

УДК 620.3

Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-521-530

Для цитирования: Применение высокоскоростной гидродинамической технологии для получения графеновых наносупензий из природных графитов / О. П. Стебелева, Л. В. Кашкина, О. А. Вшивкова, А. В. Минаков // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 4. С. 521–530. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-521-530.

For citation: Stebeleva O. P., Kashkina L. V., Vshivkova O. A., Minakov A. V. [Application of high-speed hydrodynamic technology for the production of graphene nanosuspensions from natural graphites]. *Siberian Aerospace Journal*. 2024, Vol. 25, No. 4, P. 521–530. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-521-530.

Применение высокоскоростной гидродинамической технологии для получения графеновых наносупензий из природных графитов

О. П. Стебелева¹, Л. В. Кашкина¹, О. А. Вшивкова², А. В. Минаков¹

¹Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 990041, Красноярск, просп. Свободный, 79

²Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр

Сибирского отделения Российской академии наук»

Российская Федерация, 990036, Красноярск, Академгородок, 50

E-mail: opstebeleva@mail.ru

Углеродные наноструктуры находятся в центре внимания мировой науки более 25 лет, с момента открытия фуллеренов в 1985 г., одностенных углеродных нанотрубок в 1993 г., графена в 2004 г., графеновых квантовых точек в 2004 г. Графен стабилен в условиях окружающей среды и обладает отличными электронными, механическими, химическими, тепловыми и оптическими свойствами. Во всем мире активно проводятся исследования и разработки новых методов применения графена в различных областях, таких как энергетика, нефтедобыча, материаловедение, электроника и т. д. В настоящее время использование графеносодержащих материалов в качестве модификаторов для создания прочных и легких материалов в авиации, автомобилестроении и других отраслях инженерии являются актуальной проблемой. Введение графеновых частиц в состав композиционных материалов целесообразно осуществлять, используя их устойчивые дисперсии в жидкой среде. Получение коллоидных графеновых суспензий во многих случаях эффективно, используя метод жидкофазной эксфолиации графита.

В работе представлены результаты изучения физико-химических свойств водных графеновых суспензий, полученных методом жидкофазной эксфолиации природных графитов высокоскоростной гидродинамической технологии. Графиты марок ГК-1 и ГАК-2 (ГрафитСервис, Челябинск, РФ) – это кристаллические графиты, полученные с помощью обогащения графитовых руд и совместном обогащении природных графитовых руд и графитосодержащих отходов металлургических производств соответственно. Графитовые суспензии были приготовлены на дистиллированной воде с 1 масс. % графита, к некоторым образцам было добавлено поверхностно-активное вещество (ПАВ), время обработки 3–120 мин, скорость вращения ротора 4 000–11 000 об/мин. Полученные графеновые суспензии были исследованы методами РФА, электронной микроскопией и седиментационного анализа на электроакустическом спектрометре DT-1202. Наличие многослойного графена подтверждено сопоставлением результатов РФА с литературными данными. Наряду с многослойным графеном обнаружено присутствие графеновых точек. Получены водные графеновые суспензии для графитов с различным временем седиментации. Для графита ГАК-2 – шесть суток, для графита ГК-1 – 90 суток, для графита ГК-1 + ПАВ – 6 месяцев.

Ключевые слова: графен, жидкофазная эксфолиация, гидродинамическая обработка.

Application of high-speed hydrodynamic technology for the production of graphene nanosuspensions from natural graphites

O. P. Stebeleva¹, L. V. Kashkina¹, O. A. Vshivkova², A. V. Minakov¹

¹Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

²Federal Research Center "Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences"

50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 6600361, Russian Federation

E-mail: opstebeleva@mail.ru

Carbon nanostructures have been in the focus of world science for more than 25 years, since the discovery of fullerenes in 1985, single-walled carbon nanotubes in 1993, graphene in 2004, graphene quantum dots in 2004. Graphene is a monocrystalline graphite films (2D material) with a thickness of several atoms that are stable under environmental conditions and they have excellent electronic, mechanical, chemical, thermal and optical properties. All over the world, research and development of new methods of using graphene in various fields such as energy, oil production, materials science, and electronics are actively carried out. Currently, the use of graphene-containing materials as modifiers for the creation of durable and effortless materials in aviation, automotive and other branches of engineering is an urgent problem. It is advisable to introduce graphene particles into the composition of composite materials using their stable dispersions in a liquid medium. The production of colloidal graphene suspensions is effective in many cases using the method of liquid phase exfoliation of graphite.

The paper presents the results of studying the physico-chemical properties of aqueous graphene suspensions obtained by liquid-phase exfoliation of natural graphites using high-speed hydrodynamic technology. Graphite grades GK-1 and GAK-2 (Grafitservice, Chelyabinsk, Russia) are crystalline graphites obtained by enrichment of graphite ores and joint enrichment of natural graphite ores and graphite-containing waste from metallurgical industries, respectively. Graphite suspensions were prepared in distilled water with 1 wt.% graphite, surfactant was added to some samples, processing time (3–120 min), rotor rotation speed (4 000–11 000 rpm). The resulting graphene suspensions were investigated by XRD, by electron microscopy and sedimentation analysis methods. The particle size was determined using the DT-1202 electroacoustic spectrometer. The presence of multilayer graphene is confirmed by comparing the results of XRD with the literature data. Along with multilayer graphene, the presence of graphene dots was detected. Aqueous graphene suspensions for graphites with different sedimentation times have been obtained. For graphite GAK-2 – six days, for graphite GK-1 – 90 days, for graphite GK-1 + surfactant – 6 months.

Keywords: graphene, liquid phase exfoliation, hydrodynamic treatment.

Введение

Двумерные (2D) материалы привлекли внимание в 2004 г., когда было продемонстрировано, что один слой атомов углерода – графен может быть стабильно изолирован от графита [1]. В 2017 г. Международная организация по стандартизации (ISO) установила номенклатуру графена как монокристалла одного слоя, состоящего из атомов углерода, организованных в гексагональную форму решетки (симметрия решетки $p3m1$, группа точек D_3):

- графен: одиночный слой атомов углерода;
- двухслойный графен: два четко определенных слоя графена;
- многослойный графен: состоящий из трех – десяти четко определенных слоев графена;
- графеновые нанопластинки: толщина от 1 до 3 нм и боковые размеры от ≈ 100 нм до 100 мкм [2].

Графен привлекает исследователей из различных научных областей из-за уникальных физических, химических, электрических и оптических свойств. Графен состоит из атомов углерода,

связанных вместе в сотовой структуре и находящихся в состоянии sp^2 -гибридизации. Лист графена имеет атомную толщину, впервые синтезирован путем механического жидкофазного расслоения графита в работе [3]. Синтез графена происходит с помощью двух основных подходов: «снизу вверх» – химическое осаждение из паровой фазы [4], молекулярная эпитаксия [5] и т. д. и «сверху вниз» – механическое расслоение графита [6–8]. Методы расслоения графита до графена страдали от главного недостатка – отсутствия масштабируемости [9]. Прогресс от лабораторных до реальных коммерческих приложений потребовал экономически эффективных методов получения графена.

Высокосдвиговое расслоение стало вероятным кандидатом для решения проблемы масштабируемости. В своей основополагающей работе Патон и др. [10] показали, что, используя высокий сдвиг (гидродинамическая технология), можно получать высококачественный графен в больших количествах. Было показано, что расслоение происходит, когда локальные скорости сдвига превышают 10^4 с^{-1} , а скорость производства графена составляет $1,44 \text{ г ч}^{-1}$, что является высоким значением по сравнению с другими методами, основанными на ультразвуковой обработке. Поскольку метод смешивания с высоким сдвигом широко доступен, авторы утверждают, что их гидродинамическая технология сдвигового расслоения графена может быть легко перенесена в промышленные процессы, тем самым делая бездефектный графен широкодоступным для различных применений.

Разработка и оптимизация процессов получения графеновых суспензий через высокие скорости сдвига (жидкофазную эксфолиацию (ЖЭ)) [11] требуют комплексного подхода, включающего исследование природных ресурсов, разработку технологий и оборудования, а также учет экологических и экономических аспектов. Это направление исследований имеет большой потенциал для инноваций в различных отраслях промышленности. Метод ЖЭ включает расщепление графита на отдельные слои графена с помощью механического воздействия в присутствии подходящего растворителя [12]. Это позволяет получить коллоидные суспензии графена, которые могут быть затем использованы для различных применений. Метод прост в реализации, масштабируем и может обеспечить высокое качество получаемого графена. Он также позволяет контролировать размер и количество слоев графена.

Необходимо искать источники высококачественного графита, который имеет минимальные примеси и высокую кристалличность, что важно для эффективной эксфолиации. Для этой технологии требуется специализированное оборудование, включая гидродинамические генераторы (миксеры), центрифуги для отделения нано- и микрочастиц, а также системы для контроля качества продукта. Важно использовать растворители, которые не наносят вред окружающей среде. Также необходимо разработать методы утилизации отходов производства и минимизации их количества. Оптимальные условия для эксфолиации должны быть найдены с учетом минимизации затрат на энергию, растворители и время процесса. Рассматривается возможность повторного использования растворителей и других материалов.

Целью данной работы было получение графеновых суспензий методом ЖЭ в высокоскоростном миксере и исследование их свойств.

Образцы и методика эксперимента

В качестве исходного материала были выбраны 2 образца графита: графит марки ГК-1 и ГАК-2. Графит ГК-1 предназначен для производства карандашных стержней, его характеристики регламентирует ГОСТ 4404-78. ГК-1 – кристаллический графит, полученный с помощью обогащения графитовых руд. Кристаллическая структура – слоистая. Графит имеет чёрный цвет с серым оттенком. Графит марки ГАК-2 предназначен для производства электродов для аккумуляторов, его характеристики регламентирует ГОСТ 10273-79. ГАК-2 – кристаллический графит, полученный при раздельном или совместном обогащении природных графитовых руд и графитосодержащих отходов металлургических производств. Кристаллическая структура – слоистая. Графит имеет серый цвет с характерным металлическим блеском (табл.1). В некоторые образцы добавлено поверхностно-активное вещество (ПАВ) – поливинилпирролидол (ПВП).

В качестве дисперсионной среды использовалась дистиллированная вода, регламентируемая ГОСТом Р 58144-2018: «Дистиллированная вода. Технические условия».

Таблица 1

Характеристики графита

Параметр	Графит ГК-1	Графит ГАК-2
Зольность, %, не более	1,0	0,5
Массовая доля влаги, % не более	0,5	1
Содержания примеси %, не более	Выход летучих веществ 0,5 Мышьяк 0,0025	Ионы хлора 0,1 Железо 0,5 %.

Конструкционные особенности миксеров ИКА Т25 (Германия) и JRJ300D-1 (Китай) представлены на рис. 1, технические характеристики приведены в табл. 2. Принцип работы миксеров можно описать следующим образом. Обрабатываемая жидкость поступает в рабочую зону диспергатора снизу через отверстия. Лопатки ротора приводят жидкость в быстрое движение. Жидкость выходит из отверстий с высокой скоростью, создавая интенсивные потоки, которые оказывают воздействие на жидкость.

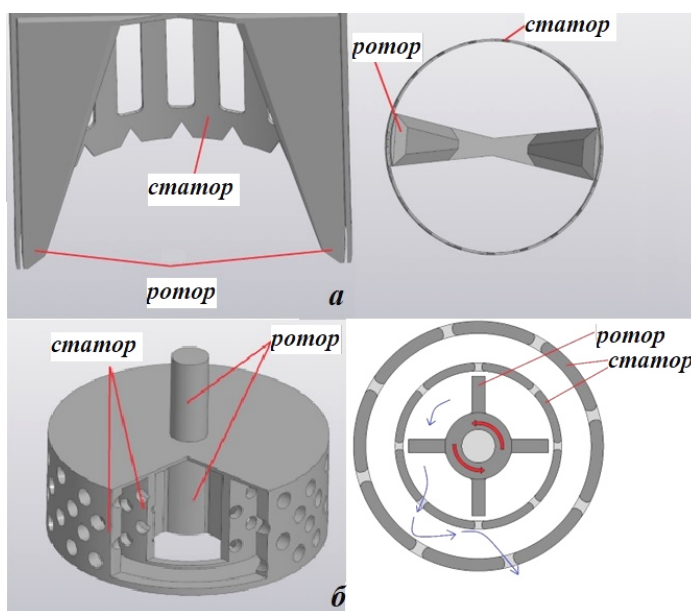


Рис. 1. Конструкция ротор-статор в миксере ИКА Т25 (а) и JRJ300D-1 (б)

Fig. 1. Rotor-stator design in the mixer I KAT 25 (a) and JRJ300D-1 (b)

Таблица 2

Технические характеристики миксеров

Параметр	Миксер ИКА Т-25	Миксер JRJ300D-1
Выходная мощность двигателя, Вт	400	300
Диапазон вращения, об/мин	3000–25000	200–11000
Рабочий объём, мл	1–2000	500–40000
Диаметр ротора, мм	13,4	29
Диаметр статора, мм	18	Внутренний: 30 Внешний: 70

Обработку суспензий проводили на двух миксерах – это ИКА Т25 и JRJ300D-1. Водные суспензии исходных графитов были приготовлены с помощью магнитной мешалки. Каждый образец был приготовлен с концентрацией графита 1 масс. % в суспензии. Седиментационный

анализ был проведен визуально для 25 образцов с различными параметрами приготовления. Для дальнейших исследований были выбраны образцы из числа стабильных в течение недели суспензий. Седиментация образцов проходила по-разному, некоторые образцы сразу выпали в осадок, например образец 3, другие были стабильно несколько суток и месяцев (рис. 2).

Для приготовления образцов (образцы 1–7) на миксере ИКА Т25 были смешаны вода объемом 125 мл и графит массой 1,25 г. В образцы 4, 6, 7 был добавлен ПАВ массой 1,25 г. Для приготовления образцов 8–16 на миксере JRJ300D-1 взяли минимально допустимый объем жидкости для миксера 500 мл и графит массой 5 гр. В образцы 15 и 16 был добавлен ПАВ массой 5 г. Параметры обработки и тип графита представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры обработки графита

Номер образца	Обороты миксера, об/мин	Время обработки, мин	Марка графита	ПАВ	Тип миксера
1	9500	120	ГAK-2	–	ИКА Т25
2	9500	60	ГK-1	–	ИКА Т25
3	9500	120	ГK-1	–	ИКА Т25
4	9500	60	ГK-1	+	ИКА Т25
5	9500	60	ГAK-2	–	ИКА Т25
6	9500	60	ГAK-2	+	ИКА Т25
7	9500	30	ГAK-2	+	ИКА Т25
8	9500	60	ГAK-2	–	JRJ300D-1
9	4000	10	ГAK-2	–	JRJ300D-1
10	7000	10	ГAK-2	–	JRJ300D-1
11	7000	10	ГK-1	–	JRJ300D-1
12	9500	3	ГK-1	–	JRJ300D-1
13	11000	5	ГAK-2	–	JRJ300D-1
14	11000	5	ГK-1	–	JRJ300D-1
15	11000	5	ГK-1	+	JRJ300D-1
16	11000	5	ГAK-2	+	JRJ300D-1

В работе использовался спектрометр DT-1202. Для описания функции распределения частиц были использованы бимодальная и нормальная функции.

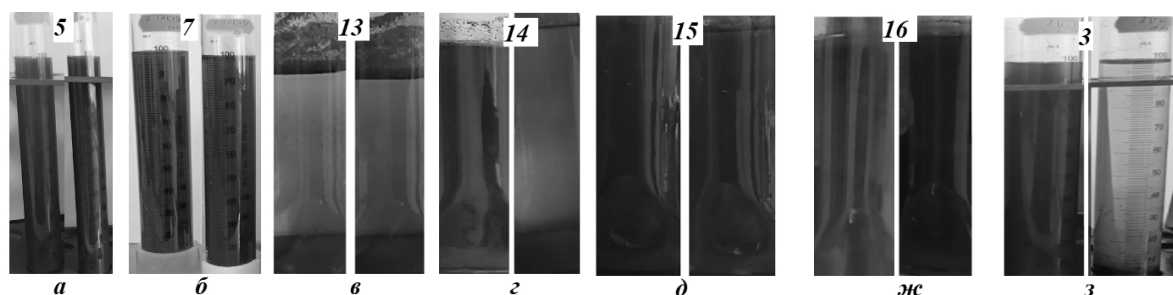


Рис. 2. Седиментация образцов суспензий сразу после приготовления (слева) и через 6 суток: 5 (а), 7 (б), 13 (в), 14 (г), 15 (д), 16 (ж) и 3 (з) сразу после приготовления и на следующий день

Fig. 2. Sedimentation of suspension samples immediately after preparation (left) and after 6 days: 5 (a), 7 (b), 13 (v), 14 (z), 15 (d), 16 (zh) and 3 (z) immediately after preparation and the next day

Для рентгенофазового анализа на дифрактометре ДРОН-3 суспензии были высушены в сушильном шкафу при температуре 70 °С в течение 2 ч. Микроструктура графена исследована с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEOL JEM-2100 (при ускоряющем напряжении 200 kV), оборудованного энергодисперсионным спектрометром Oxford Inca x-sight.

Результаты и обсуждение

Во время обработки в миксере жидкость выходит из отверстий с высокой скоростью, создавая интенсивные потоки. Этого достаточно для преодоления Ван-дер-Ваальсовых сил между слоями графита, что приводит к их расслоению. В работе [13] предполагается, что процесс диспергирования сопровождается эффектами кавитации. Кавитационные пузырьки образуются в различных точках и вносят дополнительную энергию в процесс диспергирования, способствуя более равномерному и тонкому расслоению. Кроме того, при гидродинамическом диспергировании наблюдаются активные столкновения твердых частиц, что вносит заметный вклад в конечный результат диспергирования.

Размер частиц исходных графитов представляет собой бимодальное распределение (рис. 3, *а*). Размеры дисперсной фазы в получаемых графеновых коллоидах (образцы 15 и 16) описаны как с нормальным распределением, так и бимодальным (образцы 13 и 14).

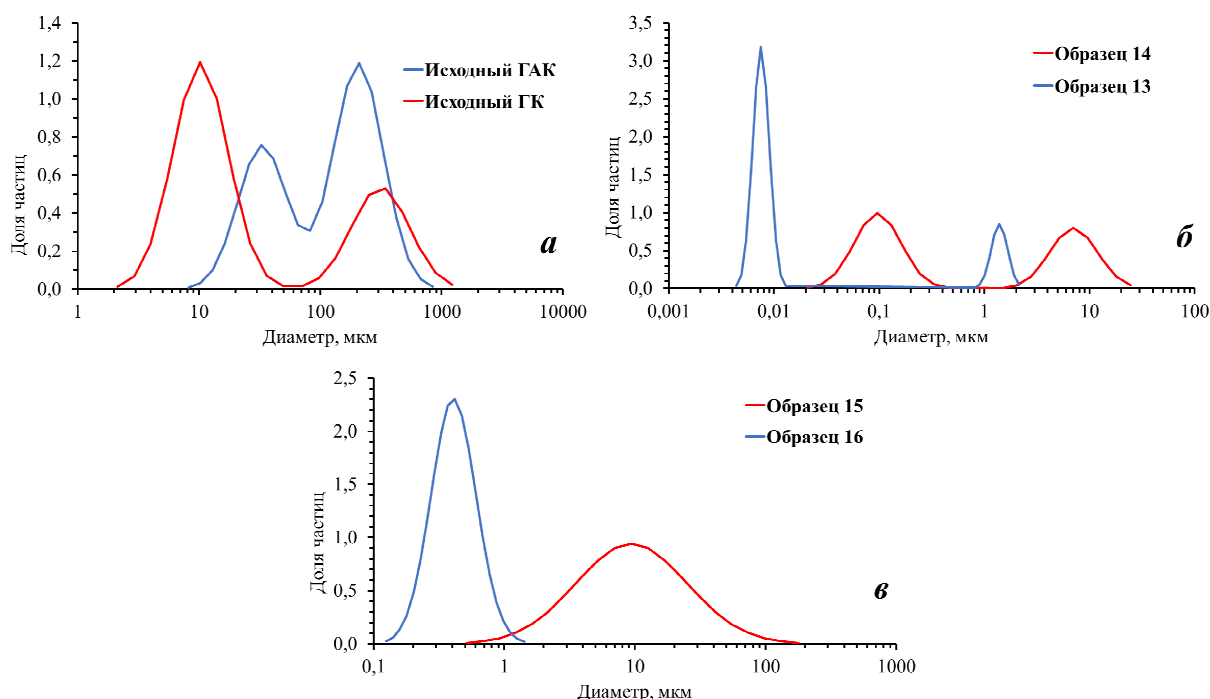


Рис. 3. Распределение частиц в исходных образцах графита (*а*) и графеновой суспензии после гидродинамической обработки в миксере (*б*, *в*)

Fig. 3. Particle distribution in the initial samples of graphite (*a*) and graphene suspension after hydrodynamic treatment in a mixer (*б*, *в*)

Параметры исследуемых образцов, полученные в результате акустической спектроскопии, сведены в табл. 4. Обработка в миксере JRJ300D-1 (образец 13) значительно уменьшает размер частиц, в 100 и более раз по сравнению с исходным графитом. Добавление поверхностно-активного вещества (ПАВ) не способствует значительному уменьшению размера частиц по сравнению с образцами без его добавления. Однако частицы становятся более однородными по размеру. Кроме того, использование ПАВ позволяет увеличить дзета-потенциал суспензии, что способствует увеличению её стабильности. Обнаружено, что в образцах 13 и 14 присутствуют графеновая фаза нанометрового размера. В образце 13 – 10 нм и в образце 14 – 100 нм. Это так называемые графеновые точки. При определенных условиях их можно преобразовать в графеновые квантовые точки. Окисление графеновых точек активными формами кислорода, которые возникают при кавитационных процессах в воде, приводит к улучшению стабильности графеновой суспензии. Окисленные графеновые точки препятствуют коагуляции графеновой части. Этот эффект показал влияние на стабильность графеновых коллоидов. Образец 14 более стабиль-

лен (90 суток), чем образец 13 (6 суток). Кроме того, на стабильность суспензий влияют примеси, которые присутствуют в исходных образцах графитов.

Таблица 4

Результаты акустической спектроскопии исследуемых образцов

Параметр	Исходный ГАК-2	Образец 13	Образец 16	Исходный ГК-1	Образец 14	Образец 15
Диапазон размеров частиц, мкм	10–600	0,007–3	0,34–0,39	2–1000	0,02–12	0,8–100
Пиковые значения размеров частиц, мкм	30,6 и 204	0,01 и 2	0,36	10,2 и 324	0,1 и 7	8,5
Дзета потенциал, мВ	–4,5 до –9,5	0,2 до –0,96	0,7 до –1,79	–1 до –8,8	5 до –16	–5 до –1,16
Соотношение распределения частиц у правого и левого пиков, %	65 и 35	20 и 80	–	30 и 70	40 и 60	–

На спектре РФА (рис. 4, *а*) наблюдаются узкие пики графита при значениях $2\theta = 11^\circ$, $26,5^\circ$ и 55° с расстоянием 6,8, 3,38 и 1,683 Å соответственно. Там же приведен спектр РФА образца 7, на котором пики, отвечающие за графит, сохранились, но с меньшей интенсивностью. Формирование широкого гало на спектре РФА образца 5 (рис. 4, *а*) может указывать на образование мелкодисперсной рентгеноаморфной фазы. Также отмечается отсутствие пика при значении $2\theta = 11^\circ$. Аналогичный спектр был получен в работе [14]. В ней был осуществлен синтез графена методом восстановления аммиака, а листы графена были охарактеризованы с помощью порошковой рентгеновской дифракции с появлением дифракционных линий C(002) при $2\theta = 26,5^\circ$, расстояние между плоскостями – 3,35 Å. Авторы говорят о типичной структуре графита и присутствии многослойного графена.

Пики графита при рентгенофазовом анализе всегда демонстрируют крайне высокую интенсивность, что затрудняет определение дополнительных фаз в исследуемых образцах (рис. 4, *б*). Для образцов графеновой суспензии после обработки в миксере в течение 5 мин рентгеноаморфность не характерна. Однако интенсивность пиков значительно снижается на 40 % для образца 13 и на 26 % для образца 14 от исходного. Воздействие высоких скоростей сдвига влияет на отражательную способность исследуемых образцов и увеличивает их дисперсность. Образцы 13 и 14 не демонстрируют широкое гало на спектрах (рис. 4, *б*) [15].

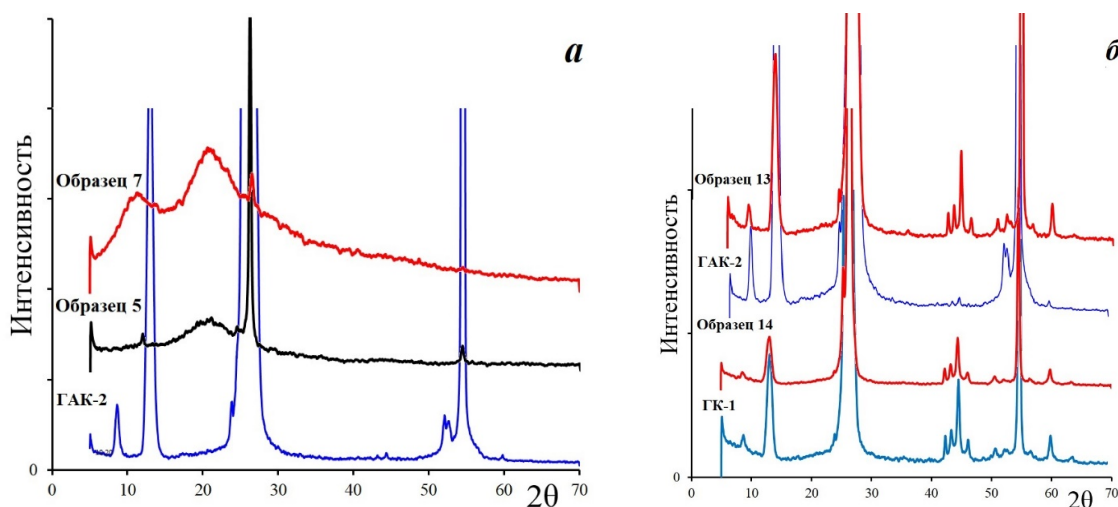


Рис. 4. РФА спектры образцов графита и твердой фракции образцов графеновой суспензии

Fig. 4. X-ray spectra of graphite samples and solid fraction of graphene suspension samples

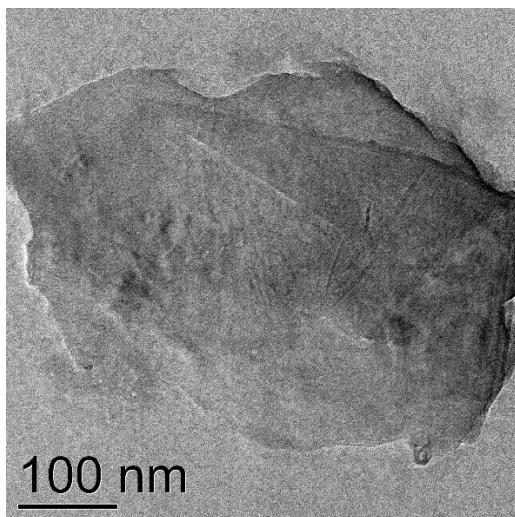


Рис. 5. Твердая фракция графеновой суспензии

Fig. 5. Solid fraction of graphene suspension

На снимке с электронного микроскопа видны прозрачные слои графена (рис. 5), что еще раз доказывает данные РФА и возможность получения графеновой суспензии с помощью жидкофазной эксфолиации из природных графитов.

Заключение

1. Применение высокоскоростной гидродинамической технологии с использованием гидродинамических устройств с большим сдвигом позволяет получить многослойные графеновые частицы с латеральным размером до 12 мкм.

2. Выбраны режимы работы двух гидродинамических устройств (высокоскоростные миксеры ИКА Т25 (Германия) и JRJ300D-1 (Китай). Исследуемые промышленные графиты ГК-1, ГАК-2, полученные на основе природных графитов, могут успешно использоваться для получения многослойного графена путем жидкофазной эксфолиации.

3. При диспергировании графитов образуются графеновые точки, (осколки графеновых частиц) размером от 10 до 100 нм.

4. Окисление графеновых точек активными формами кислорода, которые возникают при кавитационных процессах в воде, приводит к улучшению стабильности графеновой суспензии. Окисленные графеновые точки препятствуют коагуляции графеновых частиц.

5. Получены водные графеновые суспензии для графитов ГК-1, ГАК-2 с различным временем седиментации. Для графита ГАК-2 – шесть суток, для графита ГК-1 – 90 суток, для графита ГК-1+ПАВ – 6 месяцев.

6. Наличие примесей в графитовой суспензии ухудшают процесс жидкофазной эксфолиации графита и стабильность получаемых графеновых суспензий.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00593, <https://rscf.ru/project/24-29-00593/>.

Acknowledgements

This work has been supported by the grants the Russian Science Foundation № 24-29-00593, <https://rscf.ru/en/project/24-29-00593/>.

Библиографические ссылки

1. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films / K. S. Novoselov et al. // *Science*. 2004. Vol. 306, No. 5696. P. 666–669.
2. The Worldwide Graphene Flake Production / A. P. Kauling et al. // *Advanced Materials*. 2018. Vol. 30, No. 44. P. 1803784.
3. Chen J., Duan M., Chen G. Continuous mechanical exfoliation of graphene sheets via three-roll mill // *J. Mater. Chem.* 2012. Vol. 22, No. 37. P. 19625.
4. Kamel M. S. A., Oelgemöller M., Jacob M. V. Chemical vapor deposition-grown graphene transparent conducting electrode for organic photovoltaics: Advances towards scalable transfer-free synthesis // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 203. P. 114740.
5. Nanda V. Heterogeneous Epitaxy: Designed Peptides Scale Graphene's Surface // *Biophysical Journal*. 2016. Vol. 110, No. 11. P. 2291–2292.
6. A review of low-cost approaches to synthesize graphene and its functional composites / A. Rasyotra et al. // *J Mater Sci*. 2023. Vol. 58, No. 10. P. 4359–4383.
7. Production and processing of graphene and related materials / C. Backes et al. // *2D Mater*. 2020. Vol. 7, No. 2. P. 022001.
8. Sonication-enhanced microfluidization for low-cost graphite exfoliation / J. C. F. Johnner et al. // *Emergent mater*. 2024.
9. Yi M., Shen Z. Kitchen blender for producing high-quality few-layer graphene // *Carbon*. 2014. Vol. 78. P. 622–626.
10. Scalable production of large quantities of defect-free few-layer graphene by shear exfoliation in liquids / K. R. Paton et al. // *Nature Mater*. 2014. Vol. 13, No. 6. P. 624–630.
11. High-yield production of graphene by liquid-phase exfoliation of graphite / Y. Hernandez et al. // *Nature Nanotech*. 2008. Vol. 3, No. 9. P. 563–568.
12. Synthesis of atomically thin sheets by the intercalation-based exfoliation of layered materials / R. Yang et al. // *Nat. Synth*. 2023. Vol. 2, No. 2. P. 101–118.
13. A green, rapid and size-controlled production of high-quality graphene sheets by hydrodynamic forces / L. Liu et al. // *RSC Adv*. 2014. Vol. 4, No. 69. P. 36464–36470.
14. New Route to Synthesize of Graphene Nano Sheets / R. Siburian et al. // *Orient. J. Chem*. 2018. Vol. 34, No. 1. P. 182–187.
15. Scalable high yield exfoliation for monolayer nanosheets / Z. Wang et al. // *Nat Commun*. 2023. Vol. 14, No. 1. P. 236.

References

1. Novoselov K. S. et al. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*. 2004, Vol. 306, No. 5696, P. 666–669.
2. Kauling A. P. et al. The Worldwide Graphene Flake Production. *Advanced Materials*. 2018, Vol. 30, No. 44, P. 1803784.
3. Chen J., Duan M., Chen G. Continuous mechanical exfoliation of graphene sheets via three-roll mill. *J. Mater. Chem.* 2012, Vol. 22, No. 37, P. 19625.
4. Kamel M. S. A., Oelgemöller M., Jacob M. V. Chemical vapor deposition-grown graphene transparent conducting electrode for organic photovoltaics: Advances towards scalable transfer-free synthesis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024, Vol. 203, P. 114740.
5. Nanda V. Heterogeneous Epitaxy: Designed Peptides Scale Graphene's Surface. *Biophysical Journal*. 2016, Vol. 110, No. 11. P. 2291–2292.
6. Rasyotra A. et al. A review of low-cost approaches to synthesize graphene and its functional composites. *J Mater Sci*. 2023, Vol. 58, No. 10, P. 4359–4383.
7. Backes C. et al. Production and processing of graphene and related materials. *2D Mater*. 2020, Vol. 7, No. 2, P. 022001.

8. Johnner J. C. F. et al. Sonication-enhanced microfluidization for low-cost graphite exfoliation. *Emergent mater.* 2024.
9. Yi M., Shen Z. Kitchen blender for producing high-quality few-layer graphene. *Carbon.* 2014, Vol. 78, P. 622–626.
10. Paton K. R. et al. Scalable production of large quantities of defect-free few-layer graphene by shear exfoliation in liquids. *Nature Mater.* 2014, Vol. 13, No. 6, P. 624–630.
11. Hernandez Y. et al. High-yield production of graphene by liquid-phase exfoliation of graphite. *Nature Nanotech.* 2008, Vol. 3, No. 9, P. 563–568.
12. Yang R. et al. Synthesis of atomically thin sheets by the intercalation-based exfoliation of layered materials. *Nat. Synth.* 2023, Vol. 2, No. 2, P. 101–118.
13. Liu L. et al. A green, rapid and size-controlled production of high-quality graphene sheets by hydrodynamic forces. *RSC Adv.* 2014, Vol. 4, No. 69, P. 36464–36470.
14. Sibirian R. et al. New Route to Synthesize of Graphene Nano Sheets. *Orient. J. Chem.* 2018, Vol. 34, No. 1, P. 182–187.
15. Wang Z. et al. Scalable high yield exfoliation for monolayer nanosheets. *Nat Commun.* 2023, Vol. 14, No. 1, P. 236.

© Стебелева О. П., Кашкина Л. В., Вшивкова О. А., Минаков А. В., 2024

Стебелева Олеся Павловна – кандидат технических наук, доцент кафедры ТТиГД; Сибирский федеральный университет. E-mail: opstebeleva@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9559-1522>

Кашкина Людмила Васильевна – кандидат физико-математических наук, доцент; Сибирский федеральный университет. E-mail: sfugeo@mail.ru.

Вшивкова Ольга Антоновна – кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник; КНЦ СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН. E-mail: oavshivkova@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-0779-3547>

Минаков Андрей Викторович – доктор физико-математических наук, директор ИИФирЭ; Сибирский федеральный университет. E-mail: tov-andrey@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1956-5506>

Stebeleva Olesya Pavlovna – Cand. Sc., Associate Professor; Siberian Federal University. E-mail: opstebeleva@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9559-1522>

Kashkina Lyudmila Vasilevna – Cand. Sc., Associate Professor; Siberian Federal University. E-mail: sfugeo@mail.ru.

Vshivkova Olga Antonovna – Cand. Sc., Junior Research Assistant; Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”. E-mail: oavshivkova@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-0779-3547>

Minakov Andrey Victorovich – Dr. Sc., Director of the Institute; Siberian Federal University. E-mail: tov-andrey@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1956-5506>

Статья поступила в редакцию 15.11.2024; принята к публикации 25.11.2024; опубликована 26.12.2024

The article was submitted 15.11.2024; accepted for publication 25.11.2024; published 26.12.2024