МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАНОПЛАСТИН В ЖИДКОСТИ

А. М. Р. Аль-Машхадани, В. Ф. Першин

*Кафедра «Техника и технологии производства нанопродуктов»,
pershin.home@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: графит; графен; критическая концентрация; нанопластины; сдвиговая эксфолиация; слоистые кристаллы.

Аннотация: Рассмотрены общие закономерности эксфолиации слоистых кристаллов. Для моделирования распределения нанопластин в жидкости предложена физическая модель, основанная на аналогии пространственной упаковки полидисперсных сферических твердых частиц. Получены математические зависимости для расчета критической концентрации агрегации нанопластин, на примере графена. Проведена проверка адекватности математической модели реальному процессу.

Введение

Слоистые кристаллы образуют сильные химические связи в плоскости, но демонстрируют слабую связь между плоскостями, что позволяет им расслаиваться в так называемые наноллисты, длина и ширина которых может составлять микрометры, а толщина находится в нанодиапазоне, то есть меньше 100 нм. Такое расслоение приводит к очень большой удельной поверхности (более 1 000 м²/г) и уникальным свойствам. Существует множество видов слоистых материалов [1], которые могут быть сгруппированы в разные семейства (рис. 1). Самые простые – атомарно тонкие, гексагональные листы графена и гексагонального нитрида бора BN. Дихалкогениды переходных металлов (TMD) (такие как MoS₂ и WSe₂) и галогениды металлов (например, PbI₂ и MgBr₂) имеют почти идентичную структуру и состоят из плоскостей атомов металла, зажатых между плоскостями атомов галогенидов/халькогенов.

Другими интересными семействами являются слоистые, такие как селенид индия InSe и сульфид галлия GaS; теллурид висмута Bi₂Te₃ и триселенид сурьмы Sb₂Se₃; трихалькогениды и тригалогениды металлов. Несмотря на то что существует много различных слоистых материалов, все они имеют плоскую, анизотропную связь и, следовательно, потенциал расслаиваться в наноллисты.

Одним из существенных преимуществ слоистых материалов является их разнообразие. Еще до отшелушивания многие семейства слоистых материалов демонстрируют очень широкий спектр свойств. Тем не менее эксфолиация слоистых материалов целесообразна, поскольку значительно улучшает свойства материала. Например, в результате расслоения ионообменная способность вермикулита при очистке воды увеличивается в миллион раз [2].

Рис. 1. Кристаллические структуры, естественные формы и расслоенные продукты:
а – графит состоящий из чередующиеся слоев гексагонально расположенных атомов углерода (черные сферы); *б* – природный минерал; *в* – графен; *з* – вермикулит, представляющий собой слоистый гидрат силиката; *д* – минерал в естественной форме; *е* – расслоенный в результате нагревания; *жс* – дисульфид молебдена MoS_2 ; *и* – минерал; *к* – монослои MoS_2 ; *л* – слоистый диоксид марганца; *м* – минерал бирнессит; *н* – нанопластина MnO_2 ; расстояние между слоями, нм: графит – 0,35; вермикулит – 1,5; MoS_2 – 0,6; MnO_2 – 0,45 [7]

Наиболее перспективной технологией производства нанопластин из слоистых материалов является жидкофазная сдвиговая эксфолиация [3]. Наиболее яркий представитель слоистых материалов – графит, который используется для производства графена. Графен и его производные, благодаря своим уникальным свойствам, все шире используются при создании новых конструкционных и функциональных материалов. Учитывая данное обстоятельство, рассмотрим некоторые особенности жидкофазной сдвиговой эксфолиации слоистых материалов на примере графита.

Производство нанопластин эксфолиацией графита

На сегодняшний день известен ряд методов эксфолиации слоистых материалов на нанопластины, среди которых можно выделить основные виды расслаивания:

- механическое;
- с использованием химических методов;
- за счет термического воздействия.

Каждый из этих методов включает несколько вариантов. Например, в механическом можно выделить следующие виды расслаивания: микромеханическое с использованием липкой ленты; в высокоградиентном потоке суспензии, в которой твердой фазой является слоистый материал [4]; в результате комплексного воздействия сдвигающих сил и сил, возникающих за счет кавитации [3]; с помощью чисто сдвиговых воздействий [5].

Особый интерес к жидкофазной эксфолиации графита можно объяснить следующими преимуществами данной технологии по отношению к другим: химические реактивы используются в минимальных количествах (3...4 мл/л) в качестве поверхностно-активных веществ, для предотвращения агломерации нанопластин и графена, которые образуются из графита в процессе эксфолиации; жидкой дисперсионной средой, как правило, служит один из компонентов создаваемого конструкционного или функционального материала; материальные и энергетические затраты значительно меньше, чем при использовании других технологий; данная технология легко масштабируется. В настоящее время технология жидкофазной эксфолиации реализуется либо путем ультразвуковой обработки суспензии кристаллического графита [6], либо за счет сдвиговых воздействий в роторных аппаратах [3]. Один из основных недостатков методов жидкофазной эксфолиации заключается в малой концентрации графеновых нанопластин в суспензии, как правило, не более 1 мг/мл [7]. Для оценки перспектив производства графено-содержащих суспензий в промышленных масштабах необходимо определить предельные значения концентрации графеновых нанопластин при реализации технологии жидкофазной эксфолиации графита, что является целью работы.

Модель распределения нанопластин в суспензии

При моделировании распределения нанотрубок в суспензии [8] сделано предположение о том, что дисперсионная среда распределена вокруг трубки или пучка трубок в форме сферы с диаметром, равным длине трубки. Данное предположение основано на том, что ориентация трубки в пространстве случайна, то есть трубка может вращаться относительно собственного центра тяжести. Критическое состояние наступает тогда, когда соседние области (сферы), в которых может находиться трубка, соприкасаются и может произойти объединение двух трубок, с последующей их агрегацией. Аналогичным образом можно сформулировать гипотезу о критической концентрации графеновых нанопластин в суспензии. Таким образом, задача определения критической (максимальной) концентрации нанопластин в суспензии сводится к определению возможной

плотности упаковки полидисперсного материала, частицы которого имеют форму сферы. Следует отметить, что аналогию различных объектов с упаковкой шаров широко используют в разных отраслях науки, например, в кристаллохимии.

Под нанопластиной будем понимать нанообъект, линейные размеры которого по одному измерению находятся в нанодиапазоне, а размеры по двум другим значительно больше. На рисунке 2 показана форма графеновых нанопластин, а также распределение этих частиц по длине и числу слоев [9].

При моделировании распределения графеновых пластин в жидкости сделаем следующие допущения:

- графеновые пластины имеют эллиптическую форму с известными размерами (длина и ширина);
- распределение графеновых пластин по числу графеновых слоев известно;
- агрегация графеновых пластин начинается в результате их соприкосновения;
- пространственное перемещение частиц отсутствует, но они вращаются относительно собственных центров тяжести.

Рассмотрим более подробно данные допущения. Правомерность первого и второго доказана на основе анализа результатов исследований многих авторов [3, 6, 10, 11].

Вполне возможно, что объединение двух графеновых пластин происходит до их соприкосновения, но расстояние, на которое должны сблизиться пластины, намного меньше их длины и ширины, поэтому допущение о том, что агрегация происходит при соприкосновении пластин представляется весьма обоснованной.

Поскольку рассматривается вероятность соприкосновения всех пластин, то их концентрация достаточно большая, и перемещения в пространстве уже не играют никакой роли. В то же время, вращение частиц относительно собственного центра тяжести позволяет определить область возможных соприкосновений. Независимо от формы частиц эта зона имеет форму шара.

Состояние, при котором вероятны соприкосновения для всех графеновых пластин, находящихся в суспензии, является предельным, а концентрация графеновых пластин в суспензии при данном состоянии – предельной или критической.

Рис. 2. Результаты эксфолиации графита:

a – изображение графеновых нанопластин, полученное с помощью атомно-силового микроскопа; b, v – распределение частиц N соответственно по числу графеновых слоев и максимальной длине L [9]

На рисунке 2, а, в, видно, что распределения нанопластин по длине и числу слоев близки к нормальному, в первом приближении полидисперсный материал можно заменить монодисперсным. В этом случае, все нанопластины имеют одинаковую среднюю длину и содержат среднее число слоев. Упаковка шаров одинаковых размеров достаточно подробно показана в работе [12]. При рассмотрении трехмерных шаровых упаковок обычно рассматривают два способа наложения слоев друг на друга: плотный (шар на шар) или плотнейший (шары верхнего слоя попадают в лунку между шарами нижнего слоя). Накладывая слои такими способами, получают следующие варианты расположения шаров в трехмерном пространстве:

- простая кубическая кладка: тетрагональные слои накладываются плотным образом;
- простая гексагональная кладка: гексагональные слои накладываются плотным образом;
- плотнейшая шаровая упаковка разной слойности: гексагональные слои накладываются плотнейшим образом, при этом расстояние между шарами в слое и между слоями одинаковое;
- объемноцентрированная кубическая кладка: тетрагональные слои накладываются по принципу «шар в лунку», при этом расстояние между шарами в слое немного больше, чем расстояние между слоями (иными словами, шары в слое раздвигаются).

При кубической упаковке каждый шар касается шести соседних шаров, а при гексагональной – 12. Плотность упаковки, то есть доля объема, занятая шарами, составляет: для кубической – 0,52 (52 %); гексагональной – 0,74 (74 %). Таким образом, даже при сделанных допущениях плотность упаковки шаров, следовательно и предельная концентрация нанопластин в суспензиях, может изменяться в 1,4 раза. Поскольку рассматривается критическая концентрация, в дальнейшем будем считать, плотность упаковки равна 0,74.

Объем сферы при длине нанопластины L равен

$$V_{1c} = \pi L^3 / 6 = 0,52 L^3. \quad (1)$$

Объем, занимаемый сферами в одном кубическом метре суспензии:

$$V_c = 0,74 \text{ м}^3. \quad (2)$$

Число сфер, следовательно, и нанопластин в 1 м^3 суспензии

$$N = V_c / V_{1c} = 0,74 / (0,52 L^3) = 1,4 / L^3. \quad (3)$$

Если длина нанопластины, имеющей форму эллипса, равна L , а ширина $0,5 L$, то площадь пластины равна

$$S_{1n} = 0,125 \pi L^2 = 0,39 L^2. \quad (4)$$

Масса одной нанопластины, содержащей n графеновых слоев равна:

$$M_{1n} = n \gamma S_{1n} = 0,39 n \gamma L^2, \quad (5)$$

где γ – масса 1 м^2 графена, равная $0,78 \times 10^{-3} \text{ г}$.

Суммарная масса графеновых нанопластин, находящихся в одном метре кубическом суспензии равна:

$$M_G = M_{1G} N = 0,39 n \gamma L^2 1,4 / L^3 = 0,42 \times 10^{-3} n / L. \quad (6)$$

Зная массу графеновых нанопластин в 1 м^3 суспензии и плотность данной суспензии, легко определить критическую концентрацию. Следует отметить, что для полидисперсного материала плотность упаковки сфер, а, следовательно,

суммарная масса M_G и критическая концентрация могут быть значительно выше. Например, в работе [13] авторы утверждают, что для смеси из четырех фракций с разными размерами шаров, максимальная плотность равна 0,95. Таким образом, для полидисперсных графеновых нанопластин критическая концентрация может быть в 1,3 раза выше, чем рассчитанная по формуле (6). Постановка задачи, аналогия с упаковкой сфер и (1) – (6) фактически являются математической моделью распределения нанопластин в жидкости.

Проверка адекватности модели

Проверить, насколько значения критической концентрации соответствуют действительности по имеющимся в научной литературе данным, достаточно сложно, поскольку не проводилось специальных исследований по определению критических концентраций. Наиболее высокие концентрации графена (до 1,2 мг/мл) получены при использовании мягкой обработки ультразвуком в течение длительного времени (343 ч) в растворителе N-метилпирролидон (NMP) [7]. Результаты анализа просвечивающей электронной микроскопии показали, что дисперсии почти исключительно содержат пластины с числом графеновых слоев N , равным 3, и длиной $L = 1$ мкм. После подстановки значений N и L в (6) получим значение критической концентрации равное 0,93 мг/мл. Данное расчетное значение меньше экспериментального, полученного в работе [9], на 22,5 %. Достаточно большую разницу между расчетными и экспериментальными значениями можно объяснить большей плотностью упаковки полидисперсных нанопластин и погрешностями в определении N и L . В работе отмечается, что при определении данных параметров анализировалось порядка 100 нанопластин. Учитывая, что при концентрации 1 мг/мл в 1 мл суспензии находится порядка 10^{12} нанопластин, сделанную выборку нельзя считать представительной.

В работе [14] ультразвуковой эксфолиацией получена суспензия с концентрациями графеновых пластин 0,3...0,4 мг/мл. Нанопластины имели длину 2,5 мкм и состояли, в среднем, из 3 графеновых слоев. Расчетная концентрация при использовании формулы (6) равна 0,375.

При использовании в качестве дисперсионной среды изопропилового спирта с добавлением соли карбоната аммония [15] после обработки ультразвуком в течение 60 мин получена суспензия с концентрацией 1 мг/мл однослойных графеновых пластин длиной 0,1...0,3 мкм. Критическая концентрация, рассчитанная с использованием (6) при длине пластин 0,3 мкм, равна 1 мг/мл.

Выводы и перспективы

Расчетные значения критической концентрации по разработанной математической модели распределения нанопластин в жидкости, на примере графена, удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными. Для определения критической концентрации для нанопластин, полученных жидкофазной сдвиговой эксфолиацией из других слоистых материалов, необходимо определить число пластин в 1 м^3 суспензии и массу одной пластины. Для полной идентификации математической модели реальному процессу необходимо разработать методику приготовления суспензии с фиксированным средним размером нанопластин и числом слоев. В настоящее время решение данной задачи наиболее реально для графена, поскольку мы получаем водные концентраты с содержанием до 40 % в пересчете на сухой графен. Варьируя центробежной силой и временем центрифугирования, можно получать концентраты с разным размером нанопластин и числом графеновых слоев. Используя данные концентраты, возможно приготовление суспензий с разной концентрацией. Критическая концентрация этих суспензий определяется по их устойчивости.

Список литературы

1. Liquid Exfoliation of Layered Materials / V. Nicolosi, M. Chhowalla, M. G. Kanatzidis [et al.] // *Science*. – 2013. – Vol. 340, Issue 6139. – P. 1226419-1 – 1226419-18. doi: 10.1126/science.1226419
2. Luckham, P. F. The Colloidal and Rheological Properties of Bentonite Suspensions / P. F. Luckham, S. Rossi // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 1999. – Vol. 82, Issue 1-3. – P. 43 – 92. doi: 10.1016/S0001-8686(99)00005-6
3. Scalable Production of Large Quantities of Defect-Free Few-Layer Graphene by Shear Exfoliation in Liquids / K. R. Paton, E. Varrla, C. Backes [et al.] // *Nature Materials*. – 2014. – Vol. 13. – P. 624 – 630.
4. Min, Yi Fluid Dynamics: an Emerging Route for the Scalable Production of Graphene in the Last Five Years / Yi Min, Sh. Zhigang // *RSC Advances*. – 2016. – Vol. 6. – P. 72525 – 72536.
5. Получение малослойного графена способом жидкофазной сдвиговой эксфолиации / К. А. Аль-Шиблави, В. Ф. Першин, А. А. Баранов, Т. В. Пасько // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. – 2019. – Т. 25, № 1. – С. 143 – 154. doi: 10.18721/jest.25114
6. High-Yield Production of Grapheme by Liquid-Phase Exfoliation of Graphite / Y. Hernandez, V. Nicolosi, M. Lotya [et al.] // *Nature Nanotechnology*. – 2008. – Vol. 3, No. 9. – P. 563 – 568.
7. High-Concentration Solvent Exfoliation of Graphene / U. Khan, A. O'Neill, M. Lotya [et al.] // *Small*. – 2010. – Vol. 6, No. 7. – P. 864 – 871. doi: 10.1002/smll.200902066
8. Debundling of Single-Walled Nanotubes by Dilution: Observation of Large Populations of Individual Nanotubes in Amide Solvent Dispersions / S. Giordani, Sh. D. Bergin, V. Nicolosi [et al.] // *The Journal of Physical Chemistry B*. – 2006. – Vol. 110, No. 32. – P. 15708 – 15718. doi: 10.1021/jp0626216
9. High-Performance Graphene-Based Cementitious Composites / M. Krystek, D. Pakulski, V. Patroniak [et al.] // *Advanced Science*. – 2019. – Vol. 6, No. 9. – P. 1801195-1 – 1801195-12. doi: 10.1002/advs.201801195
10. A Comparative Study of Particle Size Distribution of Graphene Nanosheets Synthesized by an Ultrasound-Assisted Method / J. Amaro-Gahete, A. Benítez, R. Otero [et al.] // *Nanomaterials*. – 2019. – Vol. 9, No. 2. – P. 152 (16 p.). doi: 10.3390/nano9020152
11. Graphene Nanosheets Obtained Through Graphite Powder Exfoliation in Pulsed Underwater Electrical Discharge / E. H. Segundo, L. C. Fontana, A. A. C. Recco [et al.] // *Materials Chemistry and Physics*. – 2018. – Vol. 217. – P. 1 – 4. doi: 10.1016/j.matchemphys.2018.06.036
12. Слоэн, Н. Дж. А. Упаковка шаров / Н. Дж. А. Слоэн // *В мире науки*. – 1984. – № 3. – С. 72 – 82.
13. Придатко, Ю. М. Моделирование плотной упаковки частиц композитного материала / Ю. М. Придатко, Л. В. Королев, В. М. Готовцев // *Вестн. Саратовского гос. техн. ун-та*. – 2011. – Т. 4, № 4 (62). – С. 96 – 100.
14. Ciesielski, A. Graphene Via Sonication Assisted Liquid-Phase Exfoliation / A. Ciesielski, P. Samori // *Chemical Society Reviews*. – 2014. – Vol. 43, Issue 1. – P. 381 – 398. doi: 10.1039/c3cs60217f
15. Direct Exfoliation of Layered Materials in Low-Boiling Point Solvents Using Weak Acid Salts / Y. Arao, J. D. Tanks, M. Kubouchi [et al.] // *Carbon*. – 2019. – Vol. 142. – P. 261 – 268. doi: 10.1016/j.carbon.2018.10.063

Simulation of the Distribution of Nanoplates in a Liquid

A. M. R. Al-Mashhadani, V. F. Pershin

*Department of Equipment and Technology of Manufacturing Nanoproducts,
pershin.home@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: graphite; graphene; critical concentration; nanoplates; shear exfoliation; layered crystals.

Abstract: The general regularities of exfoliation of layered crystals are considered. A physical model based on the analogy of the spatial packing of polydisperse spherical solid particles is proposed to simulate the distribution of nanoplates in a liquid. Mathematical dependences have been obtained for calculating the critical concentration of aggregation of nanoplates, using graphene as an example. The verification of the adequacy of the mathematical model to the real process was carried out.

References

1. Nicolosi V., Chhowalla M., Kanatzidis M.G., Strano M. S., Coleman J. N. Liquid Exfoliation of Layered Materials, *Science*, 2013, vol. 340, issue 6139, pp. 1226419-1-1226419-18, doi: 10.1126/science.1226419
2. Luckham P.F., Rossi S. The Colloidal and Rheological Properties of Bentonite Suspensions, *Advances in Colloid and Interface Science*, 1999, vol. 82, issue 1-3, pp. 43-92, doi: 10.1016/S0001-8686(99)00005-6
3. Paton K.R., Varrla E., Backes C. [et al.] Scalable Production of Large Quantities of Defect-Free Few-Layer Graphene by Shear Exfoliation in Liquids, *Nature Materials*, 2014, vol. 13, pp. 624-630.
4. Min Yi, Zhigang Sh. Fluid Dynamics: an Emerging Route for the Scalable Production of Graphene in the Last Five Years, *RSC Advances*, 2016, vol. 6, pp. 72525-72536.
5. Al'-Shiblavi K.A., Pershin V.F., Baranov A.A., Pas'ko T.V. [Obtaining low-layer graphene by the method of liquid-phase shear exfoliation], *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPBPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki* [Scientific and technical statements of SPBPU. Natural and engineering sciences], 2019, vol. 25, no. 1, pp. 143-154, doi: 10.18721/jest.25114 (In Russ., abstract in Eng.)
6. Hernandez Y., Nicolosi V., Lotya M. [et al.] High-Yield Production of Grapheme by Liquid-Phase Exfoliation of Graphite, *Nature Nanotechnology*, 2008, vol. 3, no. 9, pp. 563-568.
7. Khan U., O'Neill A., Lotya M., De S., Coleman J.N. High-Concentration Solvent Exfoliation of Graphene, *Small*, 2010, vol. 6, no. 7, pp. 864-871, doi: 10.1002/sml.200902066
8. Giordani S., Bergin Sh.D., Nicolosi V. [et al.] Debundling of Single-Walled Nanotubes by Dilution: Observation of Large Populations of Individual Nanotubes in Amide Solvent Dispersions, *The Journal of Physical Chemistry B*, 2006, vol. 110, no. 32, pp. 15708-15718, doi: 10.1021/jp0626216
9. Krystek M., Pakulski D., Patroniak V. [et al.] High-Performance Graphene-Based Cementitious Composites, *Advanced Science*, 2019, vol. 6, no. 9, pp. 1801195-1-1801195-12, doi: 10.1002/advs.201801195
10. Amaro-Gahete J., Benítez A., Otero R. [et al.] A Comparative Study of Particle Size Distribution of Graphene Nanosheets Synthesized by an Ultrasound-Assisted Method, *Nanomaterials*, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 152 (16 p.), doi: 10.3390/nano9020152

11. Segundo E.H., Fontana L.C., Recco A.A.C. [et al.] Graphene Nanosheets Obtained Through Graphite Powder Exfoliation in Pulsed Underwater Electrical Discharge, *Materials Chemistry and Physics*, 2018, vol. 217, pp. 1-4, doi: 10.1016/j.matchemphys.2018.06.036
 12. Sloen N.Dzh.A. [Packing balls], *V mire nauki* [In the world of science], 1984, no. 3, pp. 72-82. (In Russ.)
 13. Pridatko Yu.M., Korolev L.V., Gotovtsev V.M. [Modeling of dense packing of composite material particles], *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University], 2011, vol. 4, no. 4 (62), pp. 96-100. (In Russ., abstract in Eng.)
 14. Ciesielski A., Samori P. Graphene Via Sonication Assisted Liquid-Phase Exfoliation, *Chemical Society Reviews*, 2014, vol. 43, issue 1, pp. 381-398, doi: 10.1039/c3cs60217f
 15. Arao Y., Tanks J.D., Kubouchi M. [et al.] Direct Exfoliation of Layered Materials in Low-Boiling Point Solvents Using Weak Acid Salts, *Carbon*, 2019, vol. 142, pp. 261-268, doi: 10.1016/j.carbon.2018.10.063
-

Verteilungssimulation von Nanoplaten in Flüssigkeit

Zusammenfassung: Es sind die allgemeinen Gesetzmäßigkeiten der Exfoliation geschichteter Kristalle betrachtet. Um die Verteilung von Nanoplaten in einer Flüssigkeit zu simulieren, ist ein physikalisches Modell basierend auf der Analogie der räumlichen Packung polydisperser kugelförmiger Feststoffpartikel vorgeschlagen. Für die Berechnung der kritischen Konzentration der Aggregation von Nanoplättchen sind mathematische Abhängigkeiten am Beispiel von Graphen erhalten. Es ist die Überprüfung der Angemessenheit des mathematischen Modells an den realen Prozess durchgeführt.

Modélisation de la distribution des nanoplaques dans un liquide

Résumé: Sont examinés les modèles généraux d'exfoliation des cristaux en couches. Pour modéliser la distribution des nanoplaques dans un liquide, est proposé un modèle physique basé sur l'analogie de l'emballage spatial des solides sphériques polydispersés. Sont obtenues les dépendances mathématiques pour le calcul de la concentration critique de l'agrégation des nanoplaques à l'exemple du graphène. Est vérifiée l'adéquation du modèle mathématique au processus réel.

Авторы: *Аль-Маишадани Али Мохаммед Рашид* – аспирант кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов»; *Першин Владимир Федорович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Литовка Юрий Владимирович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.