

**ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО ГРАФИТА В ВОДНОЙ СРЕДЕ****А.В. Находнова, Е.А. Данилов, Н.Н. Гончарова, А.В. Ворхлик, В.М. Самойлов**

Анастасия Васильевна Находнова, Егор Андреевич Данилов (ORCID 0000-0002-1986-3936)\*, Наталья Николаевна Гончарова, Артем Викторович Ворхлик  
АО «НИИГрафит», Электродная ул., 2, Москва, Российская Федерация, 111524  
E-mail: AVNakhodnova@rosatom.ru, EgADanilov@rosatom.ru\*, NNiGoncharova@rosatom.ru, artemvorkhlik@mail.ru

Владимир Маркович Самойлов (ORCID 0000-0002-9861-905X)  
АО «НИИГрафит», Электродная ул., 2, Москва, Российская Федерация, 111524.  
РТУ-МИРЭА, просп. Вернадского, 78, Москва, Российская Федерация, 119454  
E-mail: VMSamoylov@rosatom.ru

*В настоящей работе проведена оценка эффективной энергонапряженности, мощности и плотности потока механической энергии ультразвукового излучения, которая передается установками с различной мощностью с цилиндрическими излучателями с различной площадью поперечного сечения (от 0,2 до 1,76 см<sup>2</sup>), а также излучателем грибовидной формы (площадью 1,76 см<sup>2</sup>) при измельчении естественного графита в водных суспензиях. Измерения проводились калориметрическим методом по скорости нагрева жидкости. Было показано, что с уменьшением поперечного сечения ультразвукового излучателя, эффективная мощность передаваемых ультразвуковых механических колебаний увеличивается. С использованием метода лазерной дифракции, а также кондуктометрии и турбидиметрии суспензий, использованных в качестве интегральных методов исследования, получены зависимости средних размеров частиц, электропроводности и мутности водных суспензий естественного графита от эффективной мощности ультразвукового излучения для двух установок с различной акустической мощностью при времени обработки 1 и 6 ч. Измерения показали уменьшение среднего размера частиц, рост электропроводности и мутности суспензий при увеличении эффективной мощности, передаваемой ультразвуковым излучателем. Также показано, что увеличение эффективной передаваемой мощности на излучателе в 4 раза (от примерно 7 до 28 Вт) не приводит к заметному изменению размеров частиц, однако при этом заметно повышается удельная электропроводность и мутность суспензий. Достигнутый уровень размеров частиц (менее 10 мкм), электропроводности (более 150 мкСм/см) и мутности (около 300 NTU) суспензий позволяет говорить о протекании процесса эксфолиации естественного графита с получением малослойных графеновых частиц на основе опубликованных экспериментальных данных. Полученные в работе результаты важны для проектирования промышленных установок получения графена.*

**Ключевые слова:** естественный графит, ультразвук, водная суспензия, размер частиц, электропроводность

**Для цитирования:**

Находнова А.В., Данилов Е.А., Гончарова Н.Н., Ворхлик А.В., Самойлов В.М. Влияние формы ультразвукового излучателя на интенсивность измельчения естественного графита в водной среде. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 7. С. 115–121. DOI: 10.6060/ivkkt.20226507.6675.

**For citation:**

Nakhodnova A.V., Danilov E.A., Goncharova N.N., Vorkhlik A.V., Samoilov V.M. Influence of the shape of the ultrasonic emitters on the emission power and intensity of graphite exfoliation. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 7. P. 115–121. DOI: 10.6060/ivkkt.20226507.6675.

## INFLUENCE OF THE SHAPE OF THE ULTRASONIC EMITTERS ON THE EMISSION POWER AND INTENSITY OF GRAPHITE EXFOLIATION

A.V. Nakhodnova, E.A. Danilov, N.N. Goncharova, A.V. Vorkhlik, V.M. Samoilov

Anastasiya V. Nakhodnova, Egor A. Danilov (ORCID 0000-0002-1986-3936)\*, Natalia N. Goncharova, Artem V. Vorkhlik

АО «НИИgraphite», Elektrodnaya st., 2, Moscow, 111524, Russia

E-mail: AVNakhodnova@rosatom.ru, EgADanilov@rosatom.ru\*, NNGoncharova@rosatom.ru, artemvorkhlik@mail.ru

Vladimir M. Samoilov (ORCID 0000-0002-9861-905X)

АО «НИИgraphite», Elektrodnaya st., 2, Moscow, 111524, Russia

MIREA – Russian Technological University, Vernadsky ave., 78, Moscow, 119454, Russia

E-mail: VMSamoylov@rosatom.ru

*In the present paper, an assessment of the effective energy intensity, power and density of the flow of mechanical energy of ultrasonic radiation, which is transmitted by installations with different power with cylindrical emitters with different cross-section area (from 0.2 to 1.76 cm<sup>2</sup>), as well as one mushroom-shaped emitter (cross-section 1.76 cm<sup>2</sup>) during the grinding of natural graphite in aqueous suspensions, was carried out. Measurements were performed by calorimetric method based on the heating rate of liquid. It has been shown that with decrease in the cross-section of the ultrasonic emitter, effective power of the transmitted ultrasonic mechanical vibrations increases. Using laser diffraction technique, as well as conductometry and turbidimetry of suspensions as integral research methods, the dependences of average particle sizes, electrical conductivity and turbidity of aqueous suspensions of natural graphite on the effective power of ultrasonic radiation for two installations with different acoustic power at processing time of 1 and 6 h were obtained. These results showed decrease in the average particle size, increase in the electrical conductivity and turbidity of suspensions with increase in the effective power transmitted by the ultrasonic emitter. It was also shown that increase in the effective transmitted power at the emitter 4 times (from about 7 to 28 W) does not lead to a noticeable change in particle size, however, the specific electrical conductivity and turbidity of suspensions significantly increases. Achieved level of average particle sizes (less than 10 μm), electrical conductivity (more than 150 μS/cm) and turbidity (about 300 NTU) of suspensions indicates exfoliation of natural graphite into few-layered graphene particles based on published experimental data. The results obtained in the present work are important for the design of industrial graphene production units.*

**Keywords:** natural graphite, ultrasound, aqueous suspension, particle size, electrical conductivity

### ВВЕДЕНИЕ

Суспензии малослойных графеновых частиц представляют несомненный практический интерес в качестве исходного материала для чернил, компонентов гибкой электроники, прозрачных электродов и др. [1 - 2] В настоящее время используется множество способов получения графеновых суспензий при помощи ультразвука [3 - 9]; особый практический интерес представляют водные суспензии, причем получение ведется, как правило, в присутствии поверхностно-активных веществ (ПАВ) [9 - 12]. Интерес к подобной технологии связан с возможностью получения субмикрон-

ных коллоидных препаратов естественного и искусственного графита [1 - 9], а также с возможностью получения водных суспензий малослойных графенов из естественного графита или высокоориентированного пироуглерода, не прибегая к использованию высокотоксичных компонентов [13 - 15]. Дополнительным преимуществом технологии является ее универсальность и применимость к получению гетероаналогов графена [16].

В связи с этим продолжается поиск достаточно производительных и экологически чистых, применимых для массового производства процессов, позволяющих получать водные суспензии тонкодисперсного графита или графена, для последу-

ющего использования в производстве нанокomпозиционных материалов, источников тока, биосенсоров и т.д. [1 – 5]. Известно, что одним из основных параметров ультразвукового (УЗ) излучения является мощность [5, 6, 13 - 15]. Чем выше генерируемая УЗ-установкой мощность излучения, тем интенсивнее идет измельчение графитовых частиц в водных суспензиях. На эффективную мощность излучения влияет не только мощность УЗ-генератора, но также форма и размер концентратора. Подбрав правильную форму излучателя, можно повысить КПД установки и увеличить мощность УЗ-излучения.

Цель данной работы – оценка влияния формы и размера УЗ-излучателей на эффективную мощность УЗ-излучения и интенсивность процесса измельчения водных суспензий естественного графита.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходного материала использовался естественный графит (ЕГ). Для предварительной очистки от примесей и термического отжига дефектов структуры исходный порошок, содержащий до 10 % масс. минеральных примесей, обрабатывался в графитовых тиглях при температуре 2800 °С в промышленной печи графитации, после чего дополнительно проводилась газотермическая очистка фреоном при температуре 2200 °С. В итоге содержание примесей в полученном графите составляло менее 0,01% масс. Предельные размеры частиц порошка составляли 200 мкм.

Для стимулирования процесса измельчения графита и стабилизации получаемых суспензий использовалась неионогенный фторсодержащий ПАВ (ФПАВ) с брутто-формулой  $C_{26}H_{34}O_{11}F_{20}$ .

В качестве дисперсионной среды для суспензий использовалась вода, очищенная методом обратного осмоса.

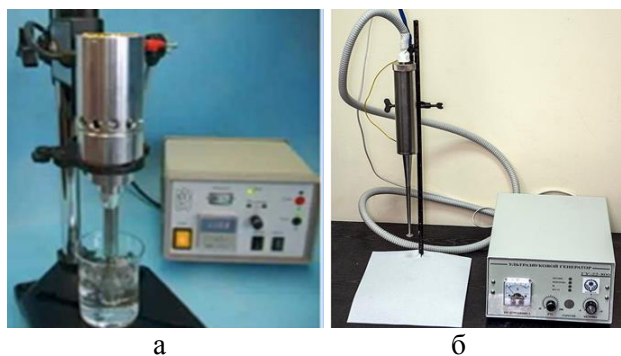


Рис. 1. Установка «Мэлфиз» для диспергирования тонкодисперсных графитов в водных растворах ПАВ (а) и УЗ-генератор ГУ-22-800 (б)

Fig. 1. Device "Melfiz" for dispersion of fine graphite in aqueous solutions of surfactants (a) and ultrasonic generator GU-22-800 (b)

Испытание проводилось на 4 излучателях разного поперечного сечения (рис. 2) на УЗ-установке ГУ-22-800 и на одном грибовидном излучателе на установке «Мэлфиз».

Суспензии получали диспергированием исходного графита ультразвуком с частотой 22,5 кГц на установке «Мэлфиз» МЭФ 391 и на УЗ-установке ГУ-22-800 (рис. 1). Для введения ФПАВ готовили суспензию 300 мг графитового порошка в 50 мл воды (6 мг/мл). ФПАВ добавляли в количестве 30 мг (0,6 мг/мл). Время обработки суспензий ультразвуком составляло 1 и 6 ч на установке «Мэлфиз» и на УЗ-установке ГУ-22-800 при использовании трех разных излучателей.

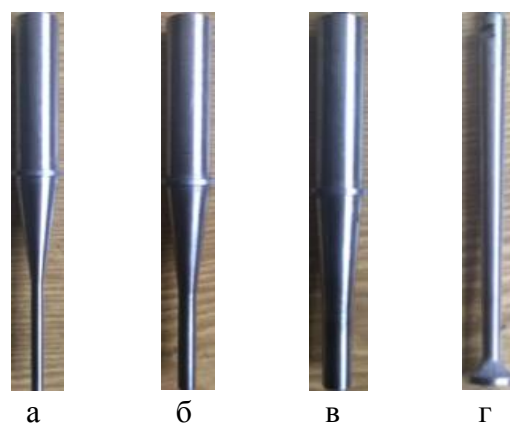


Рис. 2. Ультразвуковые излучатели разной формы и толщины: а – излучатель малого сечения (тип I), б – излучатель среднего сечения (тип II), в – излучатель большого сечения (тип III), г – грибовидный излучатель (тип IV)

Fig. 2. Ultrasonic emitters of various shapes and thicknesses: а – small cross-section emitter (type I), б – medium cross-section emitter (type II), в – large cross-section emitter (type III), г – mushroom-shaped emitter (type IV)

Для нахождения эффективной мощности использовался лабораторный спиртовой термометр и измерительный сосуд емкостью 100 мл.

Распределение по размерам частиц полученных суспензий определяли методом лазерной дифракции (динамическое светорассеяние) на лазерном анализаторе фирмы Fritsch (Германия) «Analysette 22 COMPACT» с диапазоном измерений 0,3 – 300 мкм.

Для проведения анализа электрической проводимости суспензий использовался кондуктометр ProfiLine Cond 3110 фирмы WTW со значением проводимости от 0 до 1000 мкСм/см. Для предотвращения агрегации и седиментации частиц графена, исследуемая суспензия во время измерения электропроводности обрабатывалась ультразвуком в ультразвуковой ванне Bandelin SONOREX.

Анализы турбидиметрическим методом выполнялись на полевом нефелометрическом турбидиметре 2100Q фирмы НАСН. Разбавленная в 100 раз дистиллированной водой исследуемая суспензия наливалась в кювету и помещалась в прибор. Показания прибора снимались 10 раз для каждой пробы. После каждого последующего измерения кювета вынималась и переворачивалась с одинаковой скоростью и на одинаковый угол. Сделано это было для ликвидации пузырьков воздуха и равномерного распределения частиц в кювете в соответствии с методикой определения мутности на приборе данной фирмы и модели, что увеличивало точность измерений. За результат брался средний показатель.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Эксперимент начинался с того, что в стеклянный сосуд наливалось некоторое количество воды комнатной температуры и в него опускался излучатель ультразвука. Объем воды подбирался в предварительных экспериментах так, чтобы вода нагревалась примерно на температуру ( $\Delta t$ ) 10 °С за время  $\tau$ , равное 5 мин, что позволяет достаточно точно измерить температуру нагретой воды при условии ее тщательного перемешивания в течение УЗ-обработки и по ее окончании. Если УЗ-излучатель не обеспечивает турбулентного перемешивания жидкости при ее обработке, необходимо дополнительно перемешать воду для ее однородного по объему нагрева, например, перемещая время от времени излучатель по объему. Предварительные эксперименты показали, что кривая зависимости температуры воды от времени при УЗ-обработке с выбранными значениями исходной температуры и объема воды близка к линейной. Общая методика адаптирована по [17, 18].

Мощность УЗ-энергии, передаваемая воде, рассчитывалась по формуле:

$$W_{ef} = \frac{Vc\Delta t}{\tau}, \quad (1)$$

где  $W_{ef}$  – мощность УЗ-энергии, Вт, передаваемая УЗ-излучателем в жидкую среду;  $V$  – объем воды, л;  $c$  – теплоемкость жидкости;  $\Delta t$  – увеличение температуры жидкости за время  $\tau$ ;  $\tau$  – время УЗ-обработки, с.

Эффективная энергонапряженность УЗ-излучения определялась по формуле:

$$E_{ef} = \frac{W_{ef}}{V_{liq}} = \frac{c\Delta t}{\tau}. \quad (2)$$

Эффективная плотность потока УЗ-излучения определялась по формуле:

$$I_{ef} = \frac{W_{ef}}{S}, \quad (3)$$

где  $S$  – площадь сечения излучателя.

При расчете переданной мощности пренебрегалось теплоемкостью сосуда и тепловыми потерями во внешнюю среду. Теплоемкость раствора полагалось равной теплоемкости воды. За счет этих приближений рассчитанное значение мощности будет слегка заниженным сравнительно с действительным значением.

Результаты измерений мощности излучателей представлены в таблице.

**Таблица**

**Результаты определения эффективной энергонапряженности, мощности и плотности потока УЗ-генератора для разных типов излучателей**

**Table. Results of the effective energy intensity, power and flux density of the ultrasonic generator for different types of emitters**

Тип УЗ-генератора	ГУ-22-800				«Мэлфиз»
	I	II	III	IV	IV
Тип излучателя					
$S$ , см <sup>2</sup>	0,2	0,44	0,79	1,76	1,76
$\Delta t$ , °С	10	10	9	10	10
$\tau$ , сек	300	300	300	300	300
$V$ , мл	60	50	40	50	200
$W_{ef}$ , Вт	8,36	6,97	5,26	7	28
$I_{ef}$ , Вт/см <sup>2</sup>	42	16	6,7	4	16
$E_{ef}$ , Вт/мл	0,14	0,14	0,13	0,14	0,14

Из данных таблицы можно определить, что на УЗ-установке ГУ-22-800 при увеличении поперечного сечения УЗ-излучателя падает передаваемая мощность и соответственно КПД. Грибовидный УЗ-излучатель имеет примерно такую же мощность, как и УЗ-излучатель среднего сечения. Таким образом, самым эффективным из всех оказался излучатель с самым узким сечением, так как плотность потока на нем оказалась самая высокая. На установке «Мэлфиз» излучатель нагрел в 4 раза больше воды, чем такой же излучатель на УЗ-установке ГУ-22-800 за то же время. Поэтому несмотря на разницу в значениях потребляемой мощности, эффективная мощность УЗ-излучения установки «Мэлфиз» оказалась в 4 раза выше, чем эффективная мощность УЗ-установки ГУ-22-800.

Плотность потока УЗ-излучения оказалась самой большой при использовании излучателя тонкого сечения, и падала при увеличении площади поперечного сечения у излучателей.

Энергонапряженность УЗ-излучения во всех экспериментах оказалась одинаковой, так как это значение зависит от изменения температуры и времени нагрева. Изменение температуры и времени нагрева являются неизменными, потому что являются базовыми для данного эксперимента.

Результаты измерений электропроводности, мутности суспензий и средних размеров частиц при разном времени УЗ-обработки представлены на рис. 3-5.

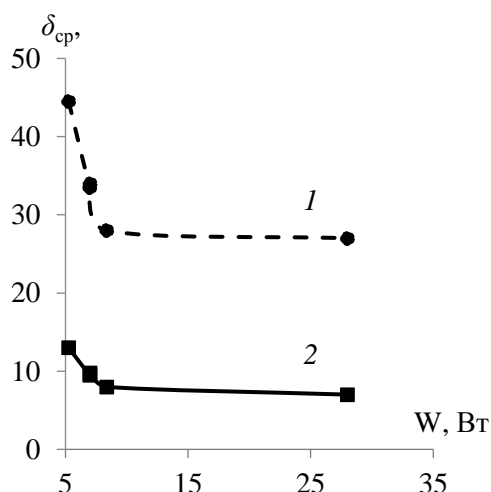


Рис. 3. Зависимость среднего размера частиц графита от мощности излучателя и времени озвучивания суспензии: 1 – 1 ч, 2 – 6 ч  
Fig. 3. Dependence of the average size of graphene particles on the power of the emitter and the time of ultrasonication: 1 – 1 h, 2 – 6 h

Анализируя данные, представленные на рис. 3-5, можно увидеть, что при увеличении времени обработки ультразвуком и мощности УЗ-излучателя, средний размер частиц в суспензиях уменьшался, электропроводность суспензий повышалась, увеличивалась их мутность.

Уменьшение средних размеров частиц в суспензии (см. рис. 3) свидетельствует о росте их количества. Рост количества частиц (относительно исходной суспензии) тем выше, чем выше мощность излучателя и время УЗ-обработки. Увеличение количества проводящих графеновых частиц в суспензии приводит к росту электропроводности (см. рис. 4) и повышению мутности суспензии (см. рис. 5).

Как было показано нами в предшествующих работах [19, 20], обработка суспензии ультразвуком в течении 6 ч позволяла получать суспензии малослойных графенов.

При этом уменьшение среднего размера частиц, рост электропроводности и увеличение мут-

ности суспензии как в зависимости от времени обработки ультразвуком, так в зависимости и от мощности излучателя, являлись косвенными признаками, подтверждающими эффект эксфолиации кристаллитов ЕГ под воздействием ультразвука в присутствии ФПАВ [19, 20]. Как показали результаты данной работы (см. табл. 1), величина дозы инерционной кавитации, необходимой для получения суспензий малослойных графенов в аналогичных условиях эксперимента за 6 ч, соответствует 0,6 МДж, что позволяет говорить об общей энергоэффективности процесса по сравнению с традиционными методами измельчения, например, с использованием шаровых мельниц [21].

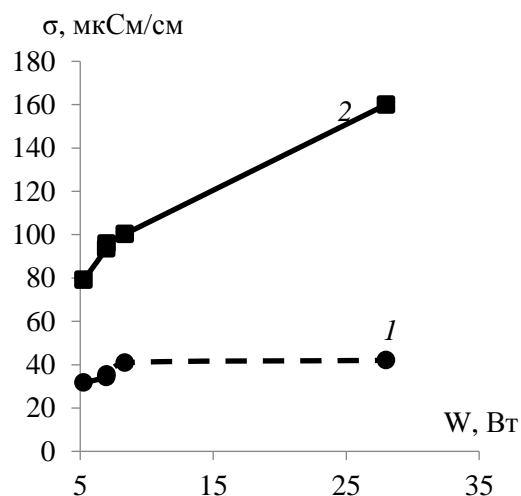


Рис. 4. Зависимость электропроводности суспензий от мощности излучателя и времени воздействия ультразвуком: 1 – 1 ч, 2 – 6 ч

Fig. 4. Dependence of electrical conductivity on the power of the emitter and the time of exposure to ultrasound: 1 – 1 h, 2 – 6 h

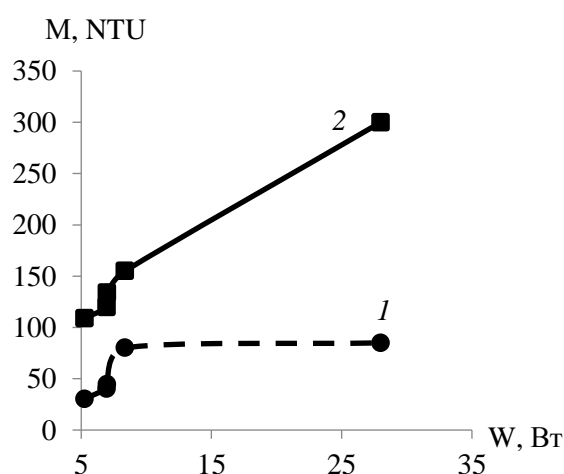


Рис. 5. Зависимость мутности суспензий от мощности излучателя и времени воздействия ультразвуком: 1 – 1 ч, 2 – 6 ч  
Fig. 5. Dependence of turbidity on the power of the emitter and the time of exposure to ultrasound: 1 – 1 h, 2 – 6 h

## ВЫВОДЫ

Таким образом, в ходе проведённых исследований установлено, что на эффективную мощность УЗ-излучения ультразвуковых устройств существенное влияние оказывает размер и форма излучателя. Наиболее эффективным является УЗ-излучатель с самым тонким сечением, так как при его использовании достигается наибольшая эффективная мощность УЗ-излучения. Проведено сравнение эффективной мощности УЗ-излучения двух установок, в ходе которого установка «Мэлфиз» оказалась в 4 раза эффективнее УЗ-установки ГУ-22-800.

Установлено, в результате ультразвуковой обработки размер частиц в графеновых суспензиях уменьшался, а электропроводность и мутность увеличивались, в зависимости от эффективной мощности УЗ-излучателя и увеличением времени обработки.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.*

*The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Novoselov K.S., Fal'Ko V.I., Colombo L., Gellert P.R., Schwab M.G., Kim K. A roadmap for graphene. *Nature*. 2012. V. 490. N 7419. P. 192-200.
2. Franco M., Correia V., Marques P., Sousa F., Silva R., Figueiredo B.R., Bernardes A., Silva A.P., Lanceros-Mendez S., Costa P. Environmentally friendly graphene-based conductive inks for multitouch capacitive sensing surfaces. *Adv. Mater. Interfaces*. 2011. V. 8. N 18. P. 2100578.
3. Xu Y., Cao H., Xue Y., Li B., Cai W. Liquid-phase exfoliation of graphene: an overview on exfoliation media, techniques, and challenges. *Nanomaterials*. 2018. V. 8. N 11. P. 942.
4. Yi M., Shen Z. A review on mechanical exfoliation for the scalable production of graphene. *J. Mater. Chem. A*. 2015. V. 3. N 22. P. 11700-11715.
5. Gu X., Zhao Y., Sund K., Vieira C.L.Z., Jia Z., Cui C., Wang Z., Walsh A., Huang S. Method of ultrasound-assisted liquid-phase exfoliation to prepare graphene. *Ultrason. Sonochem*. 2019. V. 58. 104630.
6. Cai X., Jiang Z., Zhang X., Zhang X. Effects of Tip Sonication Parameters on Liquid Phase Exfoliation of Graphite into Graphene Nanoplatelets. *Nanoscale Res. Lett*. 2018. V. 13. P. 241.
7. Lei Q., Ruibin G., Zunli M., Qijun W. Combination of ultrasonic assisted liquid phase exfoliation process and oxidation-deoxidation method to prepare large- sized graphene. *Carbon Lett*. 2018. V. 25. P. 50 – 54.
8. Green A.A., Hersam M.C. Emerging methods for producing monodisperse graphene dispersions. *J. Phys. Chem. Lett*. 2010. V. 1. N 2. P. 544-549.
9. Ciesielski A., Samori P. Graphene via Sonication Assisted Liquid-Phase Exfoliation. *Chem. Soc. Rev*. 2014. V. 43. P. 381 – 398.
10. Narayan R., Kim S. Surfactant mediated liquid phase exfoliation of graphene. *Nano Convergence*. 2015. V. 2. P. 20.
11. Guardia L., Fernández-Merino M.J., Paredes J.I., Solís-Fernández P., Villar-Rodil S., Martínez-Alonso A., Tascón J.M.D. High-throughput production of pristine graphene in an aqueous dispersion assisted by non-ionic surfactants. *Carbon*. 2011. V. 49. N 5. P. 1653-1662.
12. Lin Z., Karthik P.S., Hada M., Nishikawa T., Hayashi Y. Simple Technique of Exfoliation and Dispersion of Multilayer Graphene from Natural Graphite by Ozone-Assisted Sonication. *Nanomaterials*. 2017. V. 7. P. 125.

## REFERENCES

1. Novoselov K.S., Fal'Ko V.I., Colombo L., Gellert P.R., Schwab M.G., Kim K. A roadmap for graphene. *Nature*. 2012. V. 490. N 7419. P. 192-200.
2. Franco M., Correia V., Marques P., Sousa F., Silva R., Figueiredo B.R., Bernardes A., Silva A.P., Lanceros-Mendez S., Costa P. Environmentally friendly graphene-based conductive inks for multitouch capacitive sensing surfaces. *Adv. Mater. Interfaces*. 2011. V. 8. N 18. P. 2100578.
3. Xu Y., Cao H., Xue Y., Li B., Cai W. Liquid-phase exfoliation of graphene: an overview on exfoliation media, techniques, and challenges. *Nanomaterials*. 2018. V. 8. N 11. P. 942.
4. Yi M., Shen Z. A review on mechanical exfoliation for the scalable production of graphene. *J. Mater. Chem. A*. 2015. V. 3. N 22. P. 11700-11715.
5. Gu X., Zhao Y., Sund K., Vieira C.L.Z., Jia Z., Cui C., Wang Z., Walsh A., Huang S. Method of ultrasound-assisted liquid-phase exfoliation to prepare graphene. *Ultrason. Sonochem*. 2019. V. 58. 104630.
6. Cai X., Jiang Z., Zhang X., Zhang X. Effects of Tip Sonication Parameters on Liquid Phase Exfoliation of Graphite into Graphene Nanoplatelets. *Nanoscale Res. Lett*. 2018. V. 13. P. 241.
7. Lei Q., Ruibin G., Zunli M., Qijun W. Combination of ultrasonic assisted liquid phase exfoliation process and oxidation-deoxidation method to prepare large- sized graphene. *Carbon Lett*. 2018. V. 25. P. 50 – 54.
8. Green A.A., Hersam M.C. Emerging methods for producing monodisperse graphene dispersions. *J. Phys. Chem. Lett*. 2010. V. 1. N 2. P. 544-549.
9. Ciesielski A., Samori P. Graphene via Sonication Assisted Liquid-Phase Exfoliation. *Chem. Soc. Rev*. 2014. V. 43. P. 381 – 398.
10. Narayan R., Kim S. Surfactant mediated liquid phase exfoliation of graphene. *Nano Convergence*. 2015. V. 2. P. 20.
11. Guardia L., Fernández-Merino M.J., Paredes J.I., Solís-Fernández P., Villar-Rodil S., Martínez-Alonso A., Tascón J.M.D. High-throughput production of pristine graphene in an aqueous dispersion assisted by non-ionic surfactants. *Carbon*. 2011. V. 49. N 5. P. 1653-1662.
12. Lin Z., Karthik P.S., Hada M., Nishikawa T., Hayashi Y. Simple Technique of Exfoliation and Dispersion of Multilayer Graphene from Natural Graphite by Ozone-Assisted Sonication. *Nanomaterials*. 2017. V. 7. P. 125.

13. **Кульметьева В.Б., Поносова А.А.** Получение графеносодержащих суспензий диспергированием в водных растворах ПАВ. *Соврем. пробл. науки и образования*. 2015. № 2. С. 1 – 8.
14. **Turner P., Hodnett M., Doray R., Carey J.** Controlled sonication as a route to in-situ graphene flake size control. *Sci. Rep.* 2019. V. 9. P. 8710.
15. **Sebastien H., Matteo B., Jian X.** Liquid-Phase Exfoliation of Graphite into Single- and Few-Layer Graphene with  $\alpha$ -Functionalized Alkanes. *Phys. Chem. Lett.* 2016. V. 7. N 14. P. 2714–2721.
16. **Štengl V., Henych J., Slušná M., Ecorchard P.** Ultrasound exfoliation of inorganic analogues of graphene. *Nanosc. Res. Lett.* 2014. V. 9. P. 167.
17. **Резников И.И., Федорова В.Н., Фаустов Е.В., Зубарев А.Р., Демидова А.К.** Физические основы использования ультразвука в медицине. М.: РНИМУ им. Н.И. Пирогова. 2015. 95 с.
18. **Акопян В.Б., Ершов Ю.А., Щукин С.И.** Ультразвук в медицине, ветеринарии и биологии. М.: Юрайт. 2021. 215 с.
19. **Николаева А.В., Самойлов В.М., Данилов Е.А., Маякова Д.В., Трофимова Н.Н., Абрамчук С.С.** Эффективность применения поверхностно-активных веществ и органических добавок при получении водных суспензий графена из природного графита под воздействием ультразвука. *Перспектив. матер.* 2015. № 2. С. 44 – 56.
20. **Samoilov V.M., Danilov E.A., Nikolaeva A.V., Yerpuleva G.A., Trofimova N.N.** Formation of graphene aqueous suspensions using fluorinated surfactant-assisted ultrasonication of pristine graphite. *Carbon*. 2015. V. 83. P. 38 – 46.
21. **Самойлов В.М., Стрелецкий А.Н.** Влияние сверхтонкого измельчения на кристаллическую структуру и графитируемость углеродных наполнителей. *Химия твердого топлива*. 2004. N 2. P. 53-59.
13. **Kulmetyeva V.B., Ponosova A.A.** Preparation of graphene-containing suspensions by dispersion in aqueous solutions of surfactants. *Sovremen. Probl. Nauki Obrazovaniya*. 2015. N 2. P. 1 – 8 (in Russian).
14. **Turner P., Hodnett M., Doray R., Carey J.** Controlled sonication as a route to in-situ graphene flake size control. *Sci. Rep.* 2019. V. 9. P. 8710.
15. **Sebastien H., Matteo B., Jian X.** Liquid-Phase Exfoliation of Graphite into Single- and Few-Layer Graphene with  $\alpha$ -Functionalized Alkanes. *Phys. Chem. Lett.* 2016. V. 7. N 14. P. 2714–2721.
16. **Štengl V., Henych J., Slušná M., Ecorchard P.** Ultrasound exfoliation of inorganic analogues of graphene. *Nanosc. Res. Lett.* 2014. V. 9. P. 167.
17. **Reznikov I.I., Fedorova V.N., Faustov E.V., Zubarev A.R., Demidova A.K.** Physical foundations of the use of ultrasound in medicine. M.: RNIMU im. N.I. Pirogov. 2015. 95 p. (in Russian).
18. **Акopyan V.B., Ershov Yu.A., Shchukin S.I.** Ultrasound in medicine, veterinary medicine and biology. M.: Yurayt. 2021. 215 p. (in Russian).
19. **Nikolaeva A.V., Samoilov V.M., Danilov E.A., Mayakova D.V., Trofimova N.N., Abramchuk S.S.** The effectiveness of the use of surfactants and organic additives in the preparation of aqueous suspensions of graphene from natural graphite under the influence of ultrasound. *Perspektiv. Mater.* 2015. N 2. P. 44 – 56 (in Russian).
20. **Samoilov V.M., Danilov E.A., Nikolaeva A.V., Yerpuleva G.A., Trofimova N.N.** Formation of graphene aqueous suspensions using fluorinated surfactant-assisted ultrasonication of pristine graphite. *Carbon*. 2015. V. 83. P. 38 – 46.
21. **Samoilov V.M., Streletskii A.P.** Influence Effect of ultrafine pulverization on the crystal structure and graphitability of carbonaceous fillers. *Khimiya Tverdogo Topliva*. 2004. N 2. P. 53 - 59 (in Russian).

Поступила в редакцию 20.04.2022  
Принята к опубликованию 20.05.2022

Received 20.04.2022  
Accepted 20.05.2022