

06.1

Наножидкости на основе углеродных наноматериалов для коллекторов прямого сбора солнечной энергии

© М.А. Морозова, А.В. Зайковский

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mail: morozova.itp@gmail.com

Поступило в Редакцию 15 февраля 2024 г.

В окончательной редакции 27 марта 2024 г.

Принято к публикации 28 марта 2024 г.

Приведены результаты экспериментального исследования наножидкостей на основе различных углеродных наноматериалов (углеродные наночастицы, углеродные нанотрубки и графеновые наночастицы) для применения в солнечных коллекторах прямого поглощения солнечного излучения. Анализ оптических свойств показал, что исследованные наножидкости являются эффективными абсорберами солнечного света. Наножидкость на основе углеродных наночастиц в сравнении с другими наножидкостями показала наибольшую способность поглощения света, наибольшее значение теплопроводности и низкую вязкость, что делает ее наиболее перспективной для использования в качестве рабочей жидкости в солнечных коллекторах.

Ключевые слова: наножидкости, углеродные наночастицы, углеродные нанотрубки, графен, солнечные коллекторы.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.13.58168.19895

Использование солнечной энергии является одним из основных подходов в „зеленой“ энергетике. В этом направлении большой интерес вызывают солнечные коллекторы прямого поглощения (DASC), в которых солнечная энергия захватывается, превращается в тепло и транспортируется в жидкостях-теплоносителях [1]. При этом в качестве базовой жидкости могут быть использованы вода, этиленгликоль, парафины или масла. Добавление наночастиц к базовой жидкости позволяет менять и настраивать свойства получаемой наножидкости. Большое внимание привлекают наножидкости на основе углеродных наноструктур из-за их способности эффективно поглощать энергию светового излучения. Наножидкости на основе углеродных наночастиц, многостенных углеродных нанотрубок, графена или оксида графена показывают увеличение эффективности системы DASC, увеличение теплопроводности и достижение больших температур при воздействии света, несмотря на увеличение вязкости исследуемой наножидкости [2–5]. Существует большое количество исследований, посвященных наножидкостям на основе различных углеродных наноструктур, однако прямого экспериментального сравнения наножидкостей с разными видами углеродных наноматериалов на данный момент практически не существует. В настоящей работе приводятся результаты исследований наножидкостей на основе углеродных наноматериалов, в качестве которых были выбраны сферические углеродные наночастицы, многостенные углеродные нанотрубки и графеновые хлопья.

Для получения углеродных наноматериалов был использован электродуговой реактор, в основе работы которого лежит конгруэнтное испарение композитного

электрода электродуговым разрядом, в результате чего образуется гетерогенная газоплазменная система, расширяющаяся в камере реактора. Перемешивание с буферным газом, охлаждение смеси и взаимодействие компонентов между собой приводят к возможному протеканию химических реакций, конденсации паров в кластеры, зародыши наночастиц, которые затем вырастают в наночастицы определенных размеров. Сформированный материал осаждается из газовой фазы на экране сбора продуктов синтеза. В настоящей работе для производства сферических углеродных наночастиц (CNP) использовался сплошной графитовый распыляемый электрод с диаметром 8 мм и длиной 80 мм. В качестве буферного газа был использован гелий при давлении 3 Torr. Сила тока электродугового разряда составляла 100 А. Анализ изображений просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) показал, что полученные углеродные наночастицы имеют приблизительно круглую форму и объединены в скопления цепочек (рис. 1, *a*) [5]. Статистическая обработка показала, что средний диаметр частиц составляет 14 нм.

Графеновые хлопья (графен) были получены также с использованием электродугового реактора, в котором распылялся композитный электрод, состоящий из графитового стержня с порошком кремния. В качестве буферного газа был использован гелий под давлением 12 Torr. Сила тока составляла 100 А. Как показали наши предыдущие эксперименты, такая постановка приводит к формированию многослойных графеновых хлопьев [6]. Полученные хлопья имеют средний латеральный размер 50 нм, а количество листов может составлять от 1 до 7 (рис. 1, *b*). Также были использованы коммерческие многостенные углеродные нанотрубки (CNT) (Kaina Carbon

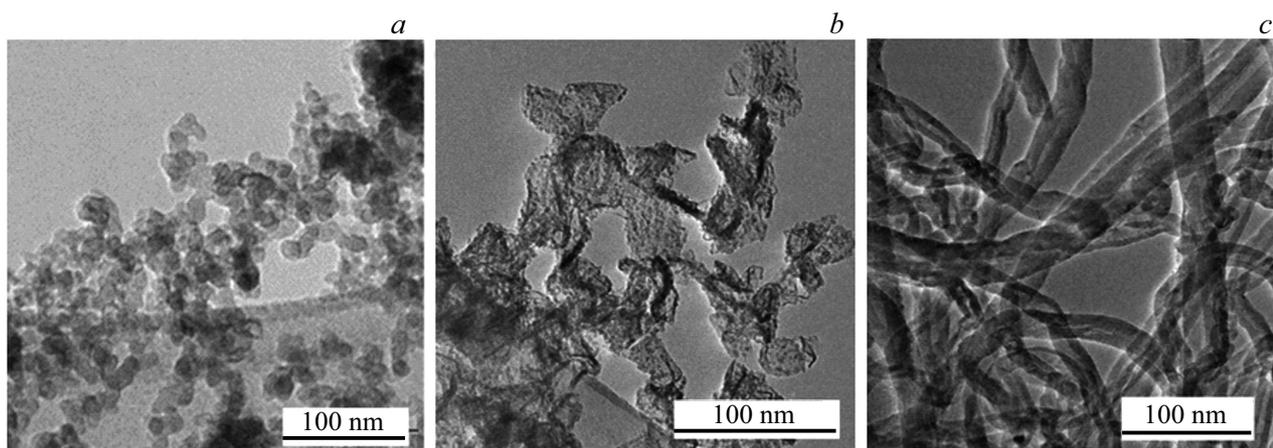


Рис. 1. ПЭМ-изображения углеродных наночастиц (a), графеновых хлопьев (b) и многостенных углеродных нанотрубок (c).

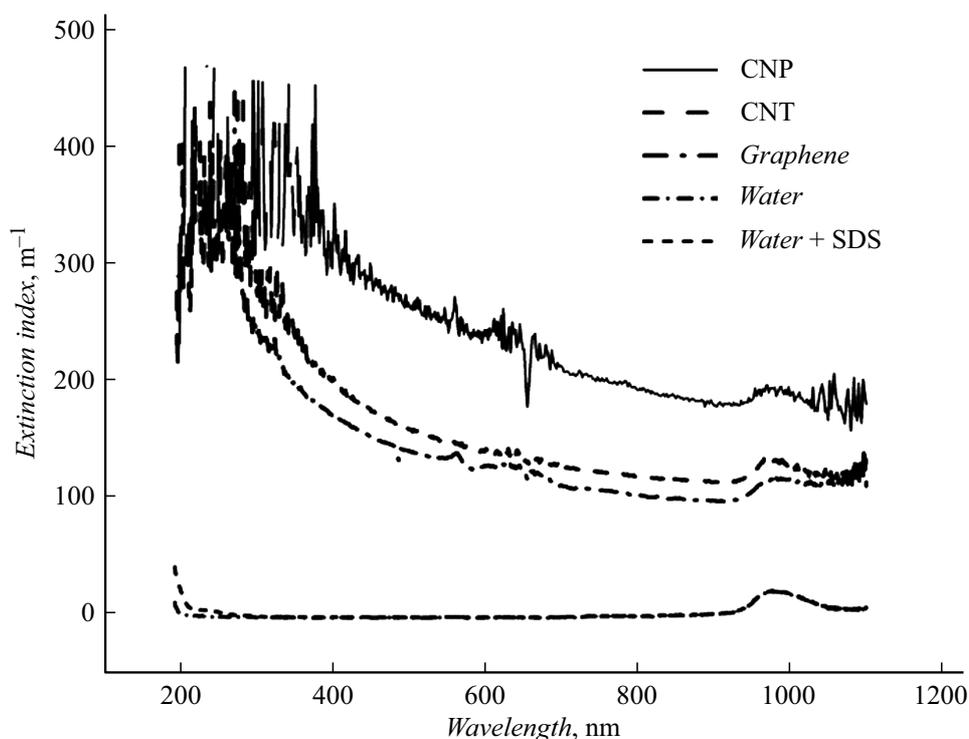


Рис. 2. Спектры индекса экстинкции наножидкостей.

New Material Co, Ltd, Китай), средний диаметр которых составляет 30 nm (рис. 1, c).

Наножидкости были приготовлены методом стабилизации полученных наночастиц в базовой жидкости. В качестве базовой жидкости в настоящей работе использовалась сверхчистая вода, полученная при помощи системы очистки воды Millipore Direct-Q3 UV. Для стабилизации углеродных материалов во все образцы было добавлено поверхностно-активное вещество додецилсульфат натрия (SDS) (Helicon, Россия) в массовой концентрации 1%. Массовая концентрация углеродного материала в каждом образце составляла

0.01%. Смесь воды, поверхностно-активного вещества и углеродных наночастиц обрабатывалась в ультразвуковой ванне Stegler 6DT (частота 40 kHz, мощность 180 W) в течение 3 h. Данный метод приводит к разбиванию агломератов углеродных структур и стабилизации их в объеме базовой жидкости [7].

Спектры пропускания приготовленных наножидкостей исследовались с использованием спектрометра СФ-2000 (ОКБ Спектр, Россия) в диапазоне длин волн 190–1100 nm. Полученные данные позволили получить спектры индекса экстинкции наножидкостей (рис. 2, a) и вычислить удельную мощность солнечного излучения,

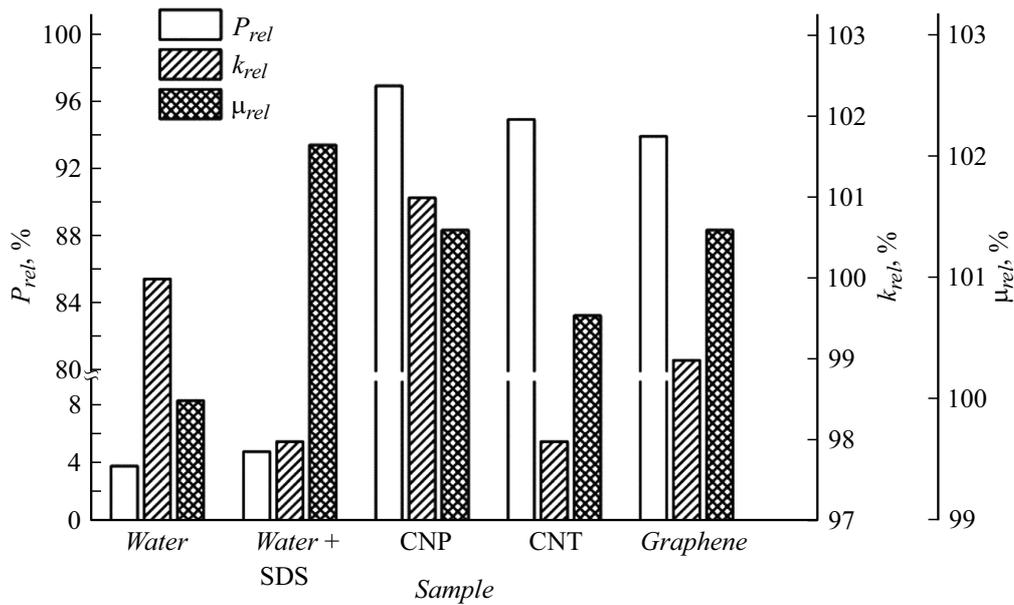


Рис. 3. Относительные величины мощности поглощаемого света (P_{rel}), коэффициента теплопроводности ($k_{rel} = k_{nf}/k_{water}$) и вязкости ($\mu_{rel} = \mu_{nf}/\mu_{water}$) исследуемых наножидкостей (nf).

поглощаемую слоем наножидкости, используя следующую формулу:

$$P = \int_{\Lambda} I_{solar}(\lambda)(1 - e^{-k(\lambda)x})d\lambda,$$

где $I_{solar}(\lambda)$ — интенсивность солнечного спектра на длине волны λ [8], Λ — спектральный диапазон исследования, $k(\lambda)$ — индекс экстинкции наножидкости, x — толщина слоя наножидкости, который принимался равным 25 mm, что примерно соответствует диаметру трубок в распространенных коммерческих солнечных коллекторах.

Мощность солнечного излучения на поверхности Земли в диапазоне длин волн 190–1100 nm оценивается в 772 W/m² [8]. По расчетам вода в данной системе сможет поглотить 29 W/m², а вода с SDS — 37 W/m². Исследуемые наножидкости с углеродными наноструктурами имеют близкие значения поглощенной энергии, однако наибольшее значение 750 W/m² показывает наножидкость на основе сферических углеродных наночастиц, в то время как наножидкости на основе многостенных углеродных нанотрубок и графеновых хлопьев имеют значения 732 и 723 W/m² соответственно.

Измерения теплопроводности наножидкостей проведены нестационарным методом нагретой проволоки при помощи прибора, описанного в работе [9]. Измерения вязкости выполнены на ротационном вискозиметре Fungilab Expert L. На рис. 3 представлено обобщение экспериментальных результатов исследования относительной удельной мощности поглощенной энергии, теплопроводности и вязкости для наножидкостей на основе углеродных наночастиц, графеновых наночастиц и угле-

родных нанотрубок. Для сравнения приведены результаты для воды и раствора воды с массовым содержанием SDS 1%. Несмотря на то что SDS является одним из наиболее распространенных стабилизаторов углеродных наночастиц в наножидкостях на основе воды [10], его использование приводит к снижению значения теплопроводности воды и увеличению вязкости. Наножидкость на основе CNP показала максимальную среди исследуемых наножидкостей удельную мощность поглощенной энергии и теплопроводность при относительной вязкости ниже, чем у раствора воды и SDS. Наножидкость на основе CNT способна поглощать большее количество солнечной энергии и обладает меньшей вязкостью, чем наножидкость на основе графена, однако значение ее теплопроводности меньше, чем у других исследуемых наножидкостей, и не превосходит значения теплопроводности для раствора воды и SDS. Сравнение полученных результатов указывает на то, что наножидкость на основе углеродных наночастиц обладает наиболее подходящими характеристиками для использования в DASC.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00139 (<https://rscf.ru/project/22-79-00139/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Hussain, S.K.H. Shah, U. Sajjad, N. Abbas, A. Ali, *Energies*, **15** (19), 7101 (2022). DOI: 10.3390/en15197101
- [2] S.P. Yu, T.P. Teng, C.C. Huang, H.K. Hsieh, Y.J. Wei, *Energies*, **16** (3), 1157 (2023). DOI: 10.3390/en16031157
- [3] B. Sun, X. Xu, D. Yang, H. Li, *Appl. Therm. Eng.*, **230**, 120786 (2023). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120786
- [4] Z. Li, A. Kan, K. Wang, Y. He, N. Zheng, W. Yu, *Appl. Therm. Eng.*, **203**, 117948 (2022). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117948
- [5] A.V. Zaikovskii, S.A. Novopashin, *Phys. Status Solidi A*, **214** (10), 1700142 (2017). DOI: 10.1002/pssa.201700142
- [6] D.V. Smovzh, I.A. Kostogrud, S.Z. Sakhapov, A.V. Zaikovskii, S.A. Novopashin, *Carbon*, **112**, 97 (2017). DOI: 10.1016/j.carbon.2016.10.094
- [7] M.A. Morozova, A.A. Osipov, E.A. Maksimovskiy, A.V. Zaikovskii, *E3S Web Conf.*, **459**, 08005 (2023). DOI: 10.1051/e3sconf/202345908005
- [8] *Standard solar constant and zero air mass solar spectral irradiance tables*, ASTM standard E490-00, 2006a (ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006).
- [9] P.V. Skripov, A.A. Smotritskiy, A.A. Starostin, A.V. Shishkin, *J. Eng. Thermophys.*, **16** (3), 155 (2007). DOI: 10.1134/S1810232807030071
- [10] A.O. Borode, N.A. Ahmed, P.A. Olubambi, *Phys. Fluids*, **31** (7), 071301 (2019). DOI: 10.1063/1.5105380