

УДК: 532.13; 532.135; 538.93; 544.773

## О диффузии одностенных углеродных нанотрубок\*

В.Я. Рудяк<sup>1,2</sup>, Д.С. Третьяков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет

E-mail: valery.rudyak@mail.ru

Работа посвящена изучению диффузии одностенных нанотрубок в жидкостях при изменении весовой концентрации нанотрубок от 0,00001 до 0,01 %. В качестве несущих жидкостей использовались водные растворы додецилбензолсульфата натрия и поливинилпирролидона, применяемые обычно в качестве поверхностно активных веществ. Их концентрация либо равнялась концентрации нанотрубок, либо вдвое превосходила ее. Показано, что в зависимости от концентрации коэффициент диффузии нанотрубок менялся от  $1,02 \cdot 10^{-11}$  до  $0,7 \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>/с. По данным о коэффициенте диффузии восстанавливается эффективный гидродинамический размер нанотрубок и их длина. Обсуждается эффективность разделения нанотрубок с помощью центрифугирования и изменение их характеристик при длительном хранении.

**Ключевые слова:** динамическое рассеяние света, диффузия, наножидкость, одностенные углеродные нанотрубки.

### Введение

Около тридцати лет назад были открыты углеродные нанотрубки (УНТ) [1]. Они представляют собой достаточно сложный объект и могут быть одностенными [2, 3], двухстенными или многостенными [4]. Диаметр одностенных УНТ (ОСУНТ) составляет от 1,2 до 1,6 нм, тогда как длина может достигать сотен нанометров или даже больше. У многостенных УНТ диаметр может составлять десятки нанометров, в то время как расстояние между слоями имеет порядок характерного размера молекул [5].

УНТ имеют ряд уникальных тепловых, электрических и механических свойств. Они могут быть проводящими или иметь полупроводниковые свойства. Теплопроводность многостенных УНТ превышает 3000 Вт/м, а у ОСУНТ она вдвое выше [6]. Нанотрубки обладают также уникальными механическими свойствами, сочетая высокую прочность с высокой упругостью [7]. Уникальность свойств УНТ делает их востребованными в самых разных приложениях: в электронике, при создании материалов с уникальными свойствами, нового типа фильтров, суперконденсаторов, аккумуляторов, сенсоров разного типа и т.д. (см., например, работы [8–12] и цитированную в них литературу).

---

\* Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 20-19-00043).

На практике почти во всех случаях использование УНТ требует предварительного создания соответствующих наножидкостей. В качестве базовой жидкости могут использоваться вода, этиленгликоль, различные масла и т.д. Эти наножидкости, однако, существенно отличаются от обычных наножидкостей со сферическими частицами. Связано это с двумя обстоятельствами. Во-первых, с большим значением отношения длины УНТ к ее диаметру, которое может достигать сотен и тысяч. Во-вторых, УНТ из-за сильных ван-дер-ваальсовых взаимодействий образуют агломераты трубок. Их формирование характерно и для сферических частиц, но УНТ в базовой жидкости создают сложные сетчатые структуры, тем самым существенно изменяя структуру наножидкости с УНТ.

Создание наножидкостей с УНТ практически всегда требует использования различных поверхностно активных веществ (ПАВ). Это приводит к тому, что и базовая жидкость оказывается достаточно сложной. Кроме того, чтобы разрушить конгломераты трубок, первичную наножидкость подвергают ультразвуковой обработке. В этом случае может меняться и структура базовой жидкости. Все это делает изучение процессов переноса в наножидкостях с УНТ непростой задачей.

Исследованию теплофизических свойств наножидкостей с УНТ посвящены десятки работ, в основном в них изучались теплопроводность и вязкость (см., например, [13–18] и цитированную в них литературу). К сожалению, сопоставлять полученные результаты чрезвычайно трудно, поскольку все известные данные соответствуют фактически разным наножидкостям. Они создавались, собственно, для разных УНТ при использовании различных ПАВ и мощности ультразвуковой обработки. До сих пор практически отсутствуют работы, в которых экспериментально изучалась бы диффузия УНТ. Известно лишь две-три работы, где была поставлена такая задача. Так, для медицинских целей в работах [19, 20] диффузия УНТ исследовалась посредством одномолекулярной флуоресцентной микроскопии. Однако полученные в этих работах значения коэффициентов диффузии достаточно сильно разнились. Недостаток экспериментальной информации стимулировал появление нескольких работ, где диффузия УНТ моделировалась методом молекулярной динамики [21, 22]. Установленные в этих работах данные безусловно полезны, хотя следует отметить, что в них рассматривались достаточно модельные системы. Этот краткий обзор подчеркивает актуальность экспериментального изучения диффузии УНТ. Цель настоящей работы — экспериментальное исследование методом динамического рассеяния света диффузии ОСУНТ в жидкостях с параллельным определением их характерных размеров.

## 1. Метод измерения и используемые материалы

Наножидкости с УНТ обычно приготавливаются стандартным двухшаговым методом [23]. Вначале необходимое количество порошка УНТ добавляется в исходную базовую жидкость, после чего полученная суспензия механически перемешивается. Затем эту первичную наножидкость подвергают ультразвуковой обработке. УНТ имеют достаточно большую длину и поэтому активно взаимодействуют друг с другом даже при низких объемных концентрациях. По этой причине при создании соответствующих наножидкостей практически всегда приходится использовать ПАВ. В настоящей работе в качестве первичной базовой жидкости использовалась деионизованная вода (В) и применялись два типа ПАВ: анионный — додецилбензолсульфат натрия (СДБС),  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{C}_6\text{H}_4\text{SO}_3\text{Na}$ , и не ионный — поливинилпирролидон (ПВП),  $(\text{C}_6\text{H}_9\text{NO})_n$ . Таким образом, рассматривались две базовые жидкости: В+СДБС и В+ПВП.

Авторами изучалась диффузия ОСУНТ, произведенных компанией OCSiAl (Новосибирск). По данным термогравиметрического анализа содержание углерода по массе в них составляет  $86 \pm 1$  %, остальное — металлические примеси. Диаметр ОСУНТ, определенный с помощью КР-спектроскопии (спектроскопия комбинационного рассеяния),

равен  $1,6 \pm 0,4$  нм. Полная удельная поверхность по БЭТ-методу (методу Брунера–Эммета–Теллера) составляет  $500 \text{ м}^2/\text{г}$ . По данным атомно-силовой микроскопии длина ОСУНТ превышала 4 мкм.

Весовая концентрация УНТ варьировалась от  $10^{-2}$  до  $10^{-5}$  %, концентрация ПАВ либо равнялась концентрации УНТ, либо вдвое превосходила ее. Измерения проводились при температуре  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Обе базовые жидкости являются ньютоновскими и маловязкими. Их вязкость и реология изучались с помощью ротационных вискозиметров Brookfield DV3 RV и DV3T LV. Тестирование, проведенное путем измерения вязкости воды и этиленгликоля с учетом ее зависимости от температуры, показало, что точность измерения коэффициента вязкости составляет около 2 %. При максимальной весовой концентрации ПАВ, равной 1 %, вязкость обоих растворов (В+СДБС и В+ПВП) превышала вязкость воды примерно на 2–4 %.

Диффузия УНТ в базовых жидкостях изучалась методом динамического рассеяния света. Для этой цели использовался прибор Malvern Zetasizer ZSP. Диапазон размеров частиц, которые он способен измерить, составляет от 0,3 нм до 10 мкм. Для измерения отбирался 1 мл наножидкости, разбавленной до необходимой концентрации УНТ, далее проба термостатировалась при температуре  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . С каждой пробой выполнялось несколько измерений, затем результаты усреднялись.

Исследование проводилось следующим образом. В ходе эксперимента измерялась интенсивность рассеянного частицами света и строилась соответствующая двухвременная корреляционная функция. Затем с использованием этой корреляционной функции и флуктуационно-диссипационной теоремы находился коэффициент диффузии  $D$  исследуемых частиц. В результате определялось некоторое распределение коэффициентов диффузии, зависящее от интенсивности рассеянного света. Отметим, что каждое значение в полученном распределении соответствует отражению от частиц заданного размера, поэтому по распределениям коэффициентов диффузии можно получить данные о распределении в наножидкости частиц по размерам. Для этого обычно используют формулу Стокса–Эйнштейна

$$D = kT / (6\pi\mu R), \quad (1)$$

здесь  $\mu$  и  $T$  — коэффициент вязкости несущей жидкости и ее температура,  $R$  — радиус дисперсной частицы,  $k$  — постоянная Больцмана.

Следует отметить, что формула (1) получена для сферических частиц радиуса  $R$ . В применении к несферическим частицам этот радиус принято называть гидродинамическим. Фактически это некоторый эффективный размер. Для несферических частиц соотношение (1) модифицируется, в частности, для цилиндрических трубок длиной  $L$  и диаметром  $d$  оно принимает вид [24]

$$D = \frac{kT}{6\pi\mu R} \left( \ln \frac{L}{d} + 0,32 \right). \quad (2)$$

Соотношение (2) является полуфеноменологическим. Для УНТ с большим отношением длины к диаметру, а это типично для ОСУНТ (см. следующий раздел), формула имеет более простой вид [25]:

$$D = \frac{kT \ln(L/d)}{3\pi\eta L}. \quad (3)$$

Тестирование метода было выполнено путем измерения размера сферических частиц латекса с заданным средним размером: 246, 522, 1028 нм. Проведенные измерения распределений этих частиц, которые восстанавливались по данным о коэффициентах диффузии по формуле (1), показали, что максимум интенсивности рассеянного света для частиц первого размера составляет 255 нм, второго — 585 нм, третьего — 1106 нм.

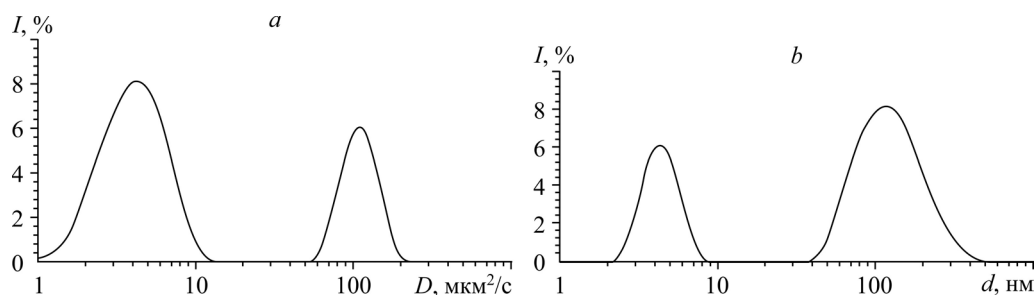


Рис. 1. Распределения коэффициента диффузии (а) и размеров мицелл (b) молекул СДБС в водном растворе.

Во всех случаях полученные кривые являлись логнормальными, так что средние размеры с достаточной точностью (от 2 до 5 %) соответствовали заданным тестовым размерам.

Используемые базовые жидкости являются весьма сложными, они включают ПАВы с крупными молекулами. Наличие таких молекул должно фиксироваться в процессе измерения. Чтобы однозначно идентифицировать УНТ, необходимо предварительно измерить диффузию молекул используемых ПАВов в водном растворе и определить их эффективные размеры. На рис. 1 и 2 приведены данные таких измерений. Весовая концентрации молекул ПАВов в обоих случаях равнялась 0,2 %.

На рис. 1а приведены данные измерения распределения коэффициента диффузии, а на рис. 1b — полученные по этим данным размеры молекул СДБС. Характерной чертой этих распределений является наличие двух существенно разнесенных максимумов интенсивности отраженного света  $I$ . Это означает наличие в растворе частиц с существенно различными размерами, коэффициенты диффузии которых отличаются в несколько десятков раз. Построенные по данным о коэффициентах диффузии характерные размеры молекул СДБС, представлены на рис. 1b. Здесь для восстановления размеров частиц использовалась формула (1). Действительно, в растворе имеют место частицы двух характерных размеров. Максимум первого пика для молекул СДБС (рис. 1b) соответствует размеру частиц 4,19 нм. Согласно молекулярно-динамическому моделированию мицелл СДБС они имеют диаметр 4 нм [26], что довольно точно согласуется с полученными экспериментальными данными. Наличие второго пика соответствует более крупным цилиндрическим структурам мицелл. В этой связи стоит отметить, что рассматриваемый ПАВ является не просто мицеллярным раствором, но он характеризуется еще и полиморфизмом [27]. В первом случае из молекул СДБС образуются почти сферические агрегаты, а во втором — цилиндрические мицеллярные структуры. Именно эти структуры и генерируют второй пик на рис 1b. Стоит заметить, что мицеллообразование в растворе СДБС является аналогом некоторого фазового перехода и начинается с критической концентрации этих молекул.

Итак, второй пик на рис. 1b соответствует цилиндрическим мицеллам. Его максимум равен 132 нм, что составляет гидродинамический размер этих мицелл. Если считать, что их диаметр равен 4,19 нм, то нетрудно найти и характерную их длину, используя соотношение (2). Легко установить, что гидродинамический размер дает существенно заниженную оценку длины полимицеллы. В данном случае ее длина составляет около 1 мкм.

Распределения коэффициента диффузии молекул ПВП и их размеров представлены соответственно на рис. 2а и 2b. Средний размер молекул ПВП оказывается равным 282 нм. Необходимо учитывать, что указанное значение соответствует эффективному гидродинамическому размеру. На самом деле молекула ПВП ( $C_6H_9NO$ ) по своей форме близка

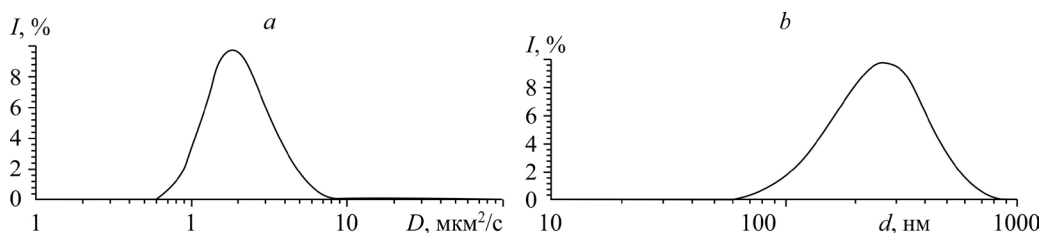


Рис. 2. Распределения коэффициента диффузии (а) и размеров (b) молекул ПВП в водном растворе.

к вытянутому эллипсоиду вращения, большая ось которого равна примерно 8,1 нм, а меньшая составляет около 4,3 нм. Так что их отношение приблизительно равно 1,9 [28]. Реально использовавшийся в экспериментах ПАВ имеет формулу  $(C_6H_9NO)_n$  и по сути является цепочкой из  $n$  таких молекул.

## 2. Результаты измерений

Используемый метод динамического рассеяния (ДРС) света хорошо идентифицирует диффузию и размеры ОСУНТ в рассматриваемых базовых жидкостях. Так как для приготовления всех наножидкостей применяются ПАВ, необходимо понять, присутствуют ли пики, соответствующие молекулам ПАВ, на результатах ДРС-анализа наножидкостей с ОСУНТ. Соответствующие данные представлены на рис. 3. Здесь приведены данные для двух наножидкостей с весовой концентрацией ОСУНТ, равной 0,01 %, при этом концентрация обоих ПАВ вдвое выше. Линии 1, 2 соответствуют распределениям по размерам ОСУНТ в наножидкостях на основе В+ПВП и В+СДБС, а 3 и 4 — распределениям по размерам молекул СДБС и ПВП. Как и раньше, для восстановления распределений по размерам по данным о диффузии использовалось соотношение (1).

Анализ представленных на рис. 3 распределений показывает, что характерные размеры ОСУНТ оказываются практически одинаковыми при использовании обоих ПАВ. С другой стороны, распределения по размерам молекул ПВП и СДБС локализованы на своих местах, это видно при сравнении с рис. 1 и 2. Максимумы их распределений не совпадают с максимумами распределений для ОСУНТ. Таким образом, метод ДРС хорошо идентифицирует нанотрубки в обоих наножидкостях независимо от использованного ПАВ.

Коэффициент диффузии обычно определяется для достаточно разреженных суспензий. Строго говоря, речь идет о коэффициенте диффузии изолированной дисперсной частицы, в частности УНТ. В реальных экспериментах всегда есть некоторая вполне конечная концентрация частиц в базовой жидкости. Простые оценки показывают, что значение коэффициента диффузии ОСУНТ определяется достаточно точно, если их весовая концентрация не превышает  $10^{-5}$  %. Распределение коэффициента диффузии ОСУНТ при этой концентрации показано на рис. 4 линией 1. Распределение имеет

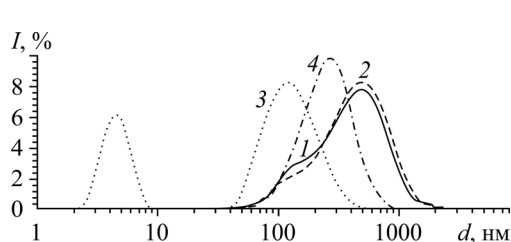


Рис. 3. Распределения ОСУНТ и частиц ПВП и СДБС в наножидкостях на основе растворов В+ПВП и В+СДБС.

Распределения по размерам ОСУНТ для В+ПВП (1), В+СДБС (2) и по размерам молекул СДБС (3), ПВП (4).

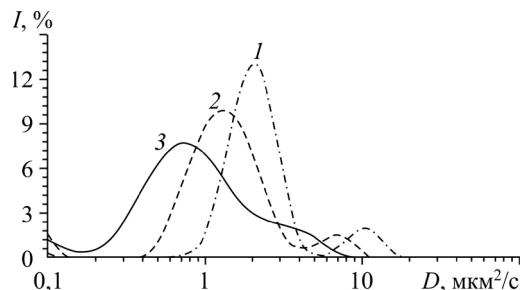


Рис. 4. Распределение коэффициента диффузии в зависимости от концентрации ОСУНТ. Концентрация:  $10^{-5}$  (1), 0,002 (2), 0,01 (3) %.

два максимума, что свидетельствует о том, что даже при таких низких концентрациях распределения по размерам ОСУНТ неоднородны, в частности, по длине. Второй (меньший) максимум соответствует индивидуальным трубкам, и коэффициент диффузии этих трубок в разы больше. Так, максимальное значение коэффициента диффузии УНТ  $D$ , соответствующее первому (бóльшему) максимуму, равно  $2,2 \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>/с, а второму —  $D = 1,02 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с. Средние значения несколько ниже.

Очевидно, что с увеличением концентрации ОСУНТ их коэффициент диффузии будет уменьшаться. На рис. 4 линия 2 соответствует концентрации 0,002 %, а сплошная — 0,01 %. При этих концентрациях максимальные значения коэффициента диффузии имеют соответственно значения:  $D = 1,2 \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>/с и  $D = 0,7 \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>/с. Как уже отмечалось, это максимальные значения (средние несколько ниже). Последнее значение хорошо согласуется (в пределах 10 %) с данными работы [19], но в ней УНТ были покрыты либо полимером рибонуклеиновой кислоты, либо бычьим сывороточным альбумином. В работе [20] были получены значения коэффициента диффузии, отличающиеся от данных работы [19] для концентрации 0,01 % в несколько раз, но при этом использовались совсем другие базовые жидкости (в разы более вязкие).

До сих пор при интерпретации данных по диффузии УНТ и их размеров (см. рис. 1 и 2) использовалась формула Стокса–Эйнштейна (1), то есть определялся эффективный гидродинамический радиус УНТ. Однако и для практических целей, и при проведении лабораторных экспериментов обычно необходимо знать характерный диаметр и длину УНТ или их пучков в исследуемых или используемых наножидкостях. Настоящие эксперименты позволяют получить такую информацию. Распределения по длине УНТ в наножидкостях на основе воды с двумя различными ПАВами представлены на рис. 5. Здесь линия 1 соответствует наножидкости с ПВП, а линия 2 — с СДБС. Весовая концентрация УНТ в обоих случаях одинакова и равна 0,1 %, а ПАВа — 0,2 %. При восстановлении длины УНТ по измеренным значениям коэффициента диффузии использовалась формула (3), где средний диаметр пучков был взят равным 10 нм. Напомним, что диаметр ОСУНТ равнялся 1,6 нм (см. раздел 2), однако при рассматриваемых концентрациях и использованных ПАВ добиться только изолированных нанотрубок не удастся. Поэтому в наножидкостях при изученных концентрациях большая часть нанотрубок образует пучки, эффективный диаметр которых существенно превышает диаметр изолированной ОСУНТ.

У распределений, представленных на рис. 5, следует отметить два характерных обстоятельства. Во-первых, средние размеры УНТ при использовании различных ПАВ существенно разнятся. Так, если для приготовления базовой жидкости используется СДБС, то средняя длина пучков трубок составляет 2,6 мкм, тогда как в наножидкостях с ПВП длина трубок превышает 3 мкм. Второе важное обстоятельство состоит в том, что в обоих случаях распределения по размерам имеют два максимума. Первый соответствует низкой интенсивности и идентифицирует индивидуальные трубки, которые практически всегда имеются в наножидкостях, если только их концентрации не слишком велики. Характерный размер этих трубок в обоих случаях одинаков. Их средняя длина почти на порядок меньше, чем у пучков, и составляет около 250 нм.

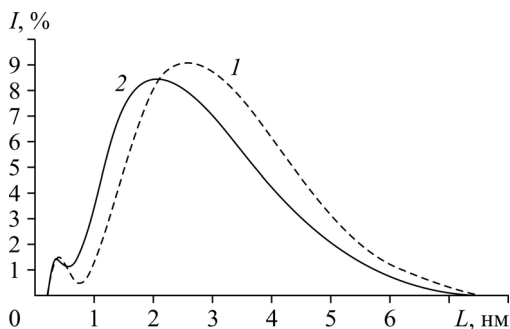
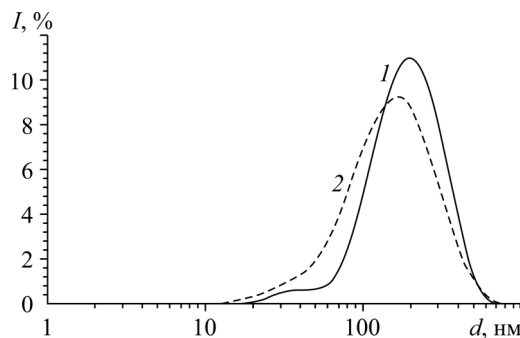


Рис. 5. Распределения ОСУНТ по длине в наножидкостях на основе растворов В+ПВП (1) и В+СДБС (2).

Рис. 6. Распределения ОСУНТ по размерам в наножидкости на основе В+СДБС до центрифугирования (1) и после центрифугирования (2).



На практике для получения УНТ заданного размера нередко используется центрифугирование наножидкостей. Это действительно достаточно эффективный метод дифференции УНТ по размерам. Пример результатов такого центрифуги-

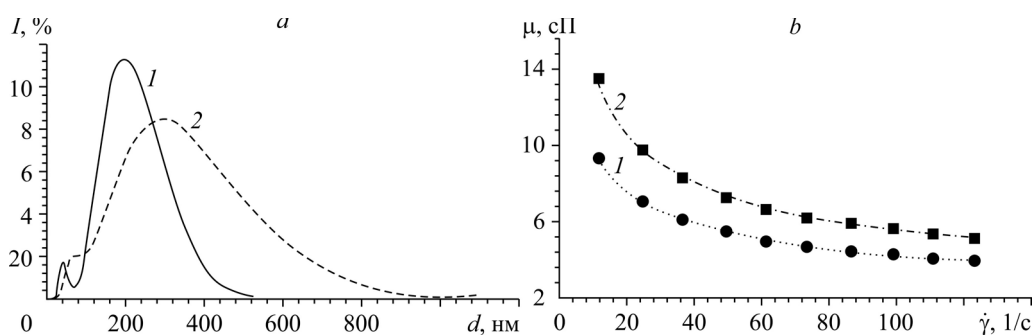


Рис. 7. Сопоставление размеров ОСУНТ (a) и зависимости коэффициента вязкости от скорости сдвига (b) у наножидкостей.

a, b — наножидкости: свежеприготовленная (1) и трёхнедельной давности (2).

рования наножидкости на основе В+СДБС представлен на рис. 6. Центрифугирование осуществлялось на установке с угловой скоростью 14000 об/мин и проводилось в течение 30 минут. Даже после столь непродолжительного центрифугирования длина УНТ уменьшилась примерно на 20 %. Это означает, что были сепарированы наиболее крупные пучки ОСУНТ.

Одной из важных характеристик любой наножидкости является ее стабильность во времени. С течением времени из-за агломерации УНТ свойства наножидкости существенно меняются. На рис. 7a сопоставлены распределения ОСУНТ по размерам в свежеприготовленной (1) и простоявшей три недели (2) наножидкостях. Эти наножидкости были приготовлены на основе раствора В+СДБС, концентрация ОСУНТ и СДБС равнялась 0,3 %. Эффективный размер ОСУНТ вырос больше, чем в полтора раза.

Понятно, что агломерация нанотрубок приводит к существенному изменению теплофизических свойств наножидкостей, в частности, ее вязкости. Это хорошо видно на рис. 7b, где представлены данные о зависимости вязкости от скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  для тех же наножидкостей, что и на рис. 7a. Здесь символы 1 соответствуют свежей наножидкости, а символы 2 — трехнедельной наножидкости. Данная наножидкость является псевдопластической. Ее реология хорошо описывается моделью степенной жидкости. Сопоставление данных, представленных на рис. 7a и 7b, указывает в частности на то, что вязкость зависит от размера структур ОСУНТ. Причем она тем больше, чем больше их средний размер. На практике многие свойства простоявшей некоторое время наножидкости можно вернуть, если ее сначала механически перемешать, а затем подвергнуть ультразвуковой обработке. Однако необходимо учитывать, что при использовании такой обработки высокомолекулярные ПАВ частично деградируют (см. [29, 30]) и полностью свойства наножидкости восстановить не удастся.

### Заключение

Метод динамического рассеяния света, использовавшийся в настоящей работе, позволяет достаточно эффективно измерить коэффициент диффузии ОСУНТ. Следует, однако, отметить, что в достаточно протяженных УНТ можно выделить диффузию вдоль и поперек трубки. Методом динамического света дифференцировать их чрезвычайно сложно. Поэтому представленные данные — это некоторые осредненные по ориентациям значения коэффициента диффузии. В этой связи необходимо указать на еще одно важное обстоятельство. В силу существенной несферичности ОСУНТ наряду с обычной трансляционной диффузией имеет место и их вращательная диффузия. Изучение этого типа диффузии также представляет значительный интерес. Однако ее идентификация по данным динамического рассеяния света фактически невозможна или, по крайней мере, требует разработки специального инструментария.

Величина измеренного коэффициента диффузии зависит от концентрации ОСУНТ. В представленных экспериментах при варьировании концентрации ОСУНТ она изменялась почти в пятнадцать раз.

Используя данные метода ДРС, можно затем получить информацию и о размерах ОСУНТ или их пучков. Очевидно, что ОСУНТ имеют значительное отношение длины трубок (или их пучков) к их диаметру. Это отношение может достигать сотен или даже тысяч. Поэтому использование для интерпретации соотношения (1) позволяет определить лишь эффективный или так называемый гидродинамический радиус (диаметр) ОСУНТ. Этот радиус в разы меньше реальной длины трубок. Последнюю можно определить достаточно точно с помощью формулы (2) или (3), применение которых требует, однако, точного знания диаметра нанотрубок или их пучков. Точный диаметр изолированной ОСУНТ известен, он равен 1,6 нм. Этим значением можно пользоваться при интерпретации данных о диффузии сильно разбавленных наножидкостей. Однако в общем случае в наножидкости присутствуют пучки нанотрубок, средний диаметр которых существенно превышает диаметр изолированной трубки. Поэтому, чтобы по данным о коэффициенте диффузии правильно восстановить длину нанотрубок, необходимо параллельно проводить их исследование с помощью электронной микроскопии. Традиционно используемый при этом метод выпаривания дает искаженную картину.

При создании наножидкостей с ОСУНТ важное значение имеет используемый ПАВ. Эффективность применения того или иного ПАВ требует специального обсуждения. Здесь только отметим, что, как показано в настоящей работе, использование СДБС оказывается более эффективным, чем ПВП (см. рис. 5). При этом следует иметь в виду, что сложность ПВП зависит от параметра  $n$ , определяющего сложность структуры ПВП. Поэтому эффективность использования ПВП в качестве ПАВ будет зависеть от величины этого параметра.

Авторы признательны А.А. Хасину за стимулирующие дискуссии и компании ОС-SiAl (Новосибирск), на базе которой проводились эксперименты.

### Список литературы

1. Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon // *Nature*. 1991. Vol. 354. P. 56–58.
2. Bethune D.S., Klang C.H., de Vries M.S. et al. Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls // *Nature*. 1993. Vol. 363. P. 605–612.
3. Journet C., Maser W.K., Bernier P. et al. Large-scale production of single-walled carbon nanotubes by the electric-arc technique // *Nature*. 1997. Vol. 388. P. 756–761.
4. Nahm M.G., Hashim D.P., Vajtai R., Ajayan P.M. A review: controlled synthesis of vertically aligned carbon nanotubes // *Carbon Lett*. 2011. Vol. 12. P. 185–199.
5. Ajayan P.M. Bulk metal and ceramics nanocomposites // *Nanocomposite Sci. and Technology* / Eds. P.M. Ajayan, L.S. Schadler, P.V. Braun. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2004. P. 1–27.
6. Зарубин В.С., Савельева И.Ю., Сергеева Е.С. Оценки эффективности коэффициентов теплопроводности углеродных нанотрубок // *Инженерно-физический журнал*. Т. 91, № 5. С. 1342–1350.



7. **Yakobson B.I., Brabec C.J., Ebbesen T.W., Gibson J.M.** Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon NT // *Nature*. 1996. Vol. 381. P. 678–681.
8. **Saeed Ê., Ibrahim Ê.** Carbon nanotubes—properties and applications: a review // *Carbon Letters*. 2013. Vol. 14, No. 3. P. 131–144.
9. **Espinosa C., Ortiz-Trujillo I.C., Carlos-Cornelio J.A., Zapata-Hernández R.D., Hoyos-Palacio L.M.** Carbon nanotube dispersion for in-vitro applications // *DYNA*. 2017. Vol. 84, No. 203. P. 24–30.
10. **Saxena H.G., Raj J.** A critical review on applications of nano-fluid as coolant // *Int. J. Engng and Management Research*. 2017. Vol. 7, Iss. 1. P. 304–311.
11. **Банмова Ю.А., Мулюков Р.Р.** Графен, нанотрубки и другие углеродные наноструктуры. М.: Изд. РАН, 2018. 212 с.
12. **Крестинин А.В.** Эффективность применения углеродных нанотрубок для упрочнения конструкционных материалов // *Российские нанотехнологии*. 2019. Т. 14, № 9–10. С. 18–34.
13. **Yang Y., Grulke E.A., Zhanh Z.G., Wu G.** Thermal and rheological properties of carbon nanotube-in-oil dispersions // *J. Appl. Phys.* 2006. Vol. 99. P. 114307.
14. **Ponmozhi J., Gonçalves F.A.M.M., Feirrer A.G.M., Fonseca I.M.A., Kanagaraj S., Martins M., Oliveira M.S.A.** Thermodynamic and transport properties of CNT water based nanofluids // *J. Nano Res.* 2010. Vol. 11. P. 101–106.
15. **Phuoc T.X., Massoudi M., Chen R.H.** Viscosity and thermal conductivity of nanofluids containing multi-walled carbon nanotubes stabilized by chitosan // *Intern. J. Thermal. Sci.* 2011. Vol. 50. P. 12–18.
16. **Singh N., Chang G., Kanagaraj S.** Investigation of thermal conductivity and viscosity of carbon nanotube-ethylene glycol nanofluids // *Heat Transfer Engng.* 2012. Vol. 33. P. 821–827.
17. **Sadri R., Ahmadi G., Togun H., Dahari M., Kazi S.N., Sadeghinezhad E., Zubir N.** An experimental study of thermal conductivity and viscosity of nanofluids containing carbon nanotubes // *Nanoscale Research Letters*. 2014. Vol. 9. P. 151–164.
18. **Estellé P., Halelfad S., Maré T.** Thermophysical properties and heat transfer performance of carbon nanotubes water-based nanofluids // *J. Thermal Analysis Calorimetry*. 2017. Vol. 127, No. 3. P. 2075–2081.
19. **Lu Q., Freedman K.O., Rao R., Lu Q., Freedman K.O., Huang R.G., Lee J., Larcom L.L., Rao A.M., Ke P.C.** Diffusion of carbon nanotubes with single-molecule fluorescence microscopy // *J. Applied Phys.* 2004. Vol. 96. P. 6772–6781.
20. **Judkins J., Lee H.H., Tung S., Kim J.W.** Diffusion of single-walled carbon nanotube under physiological conditions // *J. Biomedical Nanotechnol.* 2013. Vol. 9, No. 6. P. 1065–1070.
21. **Wei C., Srivastava D., Cho K.** Thermal expansion and diffusion coefficients of carbon nanotube-polymer composites // *Nano Letters*. 2002. Vol. 2, No. 6. P. 647–650.
22. **Feng J., Chen P., Zheng D., Zhong W.** Transport diffusion in deformed carbon nanotubes // *Physica A: Statistical Mech. and its Applications*. 2018. Vol. 493, No. 1. P. 155–161.
23. **Рудяк В.Я., Минаков А.В.** Современные проблемы микро- и нанофлюидики. Новосибирск: Наука, 2016. 296 с.
24. **Nair N., Kim W., Braatz R.D., Strano M.S.** Dynamics of surfactant-suspended single-walled carbon nanotubes in a centrifugal field // *Langmuir*. 2008. Vol. 24. P. 1790–1795.
25. **Dhont J.K.G., Briels W.J.** Rod-like Brownian particles in shear flow. Berlin: WILEY-VCH Verlag Berlin GmbH, 2004. 117 p.
26. **Palazzeci F., Calvareci M., Zerbetto F.** A molecular dynamics investigation of structure and dynamics of SDS and SDBS micelles // *Soft Matter*. 2011. Vol. 7, Iss. 19. P. 9148–9156.
27. **Зимон А.Д.** Коллоидная химия: учебник. М.: Агар, 2003. 320 с.
28. **Цветков В.Н.** Жесткоцепные полимерные молекулы. Л.: Наука, 1986. 380 с.
29. **Рудяк В.Я., Третьяков Д.С.** Вязкость и реология раствора поливинилпирролидона // *Труды ИГАСУ*. 2019. Т. 22, № 2(72). С. 19–30.
30. **Rudyak V.Ya., Trefiakov D.S.** Viscosity and rheology of the ethylene glycol based nanofluids with single-walled carbon nanotubes // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. Vol. 1382. P. 012100.

*Статья поступила в редакцию 19 июня 2020 г.,  
после доработки — 29 июля 2020 г.,  
принята к публикации 5 августа 2020 г.*