

DOI: 10.6060/ivkkt.20206302.6073

УДК: 541.138:541,452:621.357.2

ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА

А.Н. Жанахова, Н.В. Негуторов, Н.В. Пыхова, Б.Ш. Дыскина

Анастасия Николаевна Жанахова *, Бария Шакировна Дыскина

Кафедра Экология и химическая технология, Национальный исследовательский Южно-Уральский государственный университет, просп. им. В.И. Ленина, 76, Челябинск, Российская Федерация, 454080
E-mail: neudchina.a@yandex.ru*, arturdyskin@mail.ru

Николай Васильевич Негуторов

Филиал ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия» им. Профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, 11-й городок, 1, Челябинск, Российская Федерация
E-mail: negutorov44@mail.ru

Надежда Владимировна Пыхова

Кафедра химической технологии и вычислительной химии, Челябинский государственный университет, ул. Братьев Кашириных, 129, Челябинск, Российская Федерация, 454001
E-mail: pihovanv@yandex.ru

Получен терморасширенный графит из тигельного графита Тайгинского месторождения путем обработки олеумом в присутствии окислителя. Полученные образцы терморасширенного графита подверглись ультразвуковому диспергированию в четырех жидких средах (вода, толуол, бензол, ацетон). Показано, что при диспергировании происходит расщепление исходного терморасширенного графита до пластинок с толщиной от нескольких десятков до сотен нанометров. Однако пластинки не являются одиночными, а находятся в хаотическом скоплении друг с другом. Атомы углерода со свободными связями, расположенные по краям пластинок, могут играть важную роль в химических процессах и при адсорбции веществ на поверхности частиц расщепленного графита. Обнаружено, что при ультразвуковой обработке, по сравнению с механическим расщеплением, сохраняется высокая степень совершенства кристаллической структуры, характерной для исходного тигельного графита. Представлено изменение удельной поверхности образцов графита. Основной прирост удельной поверхности частиц при ультразвуковом диспергировании создается за счет увеличения площади вновь образуемых поверхностей при межплоскостном расщеплении пластинок графита. На основе сравнения данного параметра рассмотрено влияние используемых жидкостей на процесс диспергирования. Высокие значения удельной поверхности образцов, расщепленных в бензоле и толуоле, объясняются низкими значениями поверхностного натяжения. Хорошая смачиваемость поверхности графита бензолом, толуолом и ацетоном по сравнению с водой позволяют этим жидкостям проникать глубоко в поры графита, тем самым вызывая максимальное расклинивающее действие при ультразвуковой обработке смеси. Сделаны выводы по выбору оптимальной жидкой среды для диспергирования графита.

Ключевые слова: терморасширенный графит, полярность жидкостей, ультразвуковое диспергирование, кавитация, наноразмерные материалы

FEATURES OF ULTRASONIC SPLITTING OF THERMALLY EXPANDED GRAPHITE

A.N. Zhanakhova, N.V. Negutorov, N.V. Pykhova, B.Sh. Dyskina

Anastasiya N. Zhanakhova *, Bariya Sh. Dyskina

Department of Ecology and Chemical Technology, National Research South Ural State University, Lenina ave., 76, Chelyabinsk, 454080, Russia

E-mail: neudchina.a@yandex.ru*, arturdyskin@mail.ru

Nikolay V. Negutorov

Branch VUNC Air Force "Air Force Academy" named after N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, 11th town, 1, Chelyabinsk, Russia

E-mail: negutorov44@mail.ru

Nadezhda V. Pykhova

Department of Chemical Technology and Computational Chemistry, Chelyabinsk State University, Bratyev Kashirinykh st., 129, Chelyabinsk, 454001, Russia

E-mail: pihovanv@yandex.ru

Thermally expanded graphite is obtained from crucible graphite by treatment with oleum in the presence of an oxidizing agent. The obtained samples of thermally expanded graphite were subjected to ultrasonic dispersion (splitting up) in four liquid media (water, toluene, benzene, acetone). It was shown that in the process of ultrasonic dispersion (splitting), the initial thermally expanded graphite is split into plates with a thickness of several tens to hundreds of nanometers. However, the plates are not single, but are in chaotic clusters with each other. The free bonds of carbon atoms, which are located at the edges of the plates, can play an important role in chemical processes and in the adsorption of substances on the surface of particles of split graphite. It was found that a high degree of perfection of the crystal structure, which is typical of the original graphite, is retained during ultrasonic treatment as compared with mechanical splitting. The change in the specific surface of graphite samples is presented. The main increase in the specific surface of the particles during ultrasonic splitting is created by increasing the area of the surfaces formed during interplanar splitting of graphite plates. Based on the comparison of this parameter, the effect of the used liquids on the splitting process is considered. The high values of the specific surface of the samples split in benzene and toluene are explained by the low values of the surface tension. The good wettability of the graphite surface with benzene, toluene and acetone compared with water allows these liquids to penetrate deep into the pores of graphite. Due to this, maximum splitting is achieved with ultrasonic processing of the mixture. Conclusions on the choice of the optimal liquid medium for dispersing graphite are made.

Key words: thermally expanded graphite, liquid polarity, ultrasonic dispersion, cavitation, nanoscale materials

Для цитирования:

Жанахова А.Н., Негуторов Н.В., Пыхова Н.В., Дыскина Б.Ш. Особенности ультразвукового диспергирования терморасширенного графита. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 2. С. 45–51

For citation:

Zhanakhova A.N., Negutorov N.V., Pykhova N.V., Dyskina B.Sh. Features of ultrasonic splitting of thermally expanded graphite. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* [Russ. J. Chem. & Chem. Tech.]. 2020. V. 63. N 2. P. 45–51

ВВЕДЕНИЕ

Тонкие графитовые пластинки находят применение в производстве тонких покрытий, прочных

и легких композитов, проводников в космических устройствах, производительных чипов в углеродной наноэлектронике и молекулярных сенсоров.

Пластинки необходимых геометрических параметров могут быть получены путем конденсирования и диспергирования [1, 4]. Механическое диспергирование природного графита повышает содержание несовершенной кристаллической ромбоэдрической структур, а также ее дефектность и уменьшает площадь поперечного сечения тонких графитовых пластинок [1, 5]. В работах Фиалкова А.С. [2] показано, что после механического диспергирования природного графита Тайгинского месторождения принципиально изменяется рентгеновская дифрактограмма графита, увеличивается межплоскостное расстояние, а размеры кристаллитов заметно уменьшаются.

Одним из перспективных прекурсоров для получения плоских наноразмерных частиц является терморасширенный графит (ТРГ) [3]. Материалы, полученные на его основе, обладают уникальным сочетанием свойств: широким диапазоном рабочих температур, высокой химической стойкостью, хорошей уплотняющей способностью [6, 9, 15]. Слоистая микро и макроструктура частиц ТРГ и наличие множества дефектов предполагает низкую прочность и потенциальную возможность дальнейшего диспергирования для получения наноразмерных частиц [9].

Однако расщепление частиц путем повторно-последовательного термохимического воздействия, аналогичного процессу получения ТРГ, оказалось малоэффективным. Механическое диспергирование наиболее легко происходит по множественным готовым дефектам, но не приводит к расщеплению кристаллитов. В результате механического диспергирования наблюдается поперечное разрушение частиц ТРГ [4].

При ультразвуковом диспергировании (УЗД) материалов в жидких средах создаются более жесткие условия диспергирования, которые способствуют дроблению весьма прочных материалов. Интенсивное воздействие ультразвука на частицы ТРГ должно приводить к разрушению не только по дефектам, но и по местам спайности в кристаллитах, а также вдоль базальных плоскостей кристаллов [10-12].

Вместе с тем поведение жидкостей в УЗ поле может существенно различаться в силу различия их упруго-вязких свойств, а также их полярности. Поверхностное натяжение жидкости в процессе ультразвукового диспергирования оказывает влияние на условия образования и схлопывания кавитационных пузырьков. Дипольный момент, определяющий полярность жидкости, характеризует ее взаимодействие с поверхностью графитовых частиц и глубину проникновения в поры. Кроме того,

при УЗД происходит не только изменение геометрических размеров частиц и формирование морфологии их поверхности, но также возможно модифицирование поверхности частиц акустической жидкостью и продуктами ее разложения [10, 16-19].

Цель работы: оценить влияние жидких сред на результаты ультразвукового диспергирования терморасширенного графита.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходного материала использовали природный тигельный графит Тайгинского месторождения. ТРГ получали из тигельного графита путем обработки олеумом в присутствии окислителя перманганата калия.

Термическое расширение отмытого после окислителя и высушенного порошка производили в муфельной печи при 900 °С в атмосфере воздуха и выделяющихся газов путем нагрева в течение 30 с.

Для проверки влияния акустической жидкости на процесс диспергирования образцы ТРГ были подвергнуты ультразвуковой обработке в четырех жидких средах, отличающихся полярностью и поверхностным натяжением. Свойства жидких сред, применяемых для ультразвукового расщепления ТРГ, приведены в табл. 1 (данные взяты из [7, 8]).

Терморасширенный графит помещали в жидкую среду (массовое соотношение суспензии ТРГ:жидкость составляло 1:20). Суспензию ТРГ подвергали ультразвуковой обработке. В качестве источника использовалась ультразвуковая ванна ПСБ-Галс (с пьезокерамическим преобразователем) с рабочей частотой 50 кГц, удельной мощностью УЗ-воздействия 0,03 Вт/мл. Суспензию обрабатывали в течение 60 мин при постоянной температуре 22±2 °С. После УЗД жидкость выпаривали. Полученные образцы тщательно просушивали.

Таблица 1

Основные характеристики жидких сред
Table 1. The main characteristics of liquid media

| Жидкая среда | Дипольный момент μ , D | Поверхностное натяжение $\sigma \cdot 10^3$, Н/м |
|--------------|----------------------------|---|
| Вода | 1,84 | 72,75 |
| Ацетон | 2,85 | 23,70 |
| Толуол | 0,37 | 28,53 |
| Бензол | 0,00 | 28,88 |

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения размеров частиц графита и описания особенностей морфологии их поверхности применяли лабораторный оптический мик-

роскоп с максимальным увеличением 600x и растровый сканирующий электронный микроскоп «JEOL» JSM – 700 1F.

В процессе термического расширения происходит увеличение поперечных размеров кристаллитов графита в несколько раз и как следствие образуются червеобразные частицы ТРГ (рис. 1). Эффективный диаметр исследуемых частиц ТРГ составляет около 240 μm (0,24 мм).

В процессе сушки агрегация диспергированных частиц не предотвращалась. Однако анализ изображений показал, что в результате обработки ультразвуком диспергированный и высушенный ТРГ представляет собой хаотические скопления множества не связанных друг с другом пластинок графита различной толщины (рис. 2).

Толщина пластинок составляет от нескольких десятков до сотен нанометров. Некоторые графитовые пластинки являются «прозрачными» для электронов, что обусловлено их малой толщиной.

Боковые поверхности пластинок, с большой протяженностью линии периметра, на которой расположены атомы углерода со свободными связями могут играть важную роль в химических процессах и при адсорбции веществ на поверхности частиц расщепленного графита.

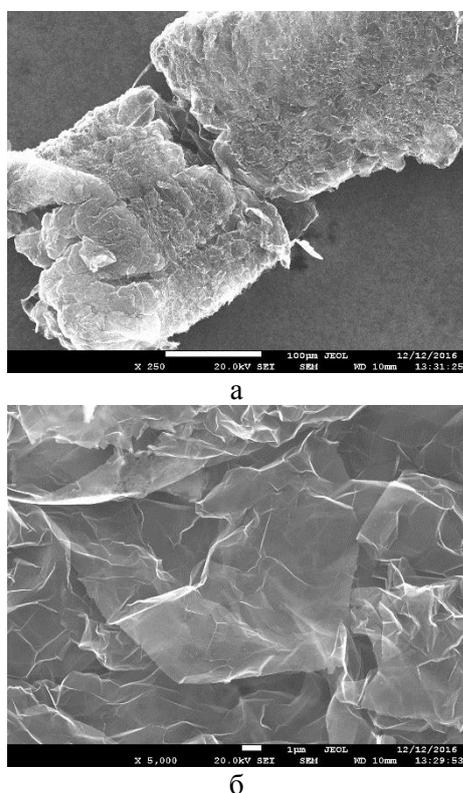


Рис. 1. SEM-изображение: а – всей частицы (x 250); б – поверхности частицы (x 5000) терморасширенного графита
Fig.1. SEM-images thermally expanded graphite: а – particle (x 250); б – particle surface (x 5000)

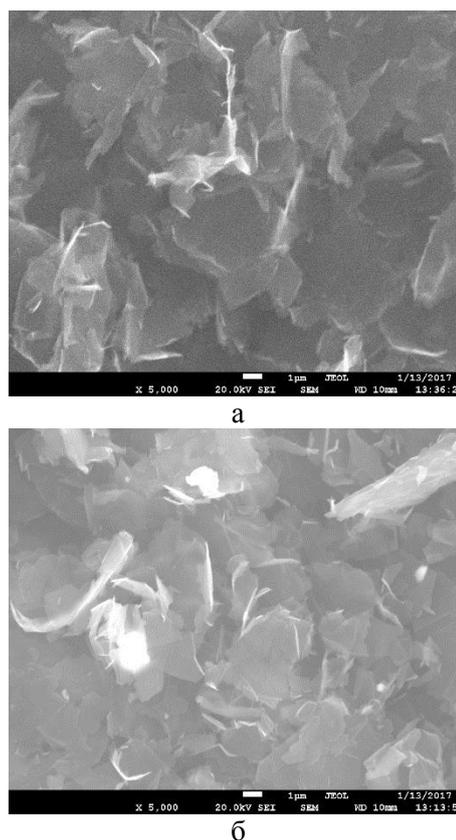


Рис. 2. SEM-изображения частиц диспергированного графита (5000x), полученного диспергированием в: а – в бензоле; б – в воде
Fig. 2. SEM-images of particles of dispersed graphite obtained: а – in benzene, б – in water

В процессе ультразвуковой обработки протекают два конкурирующих процесса: расщепление исходных частиц и их агрегация. Поэтому не наблюдается полного разделения всех частиц ТРГ на отдельные, тонкие пластинки, подобные графеновым пластинкам.

Из-за процесса агрегации невозможно было провести классификацию частиц. Для этого необходимо принять меры по предотвращению слипания частиц, что будет являться задачей для дальнейшего исследования.

Образец, диспергированный в среде толуола, содержит замкнутые объемы в виде «пузырей» на тех участках, в которых, предположительно, разделение атомных слоев завершилось не полностью.

Появление таких замкнутых объемов, возможно, связано с тем, что условия синтеза ТРГ и его УЗД недостаточны для полного разделения частиц на отдельные более тонкие графитовые пластинки.

Некоторые частицы расщепленного в ультразвуке графита имеют заметные отклонения от идеальной плоской формы. Наблюдаемые дефекты

формы и микростроения предполагают наличие дефектов и остаточных напряжений, а также неустойчивость состояния полученных пластинок графита с малым числом слоев и незавершенность процесса диспергирования частиц графита.

Наблюдаемые отклонения должны отражаться на состоянии кристаллической структуры расщепленных пластинок графита [2]. Параметры кристаллической структуры образцов графита определяли на рентгеновском дифрактометре Дрон 3 методом порошковой пробы.

Узкие пики рефлексов отражения типа 002 имеют высокую интенсивность и симметрию. Кроме того, хорошо просматривается пики рефлексов 004. Отсутствие уширений и нарушений симметрии пиков 002 указывает на существование больших областей когерентного рассеяния и соответственно, на большие размеры кристаллитов в направлении базальных графитовых плоскостей, а также на сохранение высокой степени совершенства кристаллической структуры, характерной для исходного тигельного графита ($d_{002} = 3,3546 \text{ \AA}$). Параметры рентгенограмм и величина межплоскостного расстояния d_{002} в кристаллической решетке диспергированных образцов, рассчитанная по рентгенограммам, приведены в табл. 2. Наблюдается сжатие пиков, которое может быть обусловлено как уменьшением дефектности кристаллической структуры графита, так и увеличением планарности пластинок в целом, а также их лучшей укладкой относительно друг друга в образце.

Таблица 2

Параметры рентгенограмм и кристаллической структуры графита

Table 2. Parameters of X-ray diffraction patterns and the crystalline structure of graphite

| Параметр/среда | Вода | Ацетон | Толуол | Бензол |
|---|----------|----------|----------|----------|
| Угол отражения | 26,560 | 26,590 | 26,660 | 26,590 |
| Площадь пика, у.е. | 16093,33 | 22043,33 | 30843,33 | 26363,33 |
| Интенсивность, у.е. | 5092 | 6551 | 8765 | 10892 |
| Межплоскостное расстояние, \AA | 3,3559 | 3,3554 | 3,3544 | 3,3548 |
| Размер ОКР (для плоскости 002) | 2453,5 | 3296 | 4641 | 3947,5 |

Удельную поверхность образцов графита определяли с помощью многоточечного метода БЭТ по низкотемпературной адсорбции азота на приборе Sorbi MS.

Согласно наблюдаемой микрокартине изменений формы и размеров частиц ТРГ, основной прирост удельной поверхности частиц при УЗД создается за счет увеличения площади вновь образуемых поверхностей при межплоскостном расщеплении пластинок графита. По величине удельной поверхности можно судить об изменении степени дисперсности в ходе обработки графита. В табл. 3 сведены значения удельной поверхности образцов графита (* Δ равна отношению $S_{уд}$ диспергированного графита отнесенная к $S_{уд}$ ТРГ).

Таблица 3

Удельная поверхность образцов графита
Table 3. Specific surface of graphite samples

| Образец | m^2/g | Δ^* |
|-------------------|---------|------------|
| ТРГ исходный | 18,1 | - |
| ТРГ УЗД в воде | 23,7 | 1,32 |
| ТРГ УЗД в ацетоне | 27,6 | 1,52 |
| ТРГ УЗД в толуоле | 28,5 | 1,57 |
| ТРГ УЗД в бензоле | 29,6 | 1,64 |

Наиболее эффективным механизмом разрушения пористых тел являются кавитационные процессы, происходящие в порах. А значит, эффективность этих процессов находится в тесной связи со способностью акустической жидкости проникать в поры и определяется способностью жидкости смачивать поверхность пор [16-20].

Низкие значения поверхностного натяжения имеют бензол, толуол и ацетон (табл. 1), которые смачивают поверхность графита и легко проникают в поры материала. Несмотря на относительно низкую эрозионную способность [10], эти жидкости, проникая по порам на большую глубину в объем частицы графита, способны вызвать заметное разрушающее действие.

Эрозионная активность воды более высокая и, согласно исследованиям, приведенным в [10], водная среда является наиболее оптимальной для ультразвукового диспергирования. Но полярные молекулы воды могут закрепляться на поверхности пор неполярного графита только в узлах, содержащих полярные сульфогруппы, не удаленные после получения ТРГ. Благодаря этим группам, вода может ограниченно смачивать поверхность и проникать в поры графита. Однако количество молекул воды в порах графита значительно меньше, чем молекул органических жидкостей. Суммарный кавитационный эффект незначительный, и прирост удельной поверхности при диспергировании в воде ниже, чем для органических жидкостей.

ВЫВОДЫ

Ультразвуковое диспергирование позволяет разрушить объемные частицы терморасширенного графита до тонких пластин, имеющих минимальную толщину в десятки нанометров. При ультразвуковом диспергировании сохраняется кристаллическая структура исходного природного графита. Пластинки практически не имеют дефектов кристаллического строения и близки по структуре к совершенным кристаллам графита. Такие пластинки могут иметь широкое применение в различных областях науки и техники.

Наиболее оптимальной жидкой средой для диспергирования графита являются неполярные жидкости, такие как бензол и толуол.

Однако диспергирование в воде также способствует расщеплению терморасширенного графита. По-видимому, увеличение полярности поверхности графита будет способствовать лучшему проникновению воды в поры и расщеплению частиц графита. В связи с этим целесообразна дальнейшая модификация процессов синтеза ТРГ и его ультразвукового диспергирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Колокольцев С.Н.** Углеродные материалы: свойства, технологии, применения. Д. М-я обл.: Интеллект. 2012. 295 с.
2. **Фялков А.С.** Углеграфитовые материалы. М.: Энергия. 1979. 320 с.
3. **Leshin V.S., Sorokina N.E., Avdeev V.V.** Graphite intercalation in H₂SO₄-CH₃COOH electrolytes. *Inorg. Mater.* 2004. V. 39. N 8. P. 826 – 832. DOI: 10.1023/A:1025021212474.
4. **Ханов А.М., Макарова Л.Е., Дегтярев А.И.** Особенности строения и использования терморасширенного графита. *Вестн. ПНИПУ. Машиностр., материаловед.* 2012. Т. 14. № 1. С. 92-106.
5. **Авакумов Е.Г., Гусев А.А.** Механические методы активации в переработке природного и технического сырья. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео». 2009. 155 с.
6. **Шibaев А.А., Тимофеева А.А., Юсин С.И.** Исследование воздействия ультразвуковых колебаний на терморасширенный графит. Сб.тр. XX Междун. науч.-практ. конф. «Совр. техника и технологии». Томск. 2014. С. 349 – 350.
7. Краткий справочник физико-химических величин. Под ред. З.Н. Тимофеевой, Н.М. Барон. Az-book. 2009. 240 с.
8. Дипольные моменты молекул органических веществ – <https://dpva.ru/Guide/GuidePhysics/ElectricityAndMagnetism/DipoleElectric/DipoleElectricTable3/>
9. **Дидейкин А.Т., Соколов В.В., Саксеев Д.А.** Свободные графеновые пленки из терморасширенного графита. *Журн. техн. физики.* 2010. Т. 80. Вып. 9. С. 146 – 149.
10. **Агранат Б.А.** Ультразвук в порошковой металлургии. М.: Металлургия. 1986. 168 с.
11. **Ткачев С.В., Буслаева Е.Ю., Губин С.П.** Графен – новый углеродный наноматериал. *Журн. Неорг. матер.* 2011. Т. 47. № 1. С. 5-14.
12. **Retamal Marín R.R., Babick F., Stintz M.** Ultrasonic dispersion of nanostructured materials with probe sonication – practical aspects of sample preparation. *Powder Technol.* 2017. V. 318. P. 451-458. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.05.049.
13. **Syunsuke Sumitomo, Hayato Koizumi** Comparison of dispersion behavior of agglomerated particles in liquid between ultrasonic irradiation and mechanical stirring. *Ultrason. Sonochem.* 2018. V. 40. January. Part A. P. 822-831. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.08.023.

REFERENCES

1. **Kolokoltsev S.N.** Carbon materials: properties, technologies, applications. D. M-i vol. Intellect. 2012. 295 p. (in Russian).
2. **Fialkov A.S.** Carbon-graphite materials. M.: Energy. 1979. 320 p. (in Russian).
3. **Leshin V.S., Sorokina N.E., Avdeev V.V.** Graphite intercalation in H₂SO₄-CH₃COOH electrolytes. *Inorg. Mater.* 2004. V. 39. N 8. P. 826 – 832. DOI: 10.1023/A:1025021212474.
4. **Khanov A.M., Makarova L.E., Degtyarev A.I.** Features of the structure and use of thermally expanded graphite. *Vest. PNIPU. Mashinost., Materialov.* 2012. V. 14. N 1. P. 92-106 (in Russian).
5. **Avakumov E. G., Gusev A.A.** Mechanical activation methods in the processing of natural and technical raw materials. Monograph. Novosibirsk: Academic publishing house "Geo", 2009. 155 p. (in Russian).
6. **Shibaev A.A., Timofeeva A.A., Yusin S.I.** The study of the effects of ultrasonic vibrations on thermally expanded graphite. Collection of works of the XX International Scientific and Practical Conference "Modern technology and technology." Tomsk. 2014. P. 349 - 350 (in Russian).
7. A brief handbook of physico-chemical quantities. Ed. by Z.N. Timofeev, N.M. Baron. Az-book. 2009. 240 p. (in Russian).
8. Dipole moments of organic molecules - <https://dpva.ru/Guide/GuidePhysics/ElectricityAndMagnetism/DipoleElectric/DipoleElectricTable3/> (in Russian).
9. **Dideikin A.T., Sokolov V.V., Sakseev D.A.** Free graphene films from thermally expanded graphite. *Zhurn. Tekhn. Phiz.* 2010. V. 80. N 9. P. 146 - 149 (in Russian).
10. **Agranat B.A.** Ultrasound in powder metallurgy. M.: Metallurgy. 1986. 168 p. (in Russian).
11. **Tkachev S.V., Buslaeva E.Yu., Gubin S.P.** Graphene is a new carbon nanomaterial. *Zhurn. Neorg. Mater.* 2011. V. 47. N 1. P. 5-14 (in Russian).
12. **Retamal Marín R.R., Babick F., Stintz M.** Ultrasonic dispersion of nanostructured materials with probe sonication – practical aspects of sample preparation. *Powder Technol.* 2017. V. 318. P. 451-458. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.05.049.
13. **Syunsuke Sumitomo, Hayato Koizumi** Comparison of dispersion behavior of agglomerated particles in liquid between ultrasonic irradiation and mechanical stirring. *Ultrason. Sonochem.* 2018. V. 40. January. Part A. P. 822-831. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.08.023.

14. **Mahbubul I.M., Elif Begum Elcioglu, Saidur R., Amalina M.A.** Optimization of ultrasonication period for better dispersion and stability of TiO₂-water nanofluid. *Ultrason. Sonochem.* 2017. V. 37. July. P. 360-367. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.01.024.
15. **Юдина Т.Ф., Смирнов Н.Н., Братков И.В.** Использование терморасширенного графита для получения коллоидных растворов оксида графена. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2013. Т. 56. Вып. 7. С. 80-82.
16. **Промтов М.А.** Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов. *Вестн. ТГТУ.* 2008. Т. 14. Вып. 4. С. 861 – 869.
17. **Хмелев В.Н.** Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности. Бийск: Изд-во Алт.гос.техн.ун-та. 2010. 203 с.
18. **Wu Pengfei, Bai Lixin, Lin Weijun, Yan Jiuchun.** Stability of cavitation structures in a thin liquid layer. *Ultrason. Sonochem.* 2017. V. 38. September. P. 75-83. DOI:10.1016/j.ultsonch.2017.03.002.
19. **Margulis M.A., Margulis I.M.** Current state of the theory of local electrification of cavitation bubbles. *Russ. J. Phys. Chem. A.* 2007. V. 81. N 1. P. 129-138. DOI: 10.1134/S0036024407010232.
20. **Dnestrovskii A.Y., Voropaev S.A., Ponomareva E.A.** Modeling of diamond formation conditions during cavitation in benzene. *Doklady phys.* 2011. V. 56. N 2. P. 78-81. DOI: 10.1134/S1028335811020078.
14. **Mahbubul I.M., Elif Begum Elcioglu, Saidur R., Amalina M.A.** Optimization of ultrasonication period for better dispersion and stability of TiO₂-water nanofluid. *Ultrason. Sonochem.* 2017. V. 37. July. P. 360-367. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.01.024.
15. **Yudina T.F., Smirnov N.N., Bratkov I.V.** Use of thermally expanded graphite to obtain colloidal solutions of graphene oxide. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2013. V. 56. N 7. P. 80-82 (in Russian).
16. **Promtov M.A.** Prospects of cavitation technologies application for intensification of chemical technological processes. *Vest TGTU.* 2008. V. 14. N 4. P.861-869 (in Russian).
17. **Khmelev V.N.** The use of high-intensity ultrasound in industry. Biysk: Publishing house Alt.gos.tehn.un-t. 2010. 203 p. (in Russian).
18. **Wu Pengfei, Bai Lixin, Lin Weijun, Yan Jiuchun.** Stability of cavitation structures in a thin liquid layer. *Ultrason. Sonochem.* 2017. V. 38. September. P. 75-83. DOI:10.1016/j.ultsonch.2017.03.002.
19. **Margulis M.A., Margulis I.M.** Current state of the theory of local electrification of cavitation Bubbles. *Russ. J. Phys. Chem. A.* 2007. V. 81. N 1. P. 129-138. DOI: 10.1134/S0036024407010232.
20. **Dnestrovskii A.Y., Voropaev S.A., Ponomareva E.A.** Modeling of diamond formation conditions during cavitation in benzene. *Doklady phys.* 2011. V. 56. N 2. P. 78-81. DOI: 10.1134/S1028335811020078.

Поступила в редакцию 28.05.2019

Принята к опубликованию 02.12.2019

Received 28.05.2019

Accepted 02.12.2019