

УДК: 538.95, 536.2

Теплопроводность, вязкость и оптические свойства наножидкостей на основе воды и углеродных наночастиц*

А.В. Зайковский¹, А.М. Дмитрачков^{2,3}, М.А. Морозова¹

¹*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

²*Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск*

³*Новосибирский государственный университет*

E-mail: morozova.itp@gmail.com

Представленная работа посвящена исследованию оптических и теплофизических свойств наножидкостей на основе углеродных сферических наночастиц, стабилизированных в воде додецилсульфатом натрия. Наночастицы со средним диаметром 11 нм синтезированы электродуговым распылением в гелии при давлении 3 торр. При концентрации углеродных наночастиц в наножидкости 0,01 % коэффициент экстинкции меняется от 400 до 200 м⁻¹ в диапазоне длин волн 180–1100 нм. Для весовых концентраций наночастиц в диапазоне 0–0,04 % зависимости вязкости от концентрации не выявлено. Установлено, что теплопроводность наножидкостей в том же диапазоне концентраций снижается с ростом концентрации относительно теплопроводности воды до 4 %.

Ключевые слова: углеродные наночастицы, наножидкость, теплопроводность, вязкость, экстинкция.

Введение

Наножидкостью называют двухфазную среду, состоящую из жидкости и равномерно распределенных в ней наночастиц [1]. Добавляя наночастицы, можно значительно изменять теплофизические свойства базовой жидкости, поэтому наножидкости стали перспективным объектом для исследований в качестве теплоносителей для различных типов энергоэффективного оборудования, включая электронику, системы отопления, вентиляции и кондиционирования, а также солнечные энергетические системы. В этом направлении в качестве базовых жидкостей используют традиционные жидкие теплоносители, такие как вода, различные спирты, масла, парафины, жидкие соли и пр. Для повышения теплопроводности используют наночастицы различных металлов, оксидов или углеродных структур [2, 3]. Помимо теплопроводности важно оценивать влияние наночастиц на вязкость базовой жидкости, так как увеличение вязкости часто приводит

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00139, <https://rscf.ru/project/22-79-00139>; работа проводилась при использовании оборудования УНУ ВГК ИТ СО РАН.

к дополнительным энергетическим затратам на прокачку жидкости в системе. В большинстве случаев добавление металлических [3, 4] или оксидных наночастиц, а также уменьшение их размера увеличивает вязкость [5–7]. Однако из-за множества параметров, таких как размер, форма, концентрация, состав, взаимное влияние наночастиц друг на друга, полного описания поведения теплофизических свойств наножидкостей к настоящему моменту времени не предложено и требуются дополнительные исследования.

Благодаря высокой теплопроводности и поглощающей способности углеродных наноматериалов наножидкости на их основе могут быть использованы в качестве рабочих жидкостей в солнечных коллекторах прямого поглощения. Данные коллекторы абсорбируют солнечную энергию и поглощают непосредственно рабочим объемом солнечного коллектора, а не поверхностью, как в традиционных солнечных коллекторах с плоскими пластинами или вакуумными трубками. Рабочая жидкость, которая обычно окрашена в черный цвет, заполняет объем коллектора и нагревается, поглощая солнечный свет. Эта технология способна повышать эффективность сбора солнечной энергии и является перспективной частью экологической устойчивой энергетики [8].

В различных исследованиях было установлено, что применение графеновых структур [9, 10], углеродных нанотрубок [11, 12] и сферических углеродных наночастиц [13, 14] приводит к увеличению теплопроводности и улучшению оптических свойств солнечных коллекторов прямого поглощения. Однако существуют проблемы, связанные со стабилизацией углеродных наноматериалов в жидкости ввиду их лиофобности. Для их разрешения часто используют различные поверхностно активные вещества, которые приводят к некоторому ухудшению теплофизических свойств наножидкостей [15]. Ввиду указанных обстоятельств также рассматривают подходы, связанные с предварительной функционализацией поверхности углеродных наноматериалов, однако при этом ухудшаются экологические и экономические стороны получения таких материалов [16].

Предыдущие исследования показали, что, кроме наножидкостей, содержащих в своем составе различные углеродные наноматериалы, включая графеновые хлопья, углеродные нанотрубки и сферические углеродные наночастицы, наиболее подходящими характеристиками для солнечных коллекторов прямого поглощения света обладает наножидкость на основе сферических наночастиц [17]. При этом было установлено, что свойства наножидкостей зависят от структуры и состава углеродных наночастиц [18]. В настоящей работе подробно исследуется наножидкость на основе углеродных наночастиц, полученных электродуговым испарением графитовых электродов при давлении буферного газа 3 торр. Как показали исследования, данная наножидкость имеет большую теплопроводность, меньшую вязкость и поглощает большее количество света в сравнении с наножидкостями на основе углеродных наночастиц, полученных при других давлениях и обладающих меньшей степенью графитизации и другими размерами.

1. Описание экспериментов

1.1. Синтез углеродных наночастиц

Углеродные наночастицы были получены с помощью плазмохимического электродугового реактора, который подробно описывался в работе [19]. Реактор состоит из герметичной вакуумной камеры. Камера реактора предварительно продувалась и заполнялась гелием до давления 3 торр. В ней располагались два электрода: графитовый

катод диаметром 20 мм и длиной 12 мм и испаряемый анод, выполненный в виде цилиндрического сплошного графитового стержня диаметром 8 мм и длиной 80 мм. Между электродами зажигался электродуговой разряд с силой постоянного тока 100 А. Напряжение между электродами поддерживалось постоянным и имело значение 23 В. Высокие температуры, реализуемые в процессе электродугового разряда, приводили к распылению анода и образованию газовой компоненты углерода, которая частично осаждалась на поверхности катода, а в большей степени вылетала в объем камеры реактора. Последующие процессы охлаждения и конденсации приводили к формированию углеродных наночастиц в газовой фазе, которые осаждались на поверхности охлаждаемого экрана.

1.2. Получение наножидкостей

Наножидкости были получены двухстадийным методом: первая стадия включала синтез наночастиц, описанный в разделе 1.1, вторая — стабилизацию наночастиц в базовой жидкости. В качестве базовой жидкости использовалась сверхчистая вода, полученная с помощью системы очистки воды Millipore Direct-Q3 UV (Merck). Для стабилизации углеродных наночастиц в воде в наножидкость было добавлено поверхностно-активное вещество — додецилсульфат натрия (SDS) (purity > 99,0 %, Helicon, Россия) — в весовой концентрации 1 % , что соответствует границе критического предела мицеллообразования [20]. Все наножидкости обрабатывались в магнитной мешалке в течение 10 минут, а затем в ультразвуковой ванне Stegler 6DT (частота 40 КГц, мощность 180 Вт) в течение трех часов.

1.3. Структурная характеристизация наноматериалов

Синтезированный материал исследовался методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с использованием микроскопа Libra 120 (Carl Zeiss, Germany), комбинационного рассеяния света (КРС) и спектрометра LabRAM HR Evolution (Horiba – JobinYvon, Germany) с длиной волны 514 нм. Также была применена рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) с использованием спектрометра SPECS (Surface Nano Analysis GmbH, Germany), оборудованного полусферическим анализатором PHOIBOS-150-MCD-9, использующим $MgK\alpha$ -излучение ($h\nu = 1253,6$ эВ).

1.4. Исследование свойств наножидкостей

Для исследования оптических свойств наножидкостей с использованием спектрофотометра СФ-2000 (ОКБ «Спектр», Россия) были получены спектры пропускания в диапазоне длин волн 190–1100 нм с помощью кварцевых кювет с плоскопараллельными стенками. Исследование теплопроводности проводилось нестационарным методом нагретой проволоочки при помощи прибора, описанного в работе [21]. В качестве зонда в указанном устройстве использовалась платиновая проволоочка длиной 3 мм и диаметром 20 мкм. Измерения выполнялись при комнатной температуре (25 °С). Сначала была получена калибровочная кривая для следующих жидкостей: для сверхчистой воды, водных смесей этилового спирта при концентрациях последнего 24, 48, 72 и 96 %, для изопропилового спирта. Величины теплопроводности наножидкостей определялись путем интерполяции калибровочных измерений. Измерения вязкости проводились ротационным методом с использованием вискозиметра Fungilab Expert L.

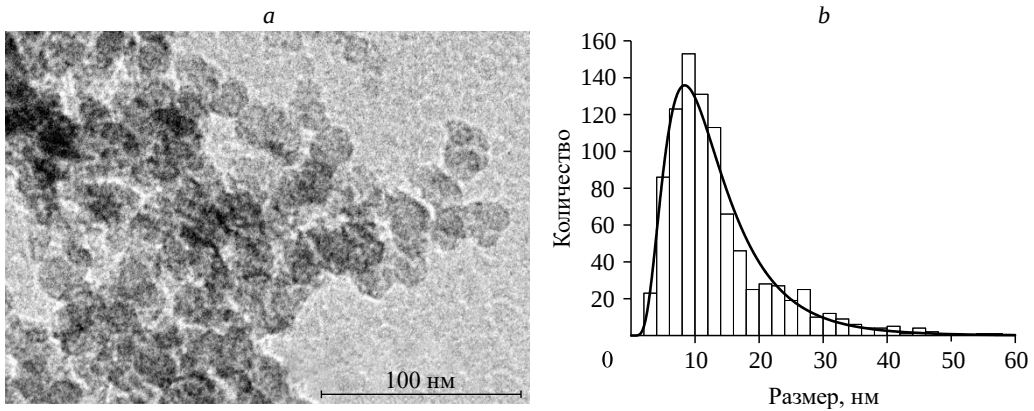


Рис. 1. ПЭМ-изображение синтезированного материала (a) и гистограмма распределения наночастиц по размерам (b).

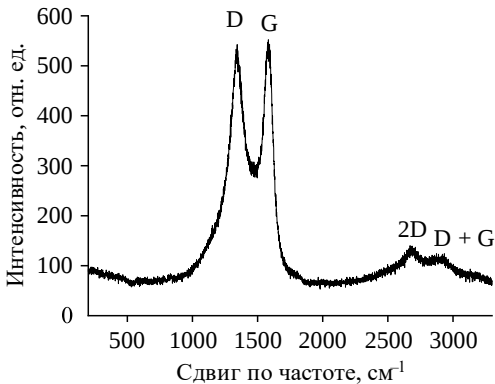
2. Результаты и их обсуждения

2.1. Структура углеродного материала

Материал, синтезированный электродуговым методом, исследовался с помощью ПЭМ (рис. 1a). Материал представлял собой агрегаты сферических наночастиц. Статистическая обработка изображений наночастиц позволила построить гистограмму распределения наночастиц по размерам (рис. 1b), которая описывается логнормальным распределением. Средний размер наночастиц составляет 11 нм.

Полученный материал также исследовался с помощью КРС (рис. 2). Спектр данного материала имеет пики D и G, характерные для углеродной структуры sp^2 -гибридизованного углерода. Кроме того, спектр имеет особенности в области пиков 2D и D + G, что связано с наноразмерными эффектами исследуемого материала. Отношение интенсивностей пиков ID/IG составляет 0,95, что указывает на присутствие значительной доли дефектной структуры углеродного материала.

Результаты рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии приведены на рис. 3. Кроме сигналов Оже-электронов C KVV и O KLL, спектр рассматриваемого материала обладает интенсивным пиком углеродных связей, также наблюдаются некоторые особенности в области кислородных и азотных связей. Детальный анализ спектра и разложение пиков по отдельным компонентам позволили установить, что состав материала содержит 93,7 % sp^2 -углерода, 4,8 % sp^3 -углерода, 1,1 % кислорода и 0,4 % азота. Присутствие кислорода и азота может быть обусловлено хемисорбцией углеродной структуры при контакте с воздухом во время хранения и транспортировки материала.



2.2. Оптические свойства наножидкостей

Исследование устойчивости наножидкости на основе воды и углеродных наночастиц с массовой концентрацией 0,01 %

Рис. 2. КРС-спектр синтезированного материала.

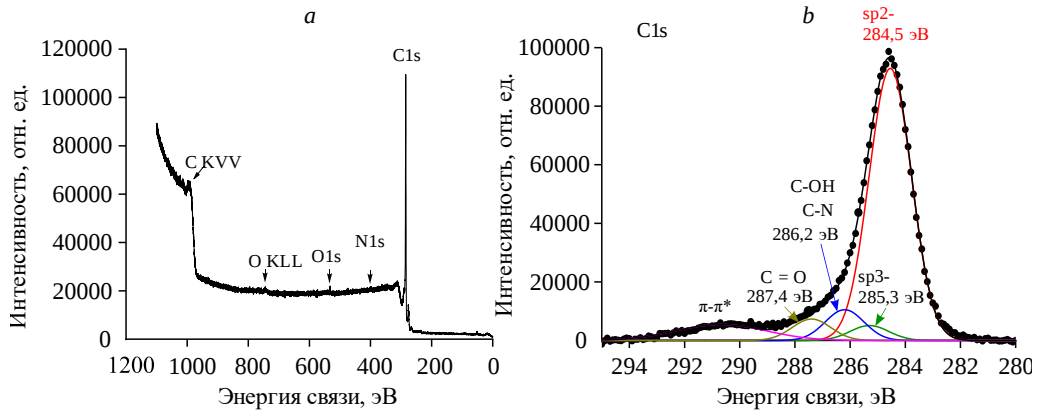


Рис. 3. Интегральный РФЭС-спектр синтезированного материала (а) и разложение C1s-пика на компоненты (b).

$\pi-\pi^*$ — линия перехода с π -орбитали на возбужденное состояние π .

и 1 % SDS проводилось в течение 26 суток. Спектры пропускания наножидкости сразу после получения и через 192, 480, 624 часа показаны на рис. 4а. Видно, что они меняются со временем. Для количественной оценки изменений были определены отношения интегральных значений спектров экстинкции к значению только что полученной наножидкости (рис. 4b). За 26 суток этот показатель уменьшился менее чем на 25 %.

Исследования оптических свойств наножидкостей с различным содержанием углеродного наноматериала (рис. 5а) показали, что интегральный показатель пропускания может меняться от 0,01 до 0,81 для случаев наибольшей концентрации углеродных наночастиц и чистой дистиллированной воды соответственно. Исследования спектров экстинкции (рис. 5b) показали, что коэффициент экстинкции наножидкости с концентрацией углеродных наночастиц 0,01 % может превышать значение 400 м^{-1} в ультрафиолетовом диапазоне (УФ) и уменьшаться до 200 м^{-1} в инфракрасном (ИК) диапазоне.

Сопряженные углеродные структуры из sp^2 -гибридизованных атомов углерода в связи с наличием π -электронов и электронов проводимости обладают высокими значениями поглощения электромагнитного излучения, что обуславливает большое значение коэффициента экстинкции для наножидкостей на основе углеродных наночастиц. При этом электронная структура одного гексагонального кольца структуры графита

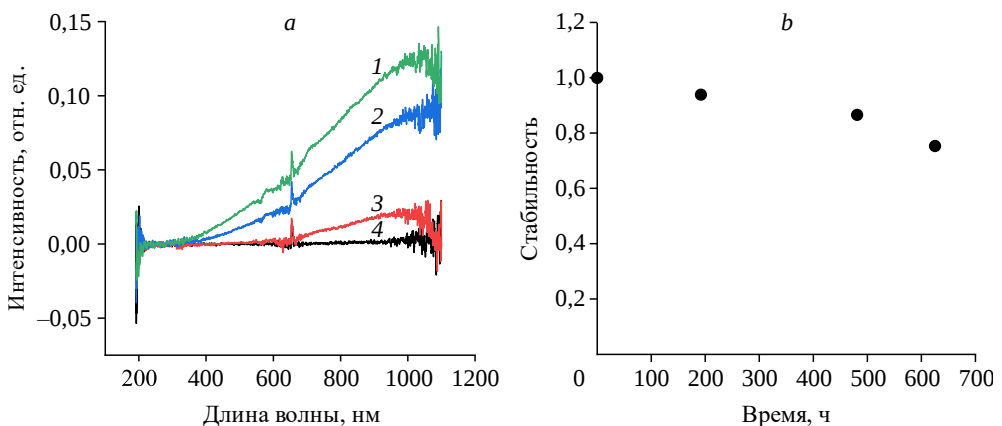


Рис. 4. Спектры пропускания наножидкости в разные моменты времени (а) и зависимость изменения отношения интегрального коэффициента экстинкции наножидкости от времени (b).

а: 0 (1), 192 (2), 480 (3), 624 (4) часов.

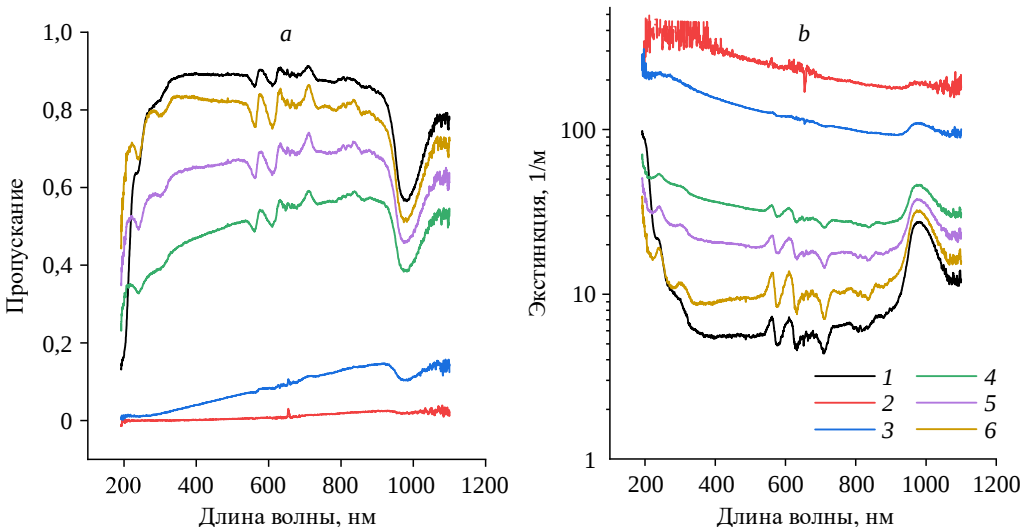
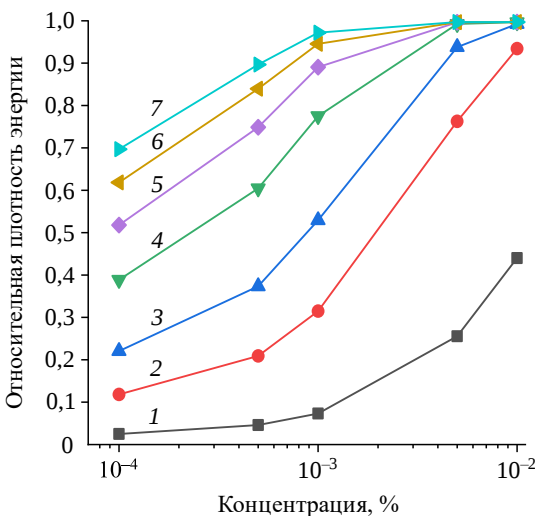


Рис. 5. Спектры пропускания (а) и экстинкции (b) для наножидкостей с различным содержанием углеродных наночастиц.

Содержание углеродных наночастиц: 0 (1), 0,01 (2), 0,005 (3), 0,001 (4), 0,0005 (5), 0,0001 (6) %.

соответствует поглощению УФ-излучения в области длин волн 200 нм. Присоединенные кольца снижают энергию поглощаемых фотонов или же приводят к поглощению света с большими длинами волн. Материалы, обладающие большим количеством соединенных графитовых колец, способны поглощать излучение с большими длинами волн в ИК-диапазоне и выше. В общем случае было установлено, что увеличение размера графитовой структуры приводит к уменьшению ширины зоны поглощения излучения и увеличивает абсорбцию света [22]. Таким образом, форма спектров экстинкции, приведенных на рис. 5b, свидетельствует о том, что углеродные наночастицы в наножидкости имеют широкий набор размеров графитовых структур в своем объеме. Однако большинство графитовых структур обладает малым количеством графитовых колец, что дает максимум поглощения в области 200–300 нм.

С использованием закона Бугера–Ламберта–Бера были получены значения поглощаемой энергии солнечного спектра в диапазоне длин волн 180–1100 нм [23] для разных толщин слоя наножидкости (рис. 6).



Эти значения были отнормированы на полную мощность солнечной энергии в данном спектральном диапазоне, которая составляет 775 Вт/м². Из полученных результатов видно, что для толщин, близких к значениям диаметров распространенных коммерческих солнечных коллекторов — 50 и 20 мм, эффективность поглощения солнечной энергии приближается к максимуму

Рис. 6. Зависимость поглощаемой энергии от концентрации наночастиц для разных толщин слоя наножидкости.

Толщина слоя наножидкости: 1 (1), 5 (2), 10 (3), 20 (4), 30 (5), 40 (6), 50 (7) мм.

при увеличении концентрации углеродных наночастиц до 0,001 и 0,005 % соответственно. Дальнейшее увеличение концентрации наночастиц существенно не отражается на эффективности поглощения света.

2.3. Теплопроводность наножидкостей

Результаты измерений теплопроводности в зависимости от концентрации наночастиц приведены на рис. 7. При обработке данных использовалось значение плотности углерода, равное 2 г/см^3 . Величина теплопроводности рассчитывалась при усреднении серий измерений, что соответствовало погрешности среднего значения менее 1 %. При условии, что теплопроводность твердой фазы значительно превышает теплопроводность жидкости, а также учитывая малую концентрацию наночастиц и форму, близкую к сферической, относительное увеличение теплопроводности можно описать теорией Максвелла [24]. На рис. 7 теоретическая зависимость для относительного увеличения теплопроводности составляет 3φ , где φ — объемная доля твердой фазы. Здесь показано, что в условиях проводимых экспериментов значения теплопроводности наножидкостей не только не согласуются с теоретическим описанием, но и находятся ниже значения теплопроводности воды. Полученный результат можно объяснить влиянием ряда факторов, которые не учитывает теоретическая модель. Сначала рассмотрим влияние стабилизатора на теплопроводность наножидкости. Использование углеродных наночастиц в качестве рабочих жидкостей для солнечных коллекторов прямого поглощения обусловлено прежде всего их черным цветом и, как следствие, высокой поглощающей способностью. Однако углеродные наночастицы обладают гидрофобной поверхностью. Чтобы получить стабильную наножидкость на основе углеродных наночастиц и воды, чаще всего в процессе ее получения используют стабилизаторы, что может существенно влиять на теплопроводность наножидкости. В качестве стабилизаторов обычно применяются поверхностно-активные вещества (ПАВ), и среди них анионный ПАВ SDS — один из самых распространенных [25]. SDS образует на поверхности частиц дополнительный слой, который, безусловно, влияет на теплопроводность.

Также к снижению теплопроводности может приводить наличие теплового контактного сопротивления Капицы на границе раздела фаз [26]. Вклад теплового контактного сопротивления оказывает существенное влияние на процессы теплопереноса в квантовых жидкостях, а также в системах микронного и нанометрового диапазонов размеров, и его величина зависит от свойств материала [27]. Характерный масштаб, на котором тепловое контактное сопротивление Капицы вносит существенный вклад в величину теплопроводности наножидкостей, составляет порядка $1 - 10 \text{ нм}$ [28]. При наличии слоя SDS на поверхности частиц тепловое контактное сопротивление будет вносить вклад в теплопроводность дважды ввиду наличия двух границ раздела фаз. Кроме того, в предыдущих исследованиях было показано, что присутствие тонкой оболочки с малой теплопроводностью (например, присоединенного слоя, оксидной пленки и др.) также может приводить к дополнительному тепловому сопротивлению на границе раздела фаз [28]. Таким образом, снижение значений теплопроводности с ростом объемной концентрации наночастиц может происходить вследствие существования дополнительного слоя на поверхности частицы и двух границ раздела фаз.

Результаты экспериментов других авторов показывают, что малые добавки ПАВ могут приводить к улучшению теплопроводности, однако она начинает быстро уменьшаться выше определенной концентрации ПАВ [29, 30]. Добавление 1 % SDS в воду также влечет за собой снижение теплопроводности (рис. 7). Предыдущие исследования

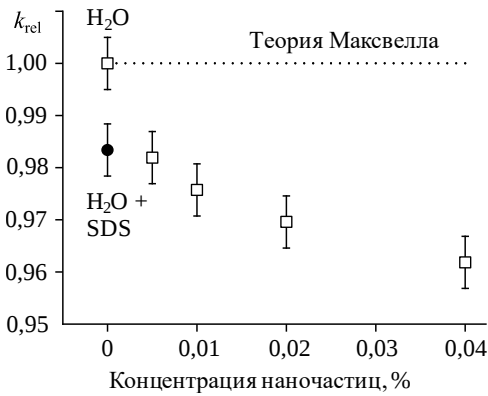


Рис. 7. Зависимость теплопроводности от концентрации углеродных наночастиц.

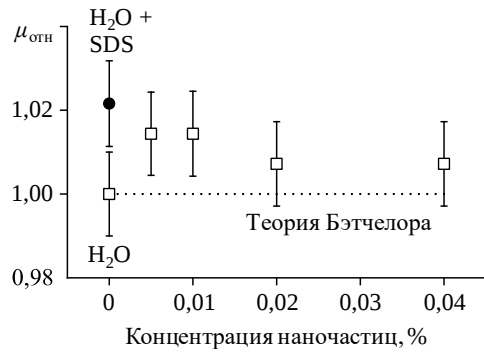


Рис. 8. Зависимость вязкости от концентрации углеродных наночастиц.

стабильности наножидкостей на основе углеродных наночастиц, синтезированных в данной работе, показали, что снижение концентрации SDS или повышение концентрации наночастиц приводит к потере стабильности исследуемых образцов [31].

В настоящее время опубликовано большое количество экспериментальных исследований, в которых отмечается либо значительное увеличение значения эффективной теплопроводности, либо согласованность полученных результатов с данными классических теорий. Однако среди них встречаются также результаты, где значение эффективной теплопроводности жидкости при добавлении наночастиц ниже, чем предсказывают теории [32, 33]. В работе [34] экспериментально полученные значения теплопроводности для наножидкостей на основе сферических углеродных наночастиц также находятся ниже теоретических значений.

2.4. Вязкость наножидкостей

Результаты измерений вязкости в зависимости от концентрации наночастиц приведены на рис. 8. Видно, что вязкость увеличивается для всех наножидкостей, однако зависимости от концентрации не наблюдается. Здесь же для сравнения с экспериментальными данными, полученными для вязкости наножидкостей, приведены значения, полученные по теории Бэтчелора [35]. В данной модели вязкость не зависит от размера частиц и увеличивается с ростом концентрации наночастиц. Обзоры экспериментальных исследований вязкости наножидкостей показывают, что вязкость увеличивается с ростом концентрации наночастиц и зависит от многих других факторов, включая размер частиц и добавки стабилизаторов [36, 37]. В ряде работ был сделан вывод о том, что добавки наночастиц малого размера приводят к более значительному увеличению эффективной вязкости по сравнению с данными, полученными по классической модели. В настоящем исследовании использование SDS в качестве стабилизатора играет основную роль в увеличении вязкости, что подтверждает результат сравнения вязкости для водного раствора 1 % SDS (рис. 8) и для наножидкостей.

Заключение

Электродуговое испарение графитового электрода в гелии при давлении 3 торр приводит к формированию сферических углеродных наночастиц со средним размером 11 нм. Наночастицы при этом преимущественно состоят из sp^2 -гибридизованных атомов углерода, образующих дефектную графитоподобную структуру. При контакте с воздухом

указанная структура может образовывать незначительное количество связей с кислородом и азотом. С другой стороны, использование додецилсульфата натрия в качестве ПАВа, позволяет создавать устойчивые наножидкости на основе таких углеродных наночастиц и воды. Добавление углеродных наночастиц значительно влияет на оптические свойства наножидкости. Так, добавление углеродных наночастиц до 0,01 % приводит к увеличению коэффициента экстинкции до значений от 400 до 200 м⁻¹ в диапазоне длин волн 180–1100 нм. Соответственно, с увеличением концентрации наночастиц возрастает количество поглощаемой солнечной энергии. Кроме того, было определено, что для разных толщин слоя наножидкости эффективность поглощения света приближается к максимальному значению при относительно малых концентрациях наночастиц. А дальнейшее увеличение концентрации наночастиц существенно не влияет на эффективность поглощения света.

Увеличение концентрации углеродных наночастиц в диапазоне 0–0,04 % приводит к снижению значений теплопроводности наножидкостей до 4 % относительно воды. Результаты экспериментов показали, что к снижению теплопроводности может привести наличие слоя SDS на поверхности частиц, а также влияние теплового контактного сопротивления на границах раздела фаз. В том же диапазоне концентраций углеродных наночастиц вязкость наножидкостей увеличивается в пределах 2 % и не зависит от концентрации наночастиц, что, вероятно, связано с влиянием добавки SDS.

Обобщение полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что на основе синтезированных углеродных наночастиц можно получить стабильную наножидкость, которая при малых концентрациях наночастиц эффективно поглощает большое количество солнечной энергии, что дает возможность рассматривать ее в качестве эффективной рабочей жидкости в солнечных коллекторах прямого поглощения.

Авторы благодарят проф. Б.А. Колесова за помощь в проведении раман-спектроскопии. Также авторы благодарят ЦКП ВТАН НГУ за возможность проведения исследований с помощью просвечивающей электронной микроскопии.

Список литературы

1. Choi S.U.S., Eastman J.A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles // Argonne National Lab.(ANL). 1995. No. ANL/MSD/CP-84938; CONF-951135-29. P. 1–8.
2. Moghaieb H.S., Amendola V., Khalil S., Chakrabarti S., Maguire P., Mariotti D. Nanofluids for direct-absorption solar collectors–dascos: a review on recent progress and future perspectives // *Nanomaterials*. 2023. Vol. 13, No. 7. P. 1232-1–1232-31.
3. Xiong Q., Hajjar A., Alshuraiaan B., Izadi M., Altnji S., Shehzad S.A. State-of-the-art review of nanofluids in solar collectors: a review based on the type of the dispersed nanoparticles // *J. Clean. Prod.* 2021. Vol. 310. P. 127528-1–127528-20.
4. Patel H.E., Das S.K., Sundararajan T., Nair A.S., George B., Pradeep T. Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle based nanofluids: manifestation of anomalous enhancement and chemical effects // *Appl. Phys. Lett.* 2003. Vol. 83, No. 14. P. 2931–2933.
5. Klazly M., Bognar G. A novel empirical equation for the effective viscosity of nanofluids based on theoretical and empirical results // *Intern. Commun. Heat Mass Transf.* 2022. Vol. 135. P. 106054-1–106054-18.
6. Chevalier J., Tillement O., Ayela F. Rheological properties of nanofluids flowing through microchannels // *Appl. Phys. Lett.* 2007. Vol. 91, No. 23. P. 1–4.
7. Apmann K., Fulmer R., Soto A., Vafaei S. Thermal conductivity and viscosity: review and optimization of effects of nanoparticles // *Materials*. 2021. Vol. 14, No. 5. P. 1291-1–1291-71.
8. Hussain M., Shah S.K.H., Sajjad U., Abbas N., Ali A. Recent developments in optical and thermal performance of direct absorption solar collectors // *Energies*. 2022. Vol. 15. P. 7101-1–7101-23.
9. Mahamude A.S.F., Harun W.S.W., Kadirgama K., Farhana K., Ramasamy D., Samyilingam L., Aslfattahi N. Thermal performance of nanomaterial in solar collector: state-of-play for graphene // *J. Energy Storage*. 2021. Vol. 42. P. 103022-1–103022-16.
10. Huq T., Ong H.C., Chew B.T., Leong K.Y., Kazi S.N. Review on aqueous graphene nanoplatelet nanofluids: preparation, stability, thermophysical properties, and applications in heat exchangers and solar thermal collectors // *Appl. Therm. Eng.* 2022. Vol. 210. P. 118342-1–118342-31.

11. Ghalandari M., Maleki A., Haghighi A., Shadloo M., Nazari M.A., Tlili I. Applications of nanofluids containing carbon nanotubes in solar energy systems: a review // J. Molecular Liquids. 2020. Vol. 313. P. 113476–113476-9.
12. Talugeri V., Nasi V.B., Nagaraj P.B. A review on the influence of carbon nanotube parameters in the base fluid to increase heat transfer in the solar collector // Intern. J. Ambient Energy. 2022. Vol. 43, No. 1. P. 8613–8631.
13. Ladjevardi S.M., Asnaghi A., Izadkhast P.S., Kashani A.H. Applicability of graphite nanofluids in direct solar energy absorption // Solar Energy. 2013. Vol. 94. P. 327–334.
14. Tam N.T., Phuong N.V., Khoi P.H., Minh P.N., Afrand M., Trinh P.V., Thang B.H., Zyla G., Estellé P. Carbon nanomaterial-based nanofluids for direct thermal solar absorption // Nanomaterials. 2020. Vol. 10, No. 6. P. 1199–1199-39.
15. Alexander K., Gajghate S.S., Katarkar A.S., Majumder A., Bhaumik S. Role of nanomaterials and surfactants for the preparation of graphene nanofluid: a review // Mater. Today: Proc. 2021. Vol. 44. P. 1136–1143.
16. Lin H., Jian Q., Bai X., Li D., Huang Z., Huang W., Feng S., Cheng Z. Recent advances in thermal conductivity and thermal applications of graphene and its derivatives nanofluids // Appl. Therm. Eng. 2023. Vol. 218. P. 119176–119176-27.
17. Морозова М.А., Зайковский А.В. Наноожидкости на основе углеродных наноматериалов для коллекторов прямого сбора солнечной энергии // Письма в журн. технич. физики. 2024. Т. 5, вып. 13. С. 43–46.
18. Zaikovskiy A., Yudin I., Fedoseev A., Dmitrachkov A., Morozova, M. Improving the performance of nanofluids for direct absorption solar collectors by tuning the structure of carbon nanoparticles // Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4774903> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4774903>.
19. Zaikovskii A.V., Novopashin S.A. Electroconductive and magnetic properties of pure carbon soot produced in arc discharge: regimes of various buffer gas pressure // Phys. Stat. Sol. A. 2017. Vol. 2014, No. 10. P. 1700142–1700142-6.
20. Vigolo B., Penicaud A., Coulon C., Sauder C., Pailler R., Journet C., Bernier P., Poulin, P. Macroscopic fibers and ribbons of oriented carbon nanotubes // Sci. 2000. Vol. 290, No. 5495. P. 1331–1334.
21. Skripov, P.V., Smotritskii, A.A., Starostin, A.A., Shishkin A.V. A method of controlled pulse heating: applications // J. Engin. Thermophys. 2007. Vol. 16, No. 3. P. 155–163.
22. Bond T.C., Bergstrom R.W. Light absorption by carbonaceous particles: an investigative review // Aerosol Sci. Technol. 2006 Vol. 40, No. 1. P. 27–67.
23. ASTM Standard E490-00, 2006a, "Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables" ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.
24. Maxwell J.C. A treatise on electricity and magnetism. Clarendon press, 1881. T. 1. 507 p.
25. Borode A.O., Ahmed N.A., Olubambi P.A. Surfactant-aided dispersion of carbon nanomaterials in aqueous solution // Phys. Fluids. 2019. Vol. 31, No. 7. P. 071301–1–071301-24.
26. Kapitza P.L. Investigation of the mechanism of heat transfer in helium-II // J. Phys. USSR. 1941. Vol. 4. P. 181–211.
27. Cahill D.G., Ford W.K., Goodson K.E., Mahan G.D., Majumdar A., Maris H.J., Merlin R., Phillpot S.R. Nanoscale thermal transport // J. Appl. Phys. 2003. Vol. 93, No. 2. P. 793–818.
28. Sukhinin G.I., Serebryakova M.A., Novopashin S.A. Thermal conductivity of suspensions based on core-shell particles // J. Heat Transf. 2016. Vol. 138, No. 6. P. 064501–1–064501-4.
29. Khairul M.A., Shah K., Doroodchi E., Azizia R., & Moghtaderi B. Effects of surfactant on stability and thermophysical properties of metal oxide nanofluids // Intern. J. Heat Mass Transf. 2016. Vol. 98. P. 778–787.
30. Ma M., Zhai Y., Yao P., Li Y., Wang H. Effect of surfactant on the rheological behavior and thermophysical properties of hybrid nanofluids // Powder technol. 2021. Vol. 379. P. 373–383.
31. Morozova M.A., Osipov A.A., Maksimovskiy E.A., Zaikovskii A.V. Investigation of the stability of nanofluids based on water and carbon nanoparticles synthesized by the electric arc method // E3S Web Conf. 2023. Vol. 459. P. 08005–1–08005-6.
32. Timofeeva E.V., Gavrilov A.N., McCloskey J.M., Tolmachev Y.V., Sprunt S., Loatina L.M., Selinger J.V. Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: experiment si theory // Phys. Rev. E. 2007. Vol. 76, No. 6. P. 061703–1–061703-16.
33. Serebryakova M.A., Zaikovskii A.V., Sakhapov S.Z., Smovzh D.V., Sukhinin G.I., Novopashin S.A. Thermal conductivity of nanofluids based on hollow γ -Al₂O₃ nanoparticles, and the influence of interfacial thermal resistance // Intern. J. Heat Mass Transf. 2017. Vol. 108. P. 1314–1319.
34. Ba T.L., Bohus M., Lukács I.E., Wongwises S., Gróf G., Hernadi K., Szilágyi I.M. Comparative study of carbon nanosphere and carbon nanopowder on viscosity and thermal conductivity of nanofluids // Nanomaterials. 2021. Vol. 11, No. 3. P. 608–1–608-17.
35. Batchelor G.K. Brownian diffusion of particles with hydrodynamic interaction // J. Fluid Mech. 1976. Vol. 74, No. 1. P. 1–29.
36. Patra A.K., Nayak M.K., Misra A. Viscosity of nanofluids — a review // Intern. J. Thermofluid Sci. Technol. 2020. Vol. 7, No. 2. P. 070202–1–070202-49.
37. Koca H.D., Doganay S., Turgut A., Tavman I.H., Saidur R., Mahbulul I. M. Effect of particle size on the viscosity of nanofluids: a review // Renew. Sustain. Energy Rev. 2018. Vol. 82. P. 1664–1674.

*Статья поступила в редакцию 16 февраля 2024 г.,
после доработки — 25 апреля 2024 г.,
принята к публикации 13 июня 2024 г.*