

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Е. Н. Туголуков, А. Дж. Аль-Шариф,
Т. П. Дьячкова, Е. А. Буракова

*Кафедра «Техника и технологии производства нанопродуктов»,
tugolukov.en@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: концентрация; наномодификатор; теплопроводность жидкости; углеродные нанотрубки.

Аннотация: Дано описание способа получения наномодификатора, представляющего собой функционализированные углеродные нанотрубки серии Таунит, позволяющего повысить теплопроводность воды, как распространенного теплоносителя. Приведены схема экспериментальной установки для измерения теплопроводности жидкостей, методики выполнения измерений и обработки их результатов. Представлены результаты исследования влияния концентрации наномодификатора на теплопроводность воды. Установлен экстремальный характер полученной зависимости.

Интенсификация процессов теплопередачи в теплообменном оборудовании была и остается актуальной инженерной задачей. Одним из путей решения данной задачи являются мероприятия, направленные на повышение значений коэффициентов конвективной теплоотдачи, лимитирующих процесс теплопередачи в целом. При отсутствии фазовых переходов в теплоносителе, коэффициент теплоотдачи в значительной степени зависит от теплопроводности теплоносителя, которая определяет термическое сопротивление теплового пограничного слоя.

В ряде современных публикаций приведены результаты исследований, посвященных изменению теплофизических характеристик типовых теплоносителей при диспергировании в них наноразмерных металлических или неметаллических частиц [1 – 4]. Встречаются данные о 40 – 50%-м увеличении теплопроводности жидкостей при их наномодифицировании.

В статье рассмотрены предварительные результаты исследования влияния наномодификатора, представляющего собой функционализированные углеродные нанотрубки (УНТ) серии Таунит, на теплопроводность воды. Процессы получения УНТ серии Таунит приведены во многих работах, в том числе [5]. Цель предварительного этапа исследований – обоснование целесообразности (или выяснение бесперспективности) проведения полномасштабных исследований интенсификации процессов теплоотдачи путем наномодифицирования типовых теплоносителей, используемых в теплообменных процессах.

Требованием к наномодификатору на основе УНТ для жидких теплоносителей является возможность достижения равномерного распределения УНТ в объеме жидкости, сохраняющегося длительное время при отсутствии коагуляции и осаждении дисперсной фазы. Такими свойствами обладают УНТ, функционализированные кислородсодержащими группами, причем способы окисления и степень функционализации УНТ могут быть различны [6].

Наномодификатор, соответствующий предъявляемым требованиям, изготовлен сотрудником кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов» ТГТУ кандидатом химических наук Мележиком А. В. на основании известного способа химического окисления УНТ гипохлоритом натрия [7, 8].

Исходными компонентами являются: УНТ Таунит-М в водной пасте, содержащей 6,28 % масс. УНТ; раствор гипохлорита натрия с содержанием активного хлора 39,66 г/л при комнатной температуре; карбонат натрия. Массовое соотношение УНТ, карбоната натрия и активного хлора при окислении нанотрубок составляет 1 : 1 : 1,5.

Отдельно приготовленный водный раствор, содержащий карбонат натрия и гипохлорит натрия в стехиометрических соотношениях добавляется к пасте УНТ при тщательном перемешивании, после чего полученная суспензия выдерживается не менее двух суток до загустения. Затем реакционную смесь нейтрализуют, для чего в нее медленно при перемешивании добавляется 3,75 М серной кислоты в объеме, составляющем 10 % объема суспензии. Полученный продукт промывают на фильтре дистиллированной водой до достижения нейтрального pH, после чего высушивают до постоянной массы при 110 °С.

Окислению данным способом подвергались УНТ Таунит-М двух производственных партий, полученных в тарельчатом реакторе CVD-синтеза периодического действия при длительности роста нанотрубок на катализаторе порядка 40 и 5 минут. Углеродные нанотрубки данных производственных партий, функционализированные представленным выше способом, маркированы как ф-УНТ-1 и ф-УНТ-2 соответственно.

Измерение теплопроводности жидкостей – достаточно специфическая задача. Предлагаемое производителями сертифицированное измерительное оборудование, обеспечивающее высокую точность измерений, является сложным и дорогим. В связи с этим в настоящее время продолжается разработка экспериментальных методик определения теплопроводности жидкостей, в том числе наномодифицированных. Достаточно широко используется метод нагреваемой нити [9].

В нашем случае на этапе предварительных исследований не требуется повышенная точность измерения теплопроводности, поэтому предлагаются относительно простая экспериментальная установка (рис. 1), и упрощенная методика измерений.

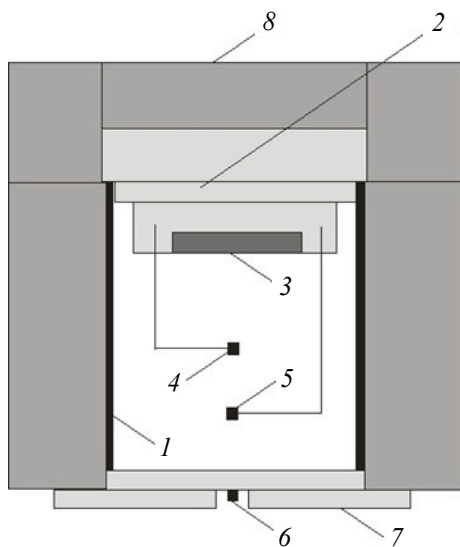


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка для измерения теплопроводности жидкостей представляет собой стакан 1, изготовленный из материала с низкой теплопроводностью, на который устанавливается съемный модуль 2. В модуле 2 размещены нагреватель 3 и крепления температурных датчиков 4 и 5, расположенных по оси стакана 1 на фиксированном расстоянии друг от друга. Еще один температурный датчик 6 установлен на охлаждаемом металлическом основании 7. Боковая и верхняя поверхности установки имеют теплоизоляционное покрытие 8. Расположение температурных датчиков 4 и 5 исключает влияние возможных конвективных процессов вблизи нагревателя и охлаждаемого основания на результаты измерений.

Компьютерный интерфейс установки позволяет задавать тепловую мощность нагревателя в интервале 0...1 Вт, включать нагрев и записывать в текстовый файл температурные показания датчиков 4, 5 и 6 с заданной периодичностью.

Данная экспериментальная установка изготовлена инженером Н. А. Барымовым с учетом рекомендаций авторов статьи. Им же разработаны измерительная схема и компьютерный интерфейс.

Методика измерения теплопроводности жидкости на данной экспериментальной установке заключается в следующем. Стакан 1 заполняется дистиллированной водой комнатной температуры в количестве, обеспечивающем погружение нагревателя 3 в жидкость при установке съемного модуля 2. Задается значение тепловой мощности нагревателя и интервал записи показаний измеряемых температур в файл, после чего включается нагреватель. При этом автоматически включается охлаждение основания 7. Прогрев осуществляется до достижения стационарного температурного поля в жидкости, то есть до стабилизации показаний всех температурных датчиков во времени (как правило, от 4 до 5 часов с момента включения нагревателя), после чего нагрев выключается, и файл с записанными показаниями температурных датчиков сохраняется с уникальным именем. Далее дистиллированная вода из стакана 1 удаляется, стакан и съемный модуль высушиваются.

Затем стакан 1 заполняется исследуемой жидкостью комнатной температуры в объеме, соответствующем объему использованной дистиллированной воды. Задаются та же тепловая мощность нагревателя и тот же интервал записи измеряемых температур в файл. Включается нагрев. После достижения стационарного температурного поля в жидкости нагрев прекращается, и файл с записанными показаниями температурных датчиков сохраняется с соответствующим уникальным именем. Исследуемая жидкость удаляется из стакана 1, стакан и съемный модуль промываются и высушиваются.

Экспериментальные данные обрабатывались следующим образом.

Пусть P – заданная мощность нагревателя, Вт; d – расстояние между центрами температурных датчиков 4 и 5, м; t_{4v} , t_{5v} – установившиеся значения температур, измеренных датчиками 4 и 5 соответственно, при измерении температуры дистиллированной воды, °С; t_4 , t_5 – установившиеся значения температур, измеренных датчиками 4 и 5 соответственно, при измерении температуры исследуемой жидкости, °С.

Тогда мощность тепловых потерь Q_l , Вт, через теплоизоляцию боковой и верхней поверхностей установки определяется как разность тепловых мощностей нагревателя и теплового потока через слой жидкости от нагревателя к охлаждаемому основанию

$$Q_l = P - \lambda_v \frac{t_{4v} - t_{5v}}{d},$$

где λ_v – теплопроводность воды, Вт/(м К), при температуре t_v , °С

$$t_v = \frac{t_{4v} + t_{5v}}{2}.$$

Расчетная теплопроводность λ , Вт/(м К), исследуемой жидкости при температуре t , °С:

$$\lambda = \frac{d(P - Q_l)}{t_4 - t_5} = \lambda_v \frac{t_{4v} - t_{5v}}{t_4 - t_5};$$

$$t = \frac{t_4 + t_5}{2}.$$

Результаты экспериментальных исследований приведены в табл. 1. Каждое измерение выполнялось не менее двух раз, причем воспроизводимость результатов исследований оказалась высокой (в пределах погрешностей измерения температур – порядка 0,1 °С).

Наибольший интерес вызывает полученное увеличение теплопроводности дистиллированной воды при внесении 0,05 % масс. добавки ф-УНТ-2, составляющее 11,6 %. Такое повышение теплопроводности воды позволяет предварительно прогнозировать увеличение коэффициента конвективной теплоотдачи в теплообменном оборудовании порядка 6 % при турбулентном и порядка 7 % при ламинарном режимах движения теплоносителя.

Повышение теплопроводности воды, наблюдаемое при увеличении массовой концентрации добавки ф-УНТ-1 на данном этапе исследований не представляет интереса, так как использование высоких концентраций наномодификаторов экономически не обосновано и, кроме того, ведет к снижению агрегативно-седиментационной стабильности состава во времени.

Данные результаты обосновывают целесообразность проведения дальнейших исследований по повышению теплопроводности жидких теплоносителей и интенсификации процессов теплоотдачи при использовании других наномодификаторов на основе УНТ Таунит.

Экстремальный характер изменения теплопроводности воды при увеличении концентрации наномодификатора ф-УНТ-1 указывает на склонность наночастиц, входящих в его состав, к агрегации в водной среде. Теплоносители должны

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований влияния концентрации наномодификаторов на теплопроводность воды

Наномодификатор	Концентрация, % масс.	Температура t , °С	$\Delta t = t_4 - t_5$, °С	Расчетная теплопроводность λ , Вт/(м К)	Повышение теплопроводности, %
ф-УНТ-1	0,01	39,2	6,44	0,65	3,0
	0,02	35,8	6,37	0,65	4,1
	0,03	35,5	6,31	0,66	5,1
	0,05	39,4	5,94	0,71	11,6
	0,07	34,8	6,19	0,67	7,1
	0,1	37,4	6,25	0,67	6,1
ф-УНТ-2	0,01	38,5	6,31	0,66	5,1
	0,05	37,6	6,31	0,66	5,1
	0,1	37,9	6,19	0,68	7,1

эксплуатироваться длительное время без изменения теплофизических характеристик. Методы механоактивации и ультразвукового воздействия, обеспечивающие более равномерное начальное распределение частиц наномодификатора в объеме жидкости, не позволяют получить пролонгированный эффект. Снижение склонности к агрегации наночастиц в водной среде может быть достигнуто использованием поверхностно-активных веществ. При этом возможно получение стабильных во времени систем с более высокими концентрациями наномодификаторов. Авторы считают данное направление экспериментальных исследований весьма перспективным.

Список литературы

1. Xing, M. Experimental Study on the Thermal Conductivity Enhancement of Water Based Nano Fluids Using Different Types of Carbon Nanotubes / M. Xing, J. Yu, R. Wang // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2015. – Vol. 88. – P. 609 – 616.
2. Anoop, K. Thermal Evaluation of Nano Fluids in Heat Exchangers / K. Anoop, J. Cox, R. Sadr // *Int. Commun. Heat Mass Transfer*. – 2013. – Vol. 49. – P. 5 – 9.
3. Effect of PEG Functionalized Carbon Nanotubes on the Enhancement of Thermal and Physical Properties of Nanofluids / A. D. Manasrah [et. al.] // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2017. – Vol. 84. – P. 231 – 241. doi: 10.1016/J.EXPTHERMFLUSCI.2017.02.018
4. Enhanced Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Carbon Nanotubes Ionanofluids / C. N. De Castro [et. al.] // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2012. – Vol. 62. – P. 34 – 39.
5. Совершенствование процессов и аппаратурного оформления синтеза углеродных наноматериалов «Таунит» / А. А. Аладинский [и др.] // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2014. – Т. 20, № 3. – С. 572 – 578.
6. Окисление многослойных углеродных нанотрубок в парах перекиси водорода: закономерности и эффекты / Т. П. Дьячкова [и др.] // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2016. – Т. 22, № 2. – С. 323 – 333. doi: 10.17277/vestnik.2016.02.pp.323-333
7. Abdolkarimi-Mahabadi, A. Chemical Oxidation of Multi-Walled Carbon Nanotube by Sodium Hypochlorite for Production of Graphene Oxide Nanosheets / A. Abdolkarimi-Mahabadi, M. Manteghian // *Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures*. – 2015. – Vol. 23, No. 10. – P. 860 – 864.
8. Assessment of Adequate Sodium Hypochlorite Concentration for Pre-Oxidization of Multi-Walled Carbon Nanotubes / J.-C. Yang [et. al.] // *J. Chem. Technol. Biotechnol.* – 2010. – Vol. 85. – P. 699 – 707.
9. Разработка и тестирование экспериментальной методики определения коэффициента теплопроводности наножидкостей / М. И. Пряжников [и др.] // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. – 2015. – Т. 8, № 2. – С. 153 – 165.

Investigation of the Thermal Conductivity of Nanomodified Liquids

E. N. Tugolukov, A. J. Al-Sharif, T. P. Dyachkova, E. A. Burakova

*Department of Equipment and Production Technology of Nanoproducts,
tugolukov.en@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: nanomodifier; concentration; thermal conductivity of a liquid; carbon nanotubes.

Abstract: A description is given of a method for producing a nanomodifier, which is a functionalized carbon nanotube of the Taunit series, which makes it possible to increase the thermal conductivity of water as a common coolant. The experimental setup for measuring the thermal conductivity of liquids, the methods for performing measurements and processing the measurement results are presented. The results of the study of the influence of the concentration of nanomodifier on the thermal conductivity of water are presented. The extreme nature of the obtained dependence is established.

References

1. Xing M., Yu J., Wang R. Experimental Study on the Thermal Conductivity Enhancement of Water Based Nano Fluids Using Different Types of Carbon Nanotubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 88, pp. 609-616.

2. Anoop K., Cox J., Sadr R. Thermal Evaluation of Nano Fluids in Heat Exchangers, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 2013, vol. 49, pp. 5-9.

3. Manasrah A.D., Laoui T., Zaidi S.J., Atieh M.A. Effect of PEG functionalized carbon nanotubes on the enhancement of thermal and physical properties of nanofluids, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, vol. 84, pp. 231-241, doi: 10.1016/J.EXPTHERMFLUSCI.2017.02.018

4. De Castro C.N., Murshed S.S., Lourenço M.J.V., Santos F.J.V., Lopes M.L.M., França J.M.P. Enhanced Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Carbon Nanotubes Ionanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, 2012, vol. 62, pp. 34-39.

5. Aladinskiy A.A., Rukhov A.V., Tugolukov Ye.N., D'yachkova T.P. [Improving the processes and instrumentation of the synthesis of Taunit carbon nanomaterials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 3, pp. 572-578. (In Russ., abstract in Eng.)

6. D'yachkova T.P., Khan Yu.A., Orlova N.V., Kondrashov S.V. [Oxidation of multilayer carbon nanotubes in hydrogen peroxide vapor: patterns and effects], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 2, pp. 323-333, doi: 10.17277/vestnik.2016.02.pp.323-333 (In Russ., abstract in Eng.)

7. Abdolkarimi-Mahabadi A., Manteghian M. Chemical Oxidation of Multi-Walled Carbon Nanotube by Sodium Hypochlorite for Production of Graphene Oxide Nanosheets, *Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 2015, vol. 23, no. 10, pp. 860-864.

8. Yang J.-C., Yen C.-H., Wang W.-J., Horng J.-J., Tsai Y. Assessment of Adequate Sodium Hypochlorite Concentration for Pre-Oxidization of Multi-Walled Carbon Nanotubes, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 2010, vol. 85, pp. 699-707.

9. Pryazhnikov M.I., Gusev D.V., Minakov A.V., Lobasov A.S. Development and Testing of Experimental Methods Definition of Thermal Conductivity of Nanofluids, *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2015, vol. 8, no. 2, pp. 153-165. (In Russ., abstract in Eng.)

Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit der nanomodifizierten Flüssigkeiten

Zusammenfassung: Es ist ein Verfahren zur Herstellung des Nanomodifikators beschrieben, bei dem es sich um funktionalisierte Kohlenstoffnanoröhre der Taunit-Serie handelt, mit dem die Wärmeleitfähigkeit von Wasser als üblichem Kühlmittel

erhöht werden kann. Das Schema der experimentellen Anlage zur Messung der Wärmeleitfähigkeit von Flüssigkeiten, Messverfahren und Verarbeitung von Messergebnissen sind angeführt. Die Ergebnisse der Untersuchung des Einflusses der Nanomodifikatorkonzentration auf die Wärmeleitfähigkeit von Wasser sind vorgestellt. Es ist der extreme Charakter der erhaltenen Abhängigkeit festgestellt.

Étude de la conductivité thermique des fluides nanomodifiés

Résumé: Est donnée une description de la méthode de production d'un nanomodificateur, qui présente des nanotubes de carbone fonctionnalisés de la série taunit, permettant d'augmenter la conductivité thermique de l'eau en tant que fluide caloporteur commun. Sont présentés un schéma de l'installation pilote pour la mesure de la conductivité thermique des liquides, les méthodes de la mesure et de l'étude des résultats des mesures. Sont présentés les résultats de l'étude de l'influence de la concentration du nanomodificateur sur la conductivité thermique de l'eau. Est établie la nature extrême de la dépendance résultante.

Авторы: *Туголуков Евгений Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов»; *Аль-Шариф Али Джалаль* – аспирант кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов»; *Дьячкова Татьяна Петровна* – доктор химических наук, доцент, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов»; *Буракова Елена Анатольевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Карпушкин Сергей Викторович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.