

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра радиотехники и электродинамики

наименование кафедры

**Теплофизические свойства наножидкостей**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

Студента (ки) 4 курса 4071 группы

направления 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств»  
код и наименование направления

Института физики

наименование факультета

Трухачева Сергея Дмитриевича

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

д.ф.- м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

И.А. Ермолаев

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

д.ф.- м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

О. Е. Глухова

инициалы, фамилия

Саратов 2021 г.

## **Введение.**

Современные проблемы энергетики и широкое распространение микро и нанотехнологий требуют миниатюризации систем охлаждения и разработки эффективных методов управления теплообменом. Одним из перспективных способов интенсификации процессов теплообмена является увеличение теплопроводности теплоносителя (жидкости) за счет добавления твердых частиц с высокой теплопроводностью. Однако многочисленные исследования показали, что использование частиц микрометрового размера не может привести к интенсификации, а, наоборот, к снижению теплопередачи из-за ослабления эффекта турбулентности. Кроме того, могут возникать нежелательные эффекты, такие как абразивный износ поверхности канала, осаждение частиц на стенке и в зонах стояния, а также увеличение гидравлического сопротивления. В этом отношении переход к нанометровым частицам оправдан и востребован. В настоящее время многочисленные исследовательские группы в разных странах активно изучают свойства наножидкостей, и в последнее время особенно увеличивается количество публикаций по наножидкостям. В частности, опубликовано множество статей, охватывающих широкий круг тем от локальных свойств наножидкостей до возможностей их практического применения.

**Цель данной работы** – изучить теплофизические свойства наножидкостей, зависимости этих свойств от состава и концентрации наноматериалов, провести обзор и сравнительный анализ.

Работа состоит из трех разделов.

**Первый раздел** посвящён изучению общих характеристик наножидкостей [1].

**Во втором разделе** были рассмотрены методы изготовления наножидкостей. В качестве базовой жидкости чаще всего используются вода, этиленгликоль и моторное масло. Материалами для наночастиц служат металлы, оксиды металлов, углерод.

Рассматривались одноэтапные процессы, такие как VEROS, и двухстадийные, в которых наночастицы в виде порошка диспергируют в исходную жидкость и методом ультразвукового или электромагнитного облучения распределяют в жидкости [2].

**В третьем разделе** рассматриваются теплофизические свойства наножидкостей, такие как теплопроводность [3]-[5], вязкость [7]-[9]. Изучаются зависимости числа Прандтля от концентрации и размерf наночастиц [10]-[16]и коэффициенты теплоотдачи [17]-[21].

На Рис. 1 - 5 приведены зависимости теплопроводности, вязкости, и числа Прандтля от объемной концентрации наночастиц. А так же изменение локального коэффициента теплоотдачи, при изменении расхода жидкости.

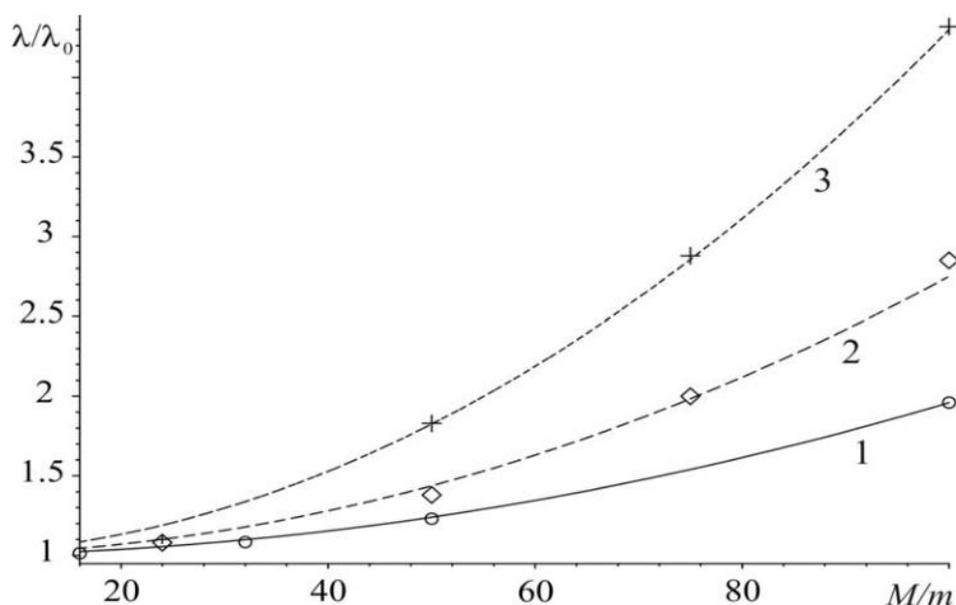


Рис.1 Зависимость относительного коэффициента теплопроводности от массы наночастиц при разных объемных концентрациях:

$$\phi = 0.12\% \text{ (метки } \circ \text{)}, \phi = 0.24\% \text{ (метки } \blacklozenge \text{)}, \phi = 0.48\% \text{ (метки } + \text{)}$$

Первым правильным моделированием коэффициента теплопроводности наножидкости была работа Кельвина Ли [5]. В ней было показано, что, теплопроводность наножидкости увеличивается с увеличением массы при фиксированном размере частиц и концентрации. Такая же зависимость, как и для относительного коэффициента теплопроводности была получена, для относительного коэффициента вязкости. Характерная зависимость безразмерного относительного коэффициента теплопроводности  $\lambda / \lambda_0$ , где  $\lambda_0$  - теплопроводность несущей жидкости, показана на рис.1. Здесь каждая кривая и соответствующие метки на рисунке построены при постоянном радиусе, поэтому зависимость от массы может быть сведена к зависимости от плотности материала наночастиц  $\rho_p$ . В отличие от коэффициента вязкости, который показан на рис. 2 и практически линейно зависит от отношения  $\rho_p/\rho$ , теплопроводность определяется соотношением  $(\lambda / \lambda_0) / \lambda_0 \sim (\rho_p/\rho)^2$ . Таким образом, высокие значения  $\lambda$ , которые наблюдались экспериментально при  $\phi \leq 1\%$ , могут быть связаны именно с высокой массовой плотностью наночастиц.

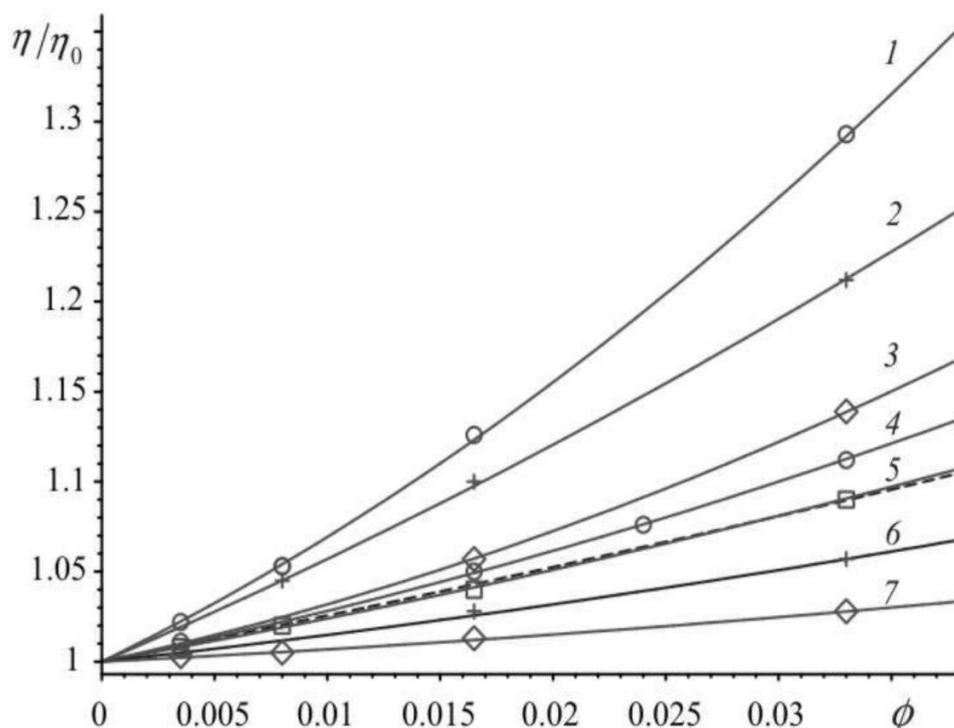


Рис. 2 Зависимость коэффициента вязкости наносuspензии от объёмной концентрации частиц при различных отношениях масс частицы и молекулы,  $R/r=3$ . Отношение радиусов наночастицы к радиусу молекулы исходной жидкости, Кривые 1-7 соответствуют

$$M/m = 500, 300, 150, 100, 50, 10, 0.5$$

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (150 nm)			TiO <sub>2</sub> (150 nm)			ZrO <sub>2</sub> (44 nm)			ZrO <sub>2</sub> (105 nm)		
$\phi$	$\lambda$	$\mu$	$\phi$	$\lambda$	$\mu$	$\phi$	$\lambda$	$\mu$	$\phi$	$\lambda$	$\mu$
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

Таблица 1. Зависимость коэффициентов вязкости и теплопроводности наножидкостей от объёмной концентрации наночастиц ( $\mu$  — коэффициент вязкости жидкости,  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности жидкости,  $\phi$  — объёмная концентрация наночастиц в жидкости)

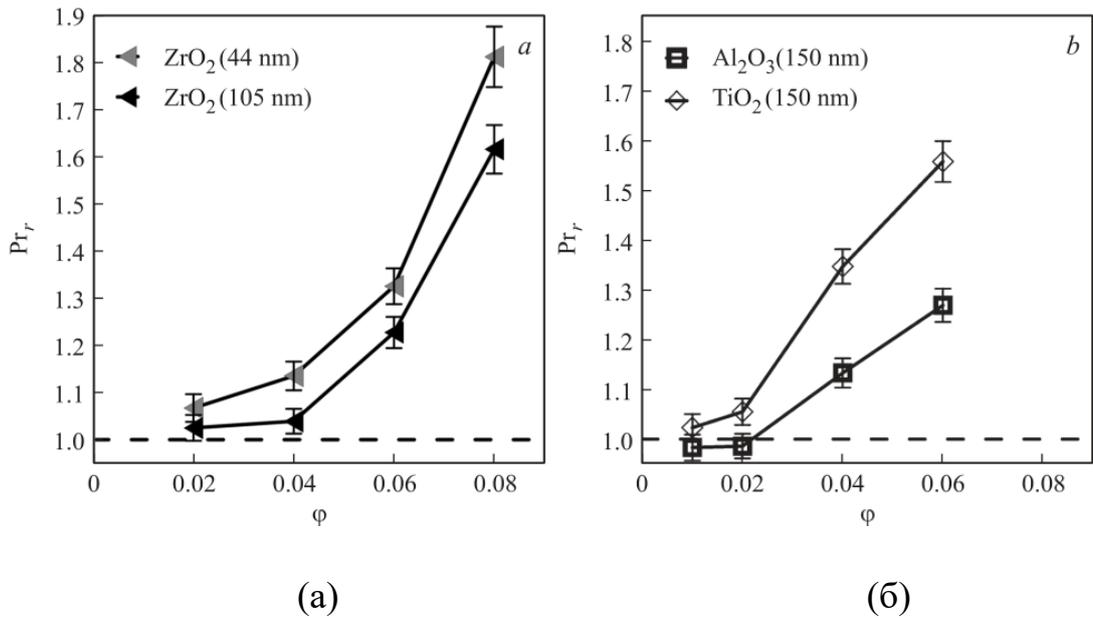


Рис. 3 Зависимость относительного числа Прандтля наножидкости на основе воды от концентрации частиц  $ZrO_2$  (а) и от концентрации частиц  $Al_2O_3$  и  $TiO_2$  (б)

Пример зависимости относительного числа Прандтля наножидкости от концентрации частиц в ней показан на рис. 3, а для наножидкости с частицами  $ZrO_2$ , число Прандтля наножидкости значительно увеличивается с увеличением концентрации частиц. Первая зависимость показана на рис. 7, а, вторая - на рис. 7, б, где показаны данные для наножидкостей на водной основе с частицами  $Al_2O_3$  и  $TiO_2$  в зависимости от их концентрации (Таблица 1) [10], при это размеры частиц были примерно одинаковыми в обоих случаях.

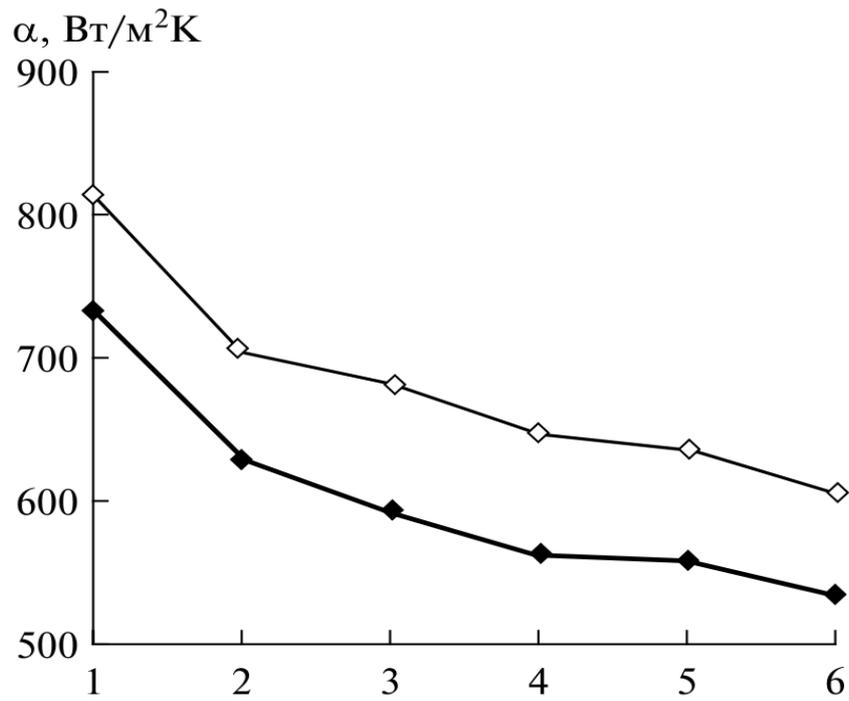


Рис. 4 Изменение локального коэффициента теплоотдачи вдоль канала при расходе жидкости 104 г/мин. Верхний график показывает теплоотдачу жидкости с добавлением наночастиц (метки  $\diamond$ ), нижний – теплоотдачу исходной жидкости (метки  $\blacklozenge$ ).

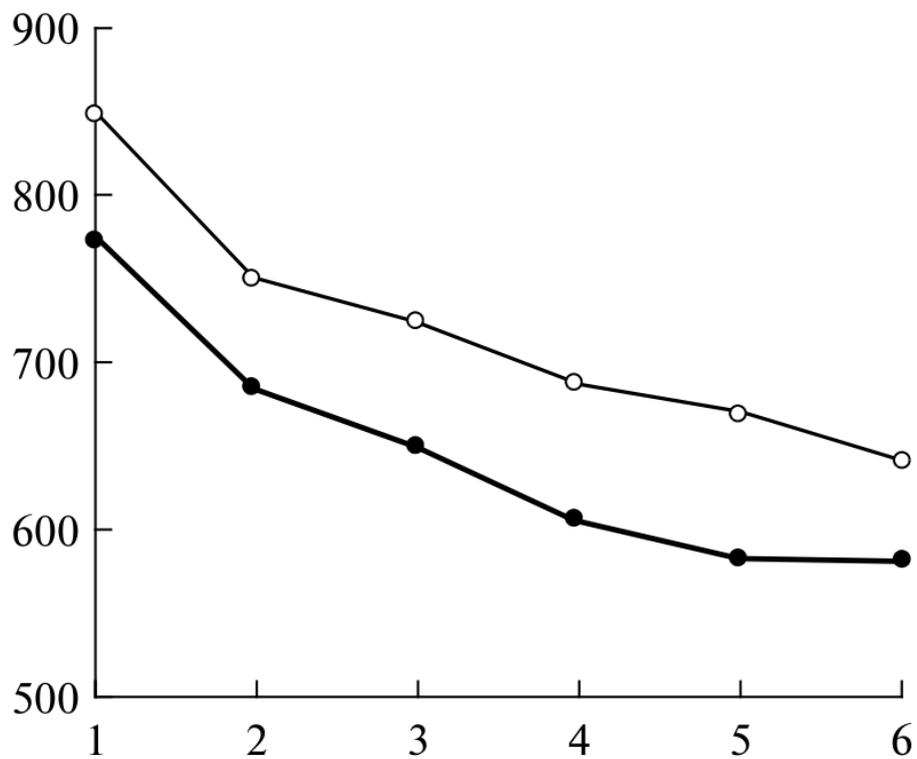


Рис. 5 Изменение локального коэффициента теплоотдачи вдоль канала при расходе жидкости 193 г/мин. Верхний график показывает теплоотдачу жидкости с добавлением наночастиц (метки ○), нижний – теплоотдачу исходной жидкости (метки ●).

Измерения показали, что добавление наночастиц значительно увеличивает как локальный, так и средний коэффициент теплопередачи жидкости. Сравнение изменения коэффициента теплопередачи наножидкости и воды вдоль канала при двух разных расходах теплоносителя показано на рис.4 и рис.5. Концентрация частиц в наножидкости составляла 2%. В первом случае (рис. 4) расход составлял 104 г/мин, во втором (рис. 5) он был почти вдвое выше и составлял 193 г/мин. Здесь вода соответствует нижним отметкам, а наножидкости - верхним; номер термопары отложен по горизонтальной оси от начала нагреваемого участка. В обоих случаях использование наножидкости может усилить локальную теплопередачу по всей длине воздуховода более чем на 10%.

### **Заключение**

Таким образом, в работе были рассмотрены методы изготовления наножидкостей, зависимости теплофизических свойств наножидкостей от ряда параметров. Изучена зависимость числа Прандтля от объемной концентрации и размеров наночастиц. А также показан эффект усиления теплоотдачи при использовании наножидкости.

## Список литературы

1. Морозова М.А. // Теплопроводность и вязкость наножидкости. 2019. Новосибирск. с.8-16, с.64-92.2.
2. В.И. Терехов, С.В. Калинина, В.В. Леманов // Теплофизика и аэромеханика, 2010, том 17, № 1, 3-4
3. Wang X., Xu X., Choi S.U.S. Thermal conductivity of nanoparticle–fluid mixture // J. Thermophys. Heat Trans., 1999, 13(4), 474–480..
4. Keblinski P., Prasher R., Eapen J. Thermal conductance of nanofluids: is the controversy over? // J. Nanopart. Res., 2008, 10, 1089–1097.
5. Calvin H. Li, G. P. Peterson .Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids) Journal of Applied Physics **99**.2006. №. 8. С. 081214
6. Kwak K., Kim C. Viscosity and thermal conductivity of copper oxide nanofluids dis-persed in ethylene glycol // Korea-Australia Rheology J., 2005, 17(2), 35–40
7. Рудяк В.Я., Белкин А.А., Егоров В.В. Об эффективной вязкости наносuspензий // ЖТФ, 2009, 79(8), 18–25.
8. Van der Werff J.C., De Kruif C.B., Blom C., Mellema J. Linear viscoelastic behaviour of dense hard-sphere dispersions // Phys. Rev. A, 1989, 13, 795–807.
9. Papir Y.S., Krieger I.M. Rheological studies of dispersions of uniform colloidal spheres // J. Colloid Interface Sci., 1970, 34, 126–130
10. В.Я. Рудяк , А.В. Минаков , М.И. Пряжников // Письма в ЖТФ, 2016, том 42, вып. 24

11. Timofeeva E.V. et al. // Nanotechnology. 2010. V. 21. N 21. P. 215703.
12. Zhu H.T., Zhang C.Y., Tang Y.M., Wang J.X. // J. Phys. Chem. C. 2007. V. 111.P. 1646–1650.
13. Koblinski P., Prasher R., Eapen J. // J. Nanopartarticles Res. 2008. V. 10. P. 1089–1097.
14. Рудяк В.Я., Белкин А.А. // Наносистемы: Физика, Химия, Математика. 2010. Т. 1. № 1. с. 156–177.
15. Wang X.-Q., Mujumdar A.S. // Int. J. Thermal Sci. 2007. V. 46. P. 1-19.17
16. Терехов В.И., Калинина С.В., Леманов В.В. Механизм теплопереноса в наножидкостях: современное состояние проблемы. Ч. 2. Конвективный теплообмен // Теплофизика и аэромеханика. 2010.№ 2. С. 173.
17. А. В. Минаков, В. Я. Рудяк, Д. В. Гузей, А. С. Лобасов, Измерение коэффициента теплоотдачи наножидкости на основе воды и частиц оксида меди, ТВТ,2015, том 53, выпуск 2, 256–263
18. Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. М.: Энергия, 1967.
19. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен. М.: Изд-во МЭИ, 2005.
20. Lee S., Choi S.U.S., Li S., Eastman J.A. Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles // J. Heat Transfer. 1999. V. 121. P. 280.
21. Das S.K., Putra N., Theisen P., Roetzel W. Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids // J. Heat Transfer. 2003. V. 125. P. 567.