

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ
ГРАФЕНОВЫХ СТРУКТУР ЖИДКОФАЗНОЙ
СДВИГОВОЙ ЭКСФОЛИАЦИЕЙ ГРАФИТА**

К. А. Аль-Шиблави¹, А. А. Пасько², В. Ф. Першин²

*Кафедры: «Конструкции зданий и сооружений» (1),
«Техника и технологии производства нанопродуктов» (2),
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; pershin.home@mail.ru*

Ключевые слова: вероятность; малослойный графен; марковские процессы; сдвиг; аппарат «статор-ротор»; суспензия; эксфолиация.

Аннотация: Предложен механизм жидкофазной сдвиговой эксфолиации графита. На основе математического аппарата случайных марковских процессов разработана модель процесса и предложены зависимости для расчета элементов матрицы переходных вероятностей. Проведена идентификация параметров математической модели и проведено сравнение расчетных и экспериментальных результатов. На основании данной модели разработана и опробирована методика расчета геометрических параметров аппарата «статор-ротор» и режимных параметров процесса. Рассчитан, спроектирован и в настоящее время изготавливается в АО «Тамбовский завод «Комсомолец» имени Н. С. Артемова» опытно-промышленный образец аппарата.

Введение

Графеновые наноструктуры, в частности малослойный графен, все шире используются для получения новых конструкционных и функциональных материалов [1 – 3]. В ряде случаев необходим именно графен, то есть наноматериал толщиной в один атом углерода. Прежде всего, это использование графена в электронике, где необходимы идеальная структура и уникальные свойства. Исследования показали, что при модифицировании полимеров хорошие результаты могут быть достигнуты при использовании малослойного графена (до 10 слоев) [4]. Малослойный и многослойный графен хорошо зарекомендовал себя при модифицировании пластичных смазок [5]. Известны разные технологии получения графеновых структур: химическое газовое осаждение, химическая эксфолиация, механическая эксфолиация [6 – 11]. До настоящего времени в промышленных масштабах, в основном, используется технология с применением следующего маршрута: «графит – оксид графита – графен». Данная технология основана на окислении графита по способу Хамерса – Офемана [12] и используется в ООО «НаноТехЦентр» при промышленном производстве малослойного графена [13]. При переходе от оксида графита к графену применяется ультразвуковая обработ-

ка водной суспензии. Большие затраты энергии на ультразвуковую обработку значительно повышают стоимость готового продукта. Кроме этого, использование сильных кислот требует дополнительных затрат на обеспечение безопасности производства и утилизацию отходов.

Наиболее перспективным способом получения малослойного графена является жидкофазная механическая эксфолиация кристаллического графита с использованием поверхностно-активных веществ [7 – 9] или растворителей [10]. В работе [10] дано описание достаточно простого не токсичного способа приготовления и диспергирования моно- и малослойных графенов с низкой стоимостью. Положительный результат достигается путем отслаивания графита в смеси этанол/вода. Решающее значение для процессов отслоения и диспергирования имеет соотношение этанола и воды. Данный метод позволяет избежать традиционного использования сильных окислителей и поверхностно-активных веществ, которые отрицательно влияют на структуру и свойства графена. Отмечено, что использование этанола и воды позволяет легко подготовить прозрачные и проводящие пленки графена вакуумной фильтрацией или методом распыления, не требующим специальной последующей обработки для удаления примесей. Особый интерес представляет способ получения водных суспензий малослойного графена с использованием смесителя «статор-ротор» [9]. Полученную таким способом водную суспензию, содержащую малослойный графен, успешно используют для модифицирования бетона [11]. Результаты исследований подтвердили перспективность данного метода и показали, что для перехода от лабораторных исследований к проектированию промышленной установки необходимо разработать методику расчета, основанную на математической модели процесса жидкофазной эксфолиации. Цель работы – разработка математической модели процесса жидкофазной эксфолиации.

Качественный анализ процесса и его физическая модель

Экспериментальные исследования процесса эксфолиации графиты проводились с использованием аппарата «статор-ротор», аналогичного представленному в работах [9, 11]. Аппарат состоит из цилиндрической оболочки с плоским дном, внутри которой расположен ротор с лопастями (рис. 1).

Предварительно, в прозрачной цилиндрической емкости подготавливали водную суспензию с кристаллическим графитом ГС-1. Аппарат помещали в емкость и включали привод вращения ротора. Использование прозрачной емкости

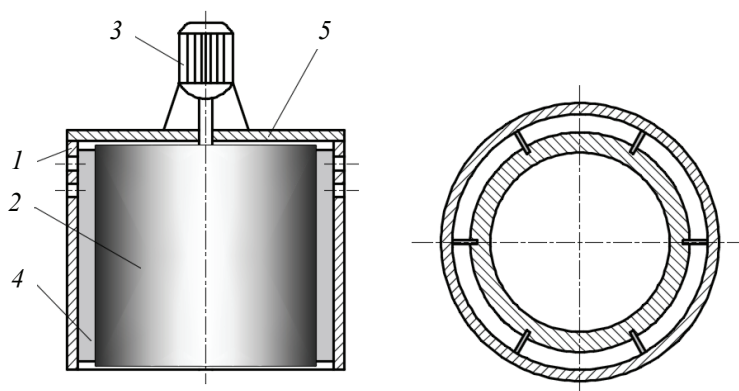


Рис. 1. Схема аппарата «статор-ротор»:

1 – статор; 2 – ротор; 3 – привод; 4 – подвижная лопасть; 5 – крышка

позволяло визуально наблюдать и фиксировать на видеокамеру гидродинамику процесса. Суспензия, находящаяся в зонах между статором, ротором и лопастями, раскручивается и на частицы графита начинают действовать центробежные силы, под действием которых частицы прижимаются к внутренней поверхности статора и их окружная скорость существенно уменьшается. Часть частиц с водой покидают статор через отверстия в цилиндрической поверхности, другая – попадает в зону между внутренней поверхностью статора и лопастями. В данном случае лопасть, движущаяся со скоростью $V = \omega R$, где ω – угловая скорость вращения ротора, R – наружный радиус лопасти, действует на частицу результирующей силой F , которую можно разложить на две составляющие: нормальную силу N и сдвигающую G (рис. 2). Сила трения $F_{\text{тр.}}$, которая препятствует проскальзыванию частицы относительно внутренней поверхности статора, равна

$$F_{\text{тр.}} = f(F_C + N), \quad (1)$$

где F_C – центробежная сила, действующая на частицу.

Даже если предположить, что окружная скорость движения частицы равна нулю, на нее действует центробежная сила от водяного столба, находящегося между частицей и ротором. Сила трения больше сил сцепления между графеновыми слоями, поэтому в результате воздействия на частицу вращающейся лопастью происходит сдвиг графеновых слоев относительно друг друга и из одной частицы образуются две, но с меньшим числом слоев.

В результате многократных сдвиговых воздействий частицы графита преобразуются сначала в многослойный графен, затем малослойный и, в конечном итоге, однослойный.

Математическая модель процесса эксфолиации

Для построения математической модели используем математический аппарат случайных марковских процессов, дискретных в пространстве и времени. Будем считать, что система, то есть водная суспензия графита, состоит из большого числа ячеек, в каждой из которых находятся только частицы с определенным количеством слоев. Система переходит из одного состояния в другое скачкообразно. Время, за которое осуществляется один переход, равно ΔT . Состояние системы (водной суспензии графита) будем характеризовать вектором состояния $S(k)$:

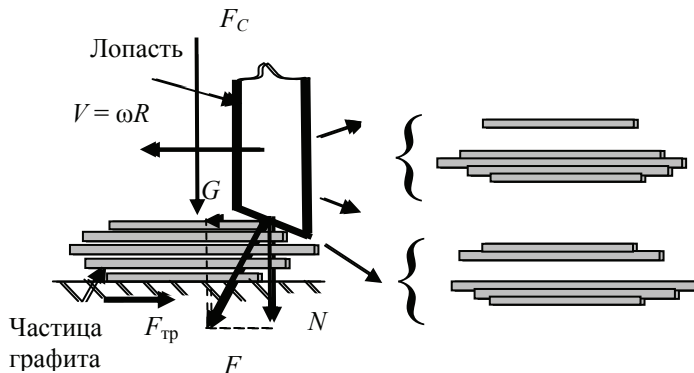


Рис. 2. Схема сил, действующих на частицу, находящуюся между лопастью и внутренней поверхностью статора

$$S(k) = \{c(1, k); c(2, k); \dots; c(i, k); c(M, k)\}, \quad (2)$$

где k – номер перехода, i – номер ячейки, c – число в ячейке частиц с определенным числом графеновых слоев или диапазоном числа слоев, M – общее число ячеек.

Число графеновых слоев частиц в ячейках последовательно уменьшается слева направо. Возможны разные варианты изменения числа графеновых слоев в соседних ячейках, в зависимости от поставленных задач. Например, возможен вариант, при котором число слоев в каждой последующей ячейке уменьшается на единицу. В данном варианте число ячеек достигает нескольких тысяч. Возможен вариант, при котором число слоев изменяется на 10, при допущении о том, что в пределах каждой ячейки равновероятно пребывание частиц с числом слоев в пределах каждого десятка. Значения элементов вектора исходного состояния системы $S(0)$ определяются характеристикой исходного графита и его концентрацией. Изменение системы во времени характеризуется следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} S(1) &= S(0)P; \\ S(2) &= S(1)P; \\ &\dots\dots\dots \\ S(i) &= S(i-1)P; \\ &\dots\dots\dots \\ S(k) &= S(k-1)P, \end{aligned} \quad (3)$$

где P – матрица переходных вероятностей.

Матрица имеет следующий вид

$$P = \begin{pmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & p_{1,j} \dots & p_{1,k} \\ 0 & p_{2,2} & p_{2,3} \dots & p_{2,k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где $p_{i,j}$ – вероятность перехода частиц с участка i на участок j .

При допущении о том, что за один переход равновероятно отслоение 1, 2, 3 .. $n(i)/2$ слоев, где $n(i)$ – число слоев у частиц, находящихся в i -ой ячейке, элементы матрицы P можно определить следующим образом

$$p_{i,j} = p_{i0} / (M - i), \quad (5)$$

где p_{i0} – вероятность участия частиц i -ой ячейки в процессе эксфолиации на данном переходе.

Вектор исходного состояния системы определяется концентрацией графита и распределением частиц графита по числу графеновых слоев.

Логично предположить, что с увеличением номера ячейки, то есть с уменьшением числа графеновых слоев у частиц, находящихся в данной ячейке, вероятность участия частиц в процессе эксфолиации уменьшается. Зависимость изменения параметра p_{i0} определяется с учетом экспериментальных данных об изменении концентрации графеновых структур в процессе эксфолиации.

Методика проведения экспериментов, результаты и обсуждение

Эксперименты проводили следующим образом. Готовили 3..6 л водной суспензии кристаллического графита ГС-1 с концентрацией 3 – 6 %, заливали ее в цилиндрическую емкость, устанавливали аппарат и начинали обработку суспен-

зии. Каждые 10 мин останавливали процесс и отбирали 100 мл суспензии. Суспензию центрифугировали, удаляли осадок и определяли концентрацию графеновых наноструктур в оставшейся суспензии. После проведения анализа пробу смешивали с остатком, выливали в емкость и продолжали процесс эксфолиации. После того, как концентрация очередной пробы увеличивалась менее чем на 5 % от концентрации предыдущей пробы, процесс эксфолиации прекращали. В процессе экспериментов изменяли скорость вращения ротора: 5000; 10000; 12000; 15000 об/мин.

На рисунке 3 показана характерная зависимость концентрации графеновых структур в суспензии от времени процесса эксфолиации при разных исходных концентрациях графита.

Видно, что при увеличении исходной концентрации графита в суспензии, интенсивность процесса увеличивается, особенно в начале процесса. Данный факт достаточно просто учитывается в математической модели, поскольку исходная концентрация графита во многом определяет вектор исходного состояния системы.

Как видно из представленных результатов, интенсивность роста концентраций графеновых структур за одинаковые промежутки времени (5 мин) с увеличением времени обработки суспензии уменьшается. Так, при исходной концентрации графена 60 мг/мл, за промежуток времени 5...10 мин концентрация графеновых структур увеличивается на 46,6 % (с 0,75 до 1,1 %), а за промежуток времени 20...25 мин всего на 6,2 % (с 1,6 до 1,7 %). Данный факт можно объяснить следующими обстоятельствами. С увеличением времени эксфолиации увеличивается число частиц с меньшим числом графеновых слоев. Согласно предложенной выше физической модели процесса (см. рис. 2), эти частицы реже попадают в зоны между лопастью и внутренней поверхностью статора, либо проскакивают эту зону без сдвига слоев, если рядом в указанную зону попала частица с большим числом графеновых слоев. Учитывая данный факт, можно предположить, что численное значение вероятности участия частиц i -ой ячейки в процессе эксфолиации p_{i0} с увеличением i будет уменьшаться.

На рисунке 4 представлены результаты изменения концентрации графеновых структур во времени, при разных скоростях вращения ротора. Видно, что необходимое время обработки суспензии с увеличением скорости вращения ротора уменьшается. В математической модели данный факт можно учесть изменением ΔT , приняв численную величину данного параметра обратно пропорциональной скорости вращения ротора.

Таким образом, в предлагаемой математической модели два параметра p_{i0} и ΔT подлежат идентификации.

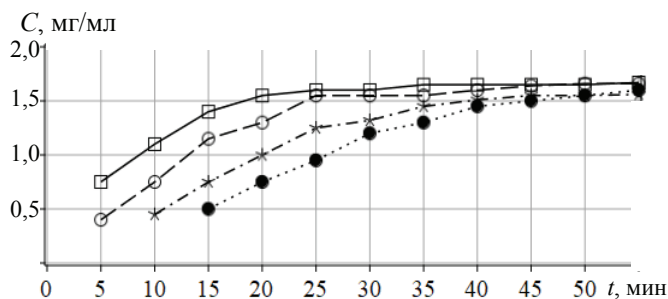


Рис. 3. Зависимость концентрации графеновых структур C от времени обработки t при разных исходных концентрациях графита, мг/мл:

● – 30; ★ – 40; ○ – 50; □ – 60

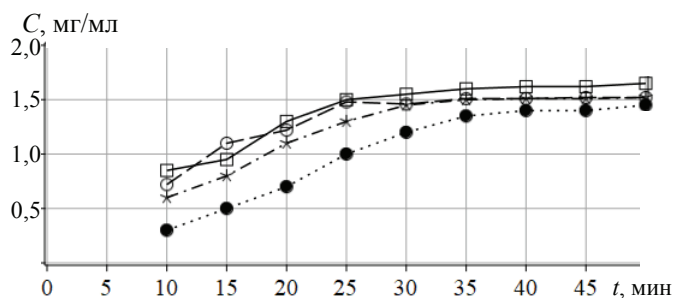


Рис. 4. Зависимость концентрации графеновых структур C от времени обработки t при разных скоростях вращения ротора, об/мин:
 ● – 5000; * – 10000; ○ – 12000; □ – 15000

Идентификация параметров и проверка адекватности модели

Прежде всего, провели идентификацию параметра p_{i0} по результатам обработки исходной суспензии с концентрации графита 60 мг/мл при скорости вращения ротора 12000 об/мин.

Зависимость вероятности участия частиц i -ой ячейки в процессе эксфолиации на данном переходе p_{i0} искали в виде

$$p_{i0} = (p_0 - p_{0k})e^{-ki} + p_{0k}, \quad (6)$$

где p_0 и p_{0k} – базовые вероятности участия частиц в начале и конце процесса эксфолиации соответственно; k – безразмерный коэффициент.

Численные значения p_0 , p_{0k} и k искали методом последовательных приближений, принимая за критерий минимальные среднеквадратические отклонения расчетных значений концентрации в готовой суспензии (после центрифугирования и удаления осадка) и экспериментальных данных.

В результате анализа двух экспериментов при скоростях 5000 и 12000 об/мин получена зависимость параметра ΔT от скорости вращения ротора.

Полученные значения параметров использовали в представленной выше математической модели для нахождения зависимости концентрации графеновых структур от времени при разных исходных концентрациях графита и скоростях вращения ротора. В качестве примера на рис. 5 представлено сравнение расчетных (сплошная линия) и экспериментальных (точки) значений при исходной концентрации графита 50 мг/мл и скорости вращения ротора 10000 об/мин. Как видно

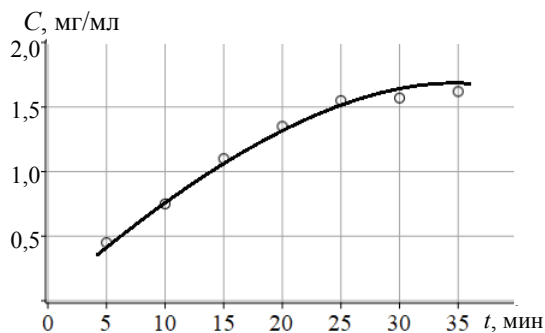


Рис. 5. Зависимость концентрации графеновых структур от времени обработки при разных скоростях вращения ротора, концентрация графита 50 мг/мл

из рис. 5 наблюдается удовлетворительная сходимость результатов. Аналогичные результаты получены для других значений исходных концентраций графита и скоростей вращения ротора.

Математическая модель использована при разработке методики расчета промышленных аппаратов «статор-ротор» для приготовления водных суспензий графеновых структур. Согласно данной методике:

– формируется блок исходных данных, включающий справочные характеристики по графиту и жидкой фазе, а также результаты проведенных ранее экспериментов;

– исходя из заданной производительности, рассчитываются геометрические параметры аппарата «статор-ротор» (внутренний диаметр статора, наружный диаметр ротора, число и размер лопастей, высота аппарата);

– формируется вектор исходного состояния системы с учетом гранулометрического состава графита и его концентрации в суспензии;

– формируется матрица переходных вероятностей;

– с использованием математической модели рассчитывается максимальная концентрация малослойного графена и время процесса эксфолиации.

С использованием данной методики рассчитан, спроектирован и в настоящее время изготавливается в АО «Тамбовский завод «Комсомолец» имени Н. С. Артемова» опытно-промышленный образец аппарата.

Выводы

Предложенная математическая модель, в основе которой заложена физическая модель образования графеновых структур под воздействием сдвиговых усилий, удовлетворительно описывает процесс жидкофазной сдвиговой эксфолиации графита. Параметры модели достаточно легко идентифицируются. На основании данной модели разработана и опробирована методика расчета геометрических параметров аппарата «статор-ротор» и режимных параметров процесса.

Список литературы

1. Электропроводящие композиты на основе хитозана и поливинилпирролидон-стабилизированного графена / Б. Ч. Холхоев [и др.] // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2017. – Т. 59, № 2. – С. 174 – 178. doi: 10.7868/S2308112017020031

2. Антонова, И. В. Применение материалов на основе графена в 2D-печатных технологиях / И. В. Антонова // Успехи физических наук. – 2017. – Т. 187, № 2. – С. 220 – 234. doi: 10.3367/UFNr.2016.03.037783

3. Влияние наночастиц различной природы на механические свойства углепластиков при низких температурах / Е. С. Молчанов [и др.] // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 444 – 452.

4. Al-Shiblawi, K. A. Modification of Epoxy Resins: Modern Condition and Prospects. Part I. Modification of Nanoparticles / K. A. Al-Shiblawi, V. F. Pershin, V. P. Yartsev // Advanced Materials & Technologies. – 2018. – No. 2. – P. 68 – 78. doi: 10.17277/amt.2018.02.pp.068-078

5. Modification of Graphite Greases Graphene Nanostructures / D. A. Y. Al-Saadi [et al.] // J. of friction and wear. – 2017. – Vol. 38, No. 5. – P. 355 – 358.

6. High Quality Monolayer Graphene Synthesized by Resistive Heating Cold Wall Chemical Vapor Deposition / T. H. Bointon [et al.] // Advanced Materials. – 2015. – No. 27. – P. 4200 – 4206. doi:10.1002/adma.201501600

7. Liquid Phase Production of Graphene by Exfoliation of Graphite in Surfactant/Water Solutions /Water Solutio / M. Lotya [et al.] // J. Am. Chem. Soc. – 2009. – Vol. 131(10). – P. 3611 – 3620. doi: 10.1021/ja807449u

8. High-Concentration, Surfactant-Stabilized Graphene Dispersions High-Concentration, Surfactant-Stabilized Graphene Dispersions / M. Lotya [et al.] // ACS Nano. – 2010. – Vol. 4, No. 6. – P. 3155 – 3162. doi: 10.1021/nn1005304

9. Scalable Production of Large Quantities of Defect-Free Few-Layer Graphene by Shear Exfoliation in Liquids / K. R. Paton [et al.] // Nat. Mater. – 2014. – Vol. 13, No. 6. – P. 624 – 630.

10. Exfoliation and Dispersion of Graphene in Ethanol-Water Mixtures // W.-W. Liu [et al.] // Front. Mater. Sci. – 2012. – Vol. 6, No. 2. – P. 176 – 182. doi: 10.1007/s11706-012-0166-4

11. Craciun Ultrahigh Performance Nanoengineered Graphene – Concrete Composites for Multifunctional Applications / D. Dimov [et al.] // Adv. Funct. Mater. – 2018. – Vol. 28. – P. 1705183 – 1705194. doi: 10.1002/adfm.201705183

12. Hummers, W. S. Preparation of Graphitic Oxide / W. S. Hummers, R. E. Offeman // J. Am. Chem. Soc. – 1958. – Vol. 80, No. 6. – P. 1339 – 1339.

13. Графен (Таунит ГМ) [Электронный ресурс] // ООО «НаноТехЦентр» : офиц. сайт. – Режим доступа : <http://www.nanotc.ru/productions/176-cnm-taunit-5> (дата обращения 16.11.2018).

Modeling of the Process of Obtaining Graphene Structures Using Liquid Phase Graphite Shift Exfoliation

K. A. Al-Shiblavi¹, A. A. Pasko², V. F. Pershin²

Departments of Structures of Buildings and Structures (1),

Method and Technology of Preparing Nanoproducs (2)

TSTU, Tambov, Russia; pershin.home@mail.ru

Keywords: probability; low layer graphene; Markov processes; shift; stator-rotor apparatus; suspension; exfoliation.

Abstract: The mechanism of liquid-phase shear exfoliation of graphite is proposed. Based on the mathematical apparatus of random Markov processes, a process model has been developed and dependencies for calculating the elements of the transition probabilities matrix have been proposed. The parameters of the mathematical model were identified and the calculated and experimental results were compared. Based on this model, a method for calculating the geometrical parameters of the stator-rotor of the apparatus and operating parameters of the process has been developed and tested. The experimental prototype apparatus was designed, calculated and manufactured at the JSC “Tambovskii Zavod “Komsomolets” imeni N. S. Artyomova”.

References

1. Kholkhoyev B.Ch., Buinov A.S., Bal'zhinov S.A., Farion I. A., Makotchenko V.G., Fedorov V.Ye., Kozlova M.N., Timashev P.S., Burdukovskiy V.F., Chaylakhyan R.K. [Electroconductive Composites Based on Chitosan and Polyvinylpyrrole-Dan – Stabilized Graphene], *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya. Seriya A* [High Molecular Weight Compounds. Serie A], 2017, vol. 59, no. 2, pp. 174-178, doi: 10.7868/S2308112017020031 (In Russ., abstract in Eng.)

2. Antonova I.V. [Use of Materials Based on Graphene in 2D Printing Technologies], *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Successes of Physical Sciences], 2017, vol. 187, no. 2, pp. 220-234, doi: 10.3367/UFNr.2016.03.037783 (In Russ., abstract in Eng.)

3. Molchanov Ye.S., Yudin V.Ye., Kydraliyeva K.A., Vaganov G.V., Ivan'kova Ye.M. [Effect of Nanoparticles of Different Nature on the Mechanical Properties of Carbon-Plastics at Low Temperatures], *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsiy* [Mechanics of Composite Materials and Structures], 2017, vol. 23, no. 3, pp. 444-452. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Al-Shiblawi K.A., Pershin V.F., Yartsev V.P. Modification of Epoxy Resins: Modern Condition and Prospects. Part I. Modification of Nanoparticles, *Advanced Materials & Technologies*, 2018, no. 2, pp. 68-78, doi: 10.17277/amt.2018.02.pp.068-078 (In Eng., abstract in Russ.)
5. Al-Saadi D.A.Y., Pershin V.F., Salimov B.N., Montaev S.A. Modification of Graphite Greases Graphene Nanostructures, *J. of Friction and Wear*, 2017, vol. 38, no. 5, pp. 355-358.
6. Bointon T.H., Barnes M.D., Russo S., Craciun M.F. High Quality Monolayer Graphene Synthesized by Resistive Heating Cold Wall Chemical Vapor Deposition, *Advanced Materials*, 2015, no. 27, pp. 4200-4206, doi:10.1002/adma.201501600
7. Lotya M., Hernandez Ye., King P.J., Smith R.J. Liquid Phase Production of Graphene by Exfoliation of Graphite in Surfactant/Water Solutions, *J. Am. Chem. Soc.*, 2009, vol. 131 (10), pp. 3611-3620, doi: 10.1021/ja807449u
8. Lotya M., King P.J., Khan U., De S., Coleman J.N. High-Concentration, Surfactant-Stabilized Graphene Dispersions High-Concentration, Surfactant-Stabilized Graphene Dispersions, *ACS Nano*, 2010, vol. 4, no. 6, pp. 3155-3162. doi: 10.1021/nm1005304
9. Paton K.R., Varrla E., Backes C., Smith R.J. Scalable Production of Large Quantities of Defect-Free Few-Layer Graphene by Shear Exfoliation in Liquids, *Nat. Mater.*, 2014, vol. 13, no. 6, pp. 624-630.
10. Liu W.-W., Xia B.-Yu., Wang X.-X., Wang J.-N. Exfoliation and Dispersion of Graphene in Ethanol-Water Mixtures, *Front. Mater. Sci.*, 2012, vol. 6, no. 2, pp. 176-182, doi: 10.1007/s11706-012-0166-4
11. Dimov D., Amit I., Gorrie O., Barnes M.D. Craciun Ultrahigh Performance Nanoengineered Graphene – Concrete Composites for Multifunctional Applications, *Adv. Funct. Mater.*, 2018, vol. 28, pp. 1705183-1705194, doi: 10.1002/adfm.201705183
12. Hummers W.S., Offeman R.E. Preparation of Graphitic Oxide, *J. Am. Chem. Soc.*, 1958, vol. 80, no. 6, p. 1339-1339.
13. <http://www.nanotec.ru/productions/176-cnm-taunit-5> (accessed 16 November 2018).

Modellierung des Prozesses der Herstellung der Graphenstrukturen durch Flüssigphasen-Graphit-Scher-Peeling

Zusammenfassung: Es ist der Mechanismus der Flüssigphasenscherung von Graphit vorgeschlagen. Basierend auf der mathematischen Vorrichtung der zufälligen Markov-Prozesse ist ein Prozessmodell entwickelt worden und Abhängigkeiten zur Berechnung der Elemente der Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix sind vorgeschlagen. Es sind die Parameter des mathematischen Modells identifiziert und die berechneten und experimentellen Ergebnisse verglichen. Auf der Grundlage dieses Modells wurde eine Methode zur Berechnung der geometrischen Parameter des Stator-Rotors der Vorrichtung und der Betriebsparameter des Prozesses entwickelt und getestet. Der experimentelle Prototypapparat ist entworfen, konstruiert und wird derzeit in der AG "Tambower Werk "Komsomolez" namens N. S. Artyomov" hergestellt.

Modélisation du processus d'obtention des structures de graphène par une exfoliation à décalage de graphite en phase liquide

Résumé: Est proposé le mécanisme de l'exfoliation de décalage de graphite en phase liquide. A la base de l'appareil mathématique des processus aléatoires Markov est élaboré un modèle de processus et sont proposées les dépendances pour calculer les éléments de la matrice de probabilité transitoire. Est effectuée l'identification des paramètres du modèle mathématique; est réalisée la comparaison des résultats calculés et expérimentaux. A la base de ce modèle, une méthode de calcul des paramètres géométriques du stator de l'appareil et des compteurs de régime a été développée et testée. Est conçu, construit et actuellement fabriqué un échantillon expérimenté et industriel de l'appareil à la SA "Usine de Tambov "Komsomolets" qui porte le nom N. S. Artemov.

Авторы: *Аль-Шиблави Карам Али* – аспирант кафедры «Конструкции зданий и сооружений»; *Пасько Александр Анатольевич* – кандидат технических наук, доцент 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: *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и технологическая безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.