZnO nanoparticles: size- and concentration-dependent resonant light scattering. *Microchemical Journal*, 2012, vol. 100, pp. 61–65. DOI: 10.1016/j.microc.2011.09.002.
16. Hutera B., Kmita A., Olejnik E., Tokarski T. Synthesis of ZnO nanoparticles by thermal decomposition of basic zinc carbonate. *Journal of Archives of Metallurgy and Materials*, 2013, vol. 58, no. 2, pp. 489–491. DOI: 10.2478/amm-2013-0023.
17. Zhang S.Z., Li X.G. Preparation of ZnO particles by precipitation transformation method and its inherent formation mechanisms. *Journal of Colloids and Surfaces A: Physicochem*, 2003, vol. 226, pp. 35–44. DOI: 10.1016/S0927-7757(03)00383-2.
18. Meulenkamp E.A. Synthesis and growth of ZnO nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry*, 1998, vol. 102, no. 29, pp. 5566–5572. DOI: 10.1021/jp980730h.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**Коскин Антон Павлович** – родился в 1980 году, канд. техн. наук, научный сотрудник лаборатории исследования наноструктурированных катализаторов и сорбентов Института катализа СО РАН. Область научных интересов: твердые кислоты, гетерогенный катализ, нитрование ароматических соединений, тонкий органический синтез. Опубликовано 23 научные работы. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 5. E-mail: koskin@catalysis.ru).

**Koskin Anton Pavlovich** (b. 1980) – Candidate of Sciences (Eng.), researcher, LNCSR department, Borescov Institute of Catalysis. His research interests are currently focused on solid acids, heterogeneous catalysis, aromatic nitration, fine organic chemistry. He is author of 23 scientific papers. (Address: 5, Pr. Akad. Lavrentieva, Novosibirsk, 630128, Russia. E-mail: koskin@catalysis.ru).



**Попов Сергей Александрович** – родился в 1976 году, канд. хим. наук, руководитель компании ООО «Новые технологические решения». Область интересов: наночастицы металлов и оксидов, наноразмерные золи, тонкий органический синтез. Опубликовано 10 научных работ. (Адрес: 633011, Россия, Бердск, ул. Попова, 11/3. E-mail: ma-montforyou@gmail.com).

**Popov Sergey Alexandrovich** (b. 1976) – Candidate of Sciences (Chem.), head of the company “New technological solutions” Ltd. His research interests are currently focused on nanoparticles of metals and metal oxides, nanoscale soles and nanofluids, fine organic chemistry. He is author of 10 scientific papers. (Address: 11/3, Popova str., Berdsk, 633011, Russia. E-mail: ma-montforyou@gmail.com).



**Щербашина Анастасия Васильевна** – родилась в 1999 году, студентка Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: синтез наноразмерных зелей, исследование теплопроводности наносuspензий (Адрес: 630092, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: vasya.shch.a@mail.ru).

**Shcherbashina Anastasia Vasil'evna** (b. 1999) – student of Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on metal oxide sol-gel synthesis and nanofluids heat-transfer investigation. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: vasya.shch.a@mail.ru).

Статья поступила 29 мая 2019 г.  
Received May 29, 2019

## To Reference:

Koskin A.P., Popov A.S., Shcherbashina A.V. Razrabotka sostavov i issledovanie teploprovodnykh svoystv nanosuspensii s soderzhaniiem oksida tsinka [The composition development and the heat transfer investigation of zinc oxide nanofluids]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2019, no. 2 (43), pp. 7–15. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-7-15.