

4. Yashcheritsyn, P. I. (1990). Teoriya rezaniya. Fizicheskie i teplovye protsessy v tekhnologicheskikh sistemakh [Cutting theory. Physical and thermal processes in technological systems]. Minsk.: Vyshcha. shkola [in Russian].
5. Zhadanovskiy, B. V., Sinenko, S. A., & Kuzhin M. F. (2018). Opyt raboty spetsializirovannykh podrazdeleniy po mekhanicheskoi obrabotke nemetallicheskih stroitelnykh materialov iz zhelezobetona [Experience of specialized subdivisions for the machining of non-metallic building materials from reinforced concrete]. Nauka i biznes: puti razvitiya – Science and business: ways of development, 3 (81), 35–40 [in Russian].
6. Bokuchava, G. V., Kuteliya, E. R., & Turmanidze, R. S. (1981). Issledovanie poverkhnosti iznosa monokristalla almaza pri shlifovanii metallo-keramicheskikh tverdykh splavov [Investigation of the wear surface of a diamond single crystal when grinding metal-ceramic hard alloys]. Soobshcheniia AN GSSR – Messages of the Academy of Sciences of the Georgian SSR, 104, 2, 429–432 [in Russian].
7. Alikhanyan, E. S. (1983). K opredeleniyu kharaktera iznosa profilnykh krugov [To the definition the nature of wear of profile circles]. Almazy i sverkhтвердые материалы – Diamonds and superhard materials, 3, 7–8 [in Russian].
8. Kruglov, & G. A., Tarasevich, I. K. (1977). Puti intensivatsii obrabotki almazov [Ways to intensify diamond processing] Sinteticheskie almazy – kliuch k tekhnicheskomu progressu – Synthetic diamonds – the key to technical progress. P, Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
9. Vol, A.E. (1959). Stroenie i svoystva metallicheskih sistem [The structure and properties of dual metal systems]. V.I. Ageev N. V. (Ed.). (Vols 1–4). Moskva: Fizmatgiz [in Russian].

УДК 547.022.1

DOI: 10.33839/2223-3938-2019-22-1-342-350

А. П. Возняковский¹, И. В. Шугалей², доктора химических наук; **И. И. Новикова**, д-р биол. наук³, **И. В. Бойкова**, канд. биол. наук³, **А. Ю. Неверовская**, канд. хим. наук¹, **А. А. Возняковский**, мл. н. сотр.⁴, **А. Д. Лапшина**, магистрант²

¹ФГУП «НИИ синтетического каучука им. С.В. Лебедева». Гапсальская ул. 1. Санкт-Петербург, Россия, 198035, E-mail: arvozn@gmail.com

²Санкт-Петербургский Государственный технологический институт (Технический университет). Московский просп. 26. Санкт-Петербург, Россия, 190013, E-mail: shugalei@mail.ru

³Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений РАН, Санкт-Петербург, Пушкин, шоссе Подбельского, 3, Россия, 196608, E-mail: irina_novikova@inbox.ru

⁴Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Политехническая ул., 26, Санкт-Петербург, Россия, 194021, E-mail: alexey_inform@mail.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ 2D-ГРАФЕНОВЫХ СТРУКТУР РАЗЛИЧНОЙ ПРЕДЫСТОРИИ В БИОПРЕПАРАТАХ

Карбонизацией природного полимера (лигнина) получены 2D графеновые структуры. Комплексом взаимодополняющих методов исследования (Рамановская спектроскопия, дифрактометрия, электронная микроскопия) показано, что по своим морфометрическим параметрам полученный карбонизированный материал соответствует многослойному графену

(число графеновых слоев в стеке 2–5). Полученный материал был использован в качестве подложки в составе образца биопрепарата, предназначенного для минимизации экологического ущерба при разливе нефти и нефтепродуктов. Установлено, что практически все культуры, использованные в эксперименте в течение длительного времени (3 месяца), сохраняли высокую выживаемость. Полученные данные позволили заключить, что по своим свойствам полученный иммобилизованный биопрепарат отвечает современным вызовам, предъявляемым к биопрепаратам, предназначенных для использования в условиях экологических катастроф.

Ключевые слова: 2D углеродные структуры, метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, карбонизация биополимеров, биопрепараты

Введение

В настоящее время в центре внимания многих исследовательских групп находятся углеродные наноструктуры, к которым традиционно относят графен, оксид графена, фуллерены, нанотрубки, детонационные наноалмазы. В частности, после работ А.К. Гейма и К.С. Новоселова по получению и исследованию графена резко возрос интерес к разработке методик получения и к поиску областей применения двумерных углеродных (2D) структур [1]. Базовый набор 2D углеродных структур включает, собственно, сам графен (G), оксид графена (GO) и восстановленный оксид графена (rGO).

К настоящему времени определен достаточно обширный список направлений практического применения графеновых структур. В частности, уникальный комплекс физических свойств графеновых структур делает их весьма перспективными для использования в области биомедицины [2]. В настоящее время основным препятствием, мешающим внедрению 2D углеродных структур в реальную биологическую практику, является явно недостаточная производительность современных методик их получения. Приходится также принимать во внимание, что наиболее часто получение графена базируется на методике Хаммерса [3], предусматривающей эксфолиацию графеновых листов из графита при использовании комплекса агрессивных химических реагентов. Современные жесткие экологические требования резко ограничивают использование таких методик в расширенном производстве, ограничивая их применение исключительно лабораторной практикой. Кроме чисто экологических вызовов, существенной проблемой, ограничивающей применение графеновых структур в биологической практике, является большое разнообразие вариантов методики Хаммерса, применяемых исследовательскими группами для их получения, и, соответственно, невозможность стандартизировать параметры получаемых графеновых структур (количество слоев в стеке, функциональные группы: терминальные и планарные, дисперсность частиц). Между тем, выбор стандартного носителя чрезвычайно важен при разработке биопрепаратов [4].

Таким образом, выбор базового метода получения 2D графеновых структур имеет не только научное, но и несомненное практическое значение.

В качестве базовой методики нами была использована методика получения 2D углеродных структур карбонизацией биополимеров в процессе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза – метод СВС [5]. СВС-синтез представляет собой процесс перемещения волны сильной экзотермической реакции по смеси реагентов (окислителя и восстановителя), в котором тепловыделение локализовано в слое и передается от слоя к слою путем теплопередачи. Принципиальным отличием СВС-синтеза от идеологически близкой методики быстрого пиролиза является наличие в реакционной массе, кроме органической компоненты, также и неорганического окислителя [6]. Таким образом, окислительно-восстановительные реакции, лежащие в основе пиролиза органической фазы, при применении СВС-синтеза проходят значительно интенсивнее, чем в случае пиролиза. Преимуществами процесса СВС являются простота аппаратного оформления метода, высокие скорости синтеза, возможность проведения синтеза без постоянного подвода энергии

от внешних источников питания, возможность проведения синтеза в любой атмосфере или в вакууме, отсутствие принципиальных масштабных ограничений.

Ранее мы уже представляли результаты первых экспериментов по использованию графеновых структур, полученных при карбонизации биополимера (крахмала) в качестве носителя для иммобилизации клеток микроорганизмов [7]. Было показано, что клетки микроорганизмов хорошо удерживались на данном носителе и сохраняли свою жизнеспособность. Однако тестирования на длительное выживание культур в составе полученного препарата не проводилось. Кроме того, особое внимание должно быть уделено снижению стоимости карбонизированного биополимера, так как объемы микробных биопрепаратов, используемых, например, при ликвидации экологических катастроф весьма значительны.

Необходимость получения приемлемого по стоимости продукта в количествах, обеспечивающих его практическое применение в области биологической и микробиологической промышленности, а также обеспечивающего получение стандартных по базовым характеристикам 2D графеновых структур побудило нас, дополнительно к используемому ранее в качестве исходного биополимера крахмалу, использовать гидролизный лигнин. Гидролизный лигнин является отходом лесохимического комплекса. В настоящее время в мире на площадках хранения накоплены колоссальные объемы лигнина. И хотя сам по себе лигнин не представляет значительной экологической угрозы, но при длительном хранении в объеме его отвалов создаются благоприятные условия для начала анаэробных процессов, приводящих к деструкции этого биополимера. Токсичные продукты деструкции лигнина, выделяясь в окружающую среду, создают реальную угрозу экологической безопасности для прилегающих территорий.

Соответственно, целью работы являлось исследование возможности использования для получения 2D углеродных структур биополимера, являющегося крупнотоннажным отходом действующих производств переработки лесной биомассы – гидролизного лигнина, а также сопоставление свойств 2D графеновых структур, полученных карбонизацией гидролизного лигнина и крахмала.

Исходные материалы и методы исследований

В качестве исходного биополимера использовали гидролизный лигнин, отобранный из отвалов Сыктывкарского ЦБК. Перед использованием лигнин был промыт от посторонних примесей, высушен и измельчен в планетарной мельнице. Размер частиц варьировался от 0.5 мм до 1 мм.

При проведении экспериментов использовали методику самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [8].

Электронные микрофотографии порошка карбонизированного лигнина, LC, получены с помощью растрового электронного микроскопа Supra 55VP (Carl Zeiss Group, Germany).

Рентгеновская дифрактометрия проводилась на дифрактометре Shimadzu XRD 7000 (Japan), в диапазоне углов 2θ (10–100) градусов, с шагом 0.02 градуса и экспозицией в точке 1 с.

Спектры Рамановского рассеяния получены на спектрометре InVia (Renishaw, UK).

Для определения удельной поверхности порошка LC использовали анализатор ASAP 2020 (Micromeritics, USA). Адсорбтив – азот. Температура измерений – 77 К. Истинную плотность частиц порошка LC определяли методом гелиевой пикнометрии на приборе Ultrapycnometer 1000 (Quantachrome instruments, USA).

Результаты и их обсуждение

Полученный продукт – карбонизированный лигнин (*LC*) – представляет собой порошок черного цвета. Выход конечного продукта составляет примерно 40%.

Считается, что наиболее достоверную информацию о структуре углеродных структур можно получить из данных Рамановской спектроскопии (рис. 1).

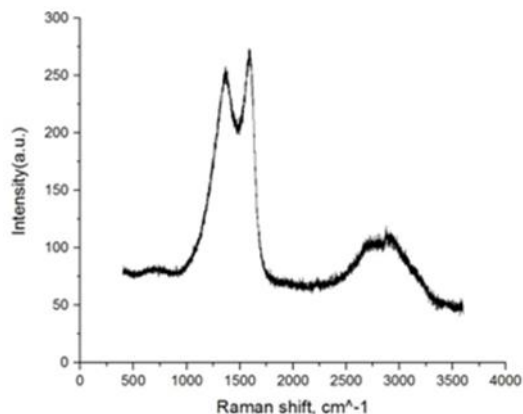


Рис. 1. Спектр Рамановского рассеяния порошка *LC*

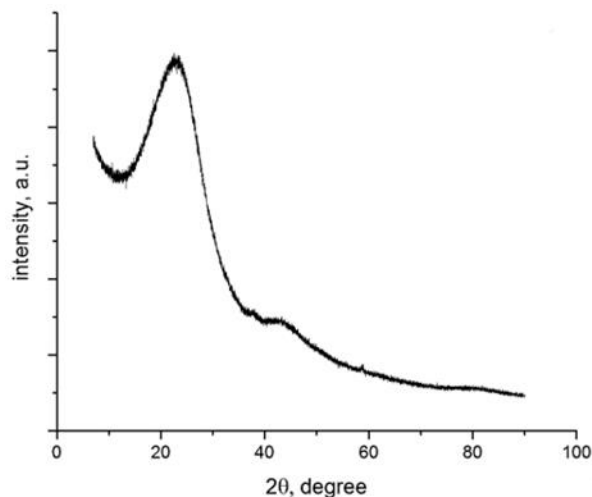


Рис. 2. Дифрактограмма порошка карбонизированного лигнина

Общий вид кривой как по виду, так и по соответствующим максимумам пиков частотам (*G* пик – 1500–1630 cm^{-1} ; *D* пик – 1355 cm^{-1}) отвечает 2*D* графеновым структурам. Косвенные выводы о количестве графеновых слоев в полученных нами порошках *LC* можно сделать из сопоставления вида так называемой 2*D* (2700 cm^{-1}) полосы с литературными данными. Сопоставление этих данных позволяет заключить, что в наших экспериментах среднее число графеновых слоев в частицах порошка *LC* составляет от 2 до 5.

Для определения структуры полученных частиц мы использовали метод рентгеновской дифрактометрии (рис. 2). Как можно заключить из данных рис. 2, структура частиц *LC* рентгеноаморфна, и, следовательно, в процессе карбонизации графитовые структуры не формируются.

Электронные микрофотографии порошка *LC* представлены на рисунках 3.

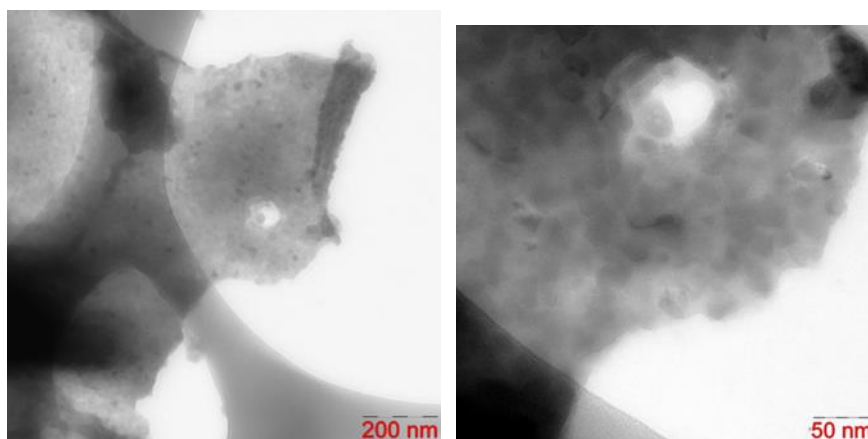


Рис. 3. Микрофотографии порошка карбонизированного лигнина: а – масштаб 200 нм; б – 50 нм

Как можно заключить из данных рисунка 3, частицы *LC* представляют собой объемно-плоскостные частицы. Сопоставление данных рис. 3 а и 3 б и данных Рамановской спектрометрии

позволяет сделать вывод, что получаемые в нашем синтезе графеновые структуры представляют собой сложную иерархическую систему. Нативные 2D частицы (~25 нм) формируют 2D макрочастицы, которые, в свою очередь, самоорганизуются в стеки (2–5 слоев).

Следует отметить, что при использовании пирогенных методов карбонизации формируются порошки сферических частиц. В частности, частицы сферической формы были получены и при карбонизации крахмала методом гидротермальной карбонизации [9]. Частицы со сходными с частицами LC геометрическими параметрами характерны для частиц 2D графеновых структур. В пользу этого также свидетельствуют определенные нами значения удельной поверхности частиц порошка LC ($S=570 \text{ м}^2/\text{г}$) и его плотности ($\rho = 1,910 \text{ г}/\text{см}^3$), также хорошо совпадающие с литературными данными для графена.

В целях правильной и однозначной характеристики получаемого продукта необходимо уточнить некоторые понятия. Так, под графеном следует понимать слой углерода толщиной в один атом, состоящий из конденсированных шестичленных колец. Атомы углерода в графене соединены sp^2 -связями в гексагональную двухмерную (2D) решетку. Наличие нативной структуры, формирующей графеновый лист, непротиворечиво позволяет рассматривать его как специфическую макромолекулу. Соответственно, как и любая макромолекула, графен обладает уникальными параметрами. Однако, каждый конечный ансамбль макромолекул, нивелируя свойства отдельной макромолекулы, имеет собственный комплекс свойств, присущих именно этому ансамблю. Это в полной мере относится к многослойному графену, ансамбль частиц которого, в общем случае, включает случайный набор возможных макромолекулярных и надмолекулярных структур (число слоев графена в стеке).

Анализ литературных источников показал, что основные результаты по применению графена в качестве носителя микробных клеток получены при использовании не графена, а его агломератов. Таким образом, задача состоит не столько в получении в процессе синтеза исключительно графена, а скорее в получении воспроизводимого ансамбля графеновых структур. Эту задачу предлагаемый синтез успешно решает.

Следует подчеркнуть, что разработанный метод получения 2D-графеновых структур принципиально отличается от используемых в настоящее время методов получения 2D углеродных структур. В частности, он основан не на эксфолиации готового графена из природного графита, а на сложных процессах деструкции/самоорганизации циклических органических веществ.

Сопоставление морфометрических и морфологических параметров 2D графеновых структур показал, что материал, полученный при карбонизации крахмала и лигнина, является идентичным. Следовательно, возможна замена использованной ранее наноуглеродной матрицы при получении биопрепарата на продукт, полученный карбонизацией лигнина. Таким образом, открываются широкие перспективы для получения биопрепарата в промышленном масштабе. Однако ключевым вопросом является вопрос длительного хранения полученного биопрепарата и сохранения его эффективности, в том числе и при смене углеродной матрицы. В качестве действующего начала биопрепарата для борьбы с нефтезагрязнением тестировали широкий спектр культур микроорганизмов-нефтедеструкторов (таблица). Оценку выживаемости микроорганизмов проводили путем сопоставления титров клеток микроорганизмов в различных образцах в процессе хранения биопрепаратов. Сохранение высокого титра клеток в процессе длительного хранения свидетельствует о высокой выживаемости культур микроорганизмов, сохранении биологической активности препарата и его высокой потенциальной эффективности для деструкции нефтепродуктов. Результаты испытаний эффективности препарата приведены в таблице.

Таблица 1. Влияние образцов 2D графеновых структур, полученных из различных биополимеров, на жизнеспособность клеток штаммов нефтеокисляющих микроорганизмов

Штамм микроорганизма	Исходный титр (КОЕ/мл) в культуральной жидкости штаммов	Титр клеток в образцах с графеном через 5 суток (КОЕ/мл)		Титр клеток в образцах с графеном через 3 м-ца (КОЕ/мл)	
		Титр клеток в образцах с <i>LC</i>	Образец с <i>SC</i>	Титр клеток в образцах с <i>LC</i>	Образец с <i>SC</i>
<i>Serratiaspp. Ант 1-1</i>	$3,9 \times 10^{12}$	$2,9 \times 10^{12}$	$3,4 \times 10^{12}$	$2,0 \times 10^{11}$	$7,3 \times 10^{11}$
<i>Nocardioide spp. Ко-1</i>	$8,0 \times 10^{12}$	$7,5 \times 10^{12}$	$6,8 \times 10^{12}$	$1,5 \times 10^{11}$	$4,5 \times 10^{11}$
<i>Paenibacillus polymyxa</i> Kr ВКПМВ-4217	$1,4 \times 10^{12}$	$2,8 \times 10^{12}$	$1,6 \times 10^{12}$	$2,2 \times 10^{12}$	$2,3 \times 10^{11}$
<i>Candida spp. R-2</i>	$1,0 \times 10^{12}$	5×10^{11}	$5,7 \times 10^{12}$	$5,7 \times 10^{10}$	$8,0 \times 10^9$
<i>Acinetobacter lwofii</i> P-2	$2,8 \times 10^{12}$	$1,4 \times 10^{12}$	$2,1 \times 10^{12}$	$1,0 \times 10^{10}$	$1,2 \times 10^8$
<i>Rhodococcus erythropolis</i> ВКПМ АС-1269	$3,2 \times 10^{12}$	9×10^{12}	8×10^{12}	$4,4 \times 10^{12}$	$2,5 \times 10^{12}$
<i>Rhodococcus rhodochrous</i> ВКПМ АС-1016	$8,0 \times 10^{12}$	8×10^{12}	8×10^{12}	$6,0 \times 10^{12}$	$7,8 \times 10^{11}$
<i>Pseudomonas fluorescens biovar II</i> Ант 10-1	$2,4 \times 10^{12}$	$1,3 \times 10^{12}$	$3,2 \times 10^{12}$	$4,0 \times 10^{11}$	$2,0 \times 10^{12}$
<i>Burkholderia caryophylli</i> Ант 14-2	$5,1 \times 10^{12}$	9×10^{12}	$2,1 \times 10^{12}$	$3,0 \times 10^{11}$	$5,6 \times 10^{11}$
<i>Brevibacterium spp.</i> PP-7	$2,0 \times 10^{12}$	$2,1 \times 10^{12}$	$1,4 \times 10^{12}$	$1,0 \times 10^{10}$	$3,0 \times 10^{10}$

Для оценки эффективности препаратов нами проведена оценка выживаемости микроорганизмов-нефтедеструкторов в составе биопрепарата с использованием карбонизированного лигнина при длительном хранении (3 месяца). При этом выживаемость культур микроорганизмов проверялась на двух образцах препаратов, полученных с использованием разных типов нанокристаллической матрицы: полученной как из крахмала, так и из гидролизованного лигнина (таблица).

О выживаемости клеток микроорганизмов судили по снижению титра микроорганизмов при контакте с нанокристаллическим материалом по сравнению с исходным значением титра микроорганизмов в культуральной жидкости. Как видно из таблицы 1, практически все культуры, использованные в эксперименте, в течение длительного времени (3 месяца) сохраняли высокую выживаемость. Уровень жизнеспособности клеток на нанокристаллическом материале, полученном как из крахмала, так и из лигнина достаточно высок, что позволяет рассчитывать на получение биопрепарата для ликвидации нефтезагрязнений на основе графеноподобной матрицы, полученной карбонизацией отходов лесохимического комплекса с последующим масштабированием его производства в целях промышленного использования.

Выводы

1. В рамках настоящей работы успешно решен вопрос разработки масштабируемого синтеза 2D углеродных структур, перспективных для использования в качестве подложки нанесенных биопрепаратов.
2. Предложена модель формирования частиц 2D графеновых структур и их агрегатов, базирующаяся на сопоставлении их получения с процессом полимеризации нативных гексагонов макроцепи исходного биополимера.
3. Показано, что морфометрические параметры, получаемых в процессе карбонизации биополимеров 2D графеновых структур, мало чувствительны к природе исходного биополимера
4. На основе 2D графеновых структур сформирован биопрепарат с активным компонентом микробных клеток-нефтедеструкторов, отвечающий современным вызовам, предъявляемым к биопрепаратам, предназначенным для ликвидации экологического ущерба, вызванного разливами нефти и нефтепродуктов.

Карбонізацією природного полімеру (лігніну) отримані 2D графенові структури. Комплексом взаємодоповнюючих методів дослідження (Раманієвська спектроскопія, дифрактометрія, електронна мікроскопія) показано, що за своїми морфометричними параметрами отриманий карбонізований матеріал відповідає багат шаровому графену (число графенових шарів в стеку 2–5). Отриманий матеріал був використаний в якості підкладки в складі зразка біопрепарату, призначеного для мінімізації екологічного збитку при розливі нафти і нафтопродуктів. Встановлено, що практично всі культури, використані в експерименті протягом тривалого часу (3 місяці), зберігали високу виживаність. Отримані дані дозволили зробити висновок, що за своїми властивостями отриманий іммобілізований біопрепарат відповідає сучасним викликам, що пред'являються до біопрепаратам, призначених для використання в умовах екологічних катастроф.

Ключові слова: 2D вуглецеві структури, метод високотемпературного синтезу, коксування біополімерів, біопрепарати

**A. P. Voznaykovskii¹, I. V. Shugaley², I. I. Novikova³, I. V. Boykova³, A. Yu. Neverovskaya¹,
A. A. Vozniakovskii⁴, A. D. Lapshina²**

¹Lebedev Research Institute for synthetic rubber, St-Petersburg, Russia

²St-Petersburg State Institute of Technology, St-Petersburg, Russia

³Institute of plant protection, Saint-Petersburg, Russia

⁴Ioffe Institute, St-Petersburg, Russia

COMPARATIVE STUDIES OF THE EFFECTIVENESS OF USAGE OF 2D GRAPHENE STRUCTURES OF VARIOUS PREHISTORY IN BIOPREPARATIONS

Carbonization of lignin being the natural biological polymer results in 2D graphene-like structures. The morphometric characteristics of obtained material are similar to those of multilayer graphene (the number of layers in the bulk equals to 2–5). The obtained material was used as the component of biopreparation to reduce the risk of ecosystem degradation due to oil and oil products pollution. It was shown that all tested microorganisms demonstrated good compatibility in contact with synthesized graphene surviving during the 3-month period. So, the preparation based on multilayer graphene may be further proposed for ecosystem remediation after oil pollution.

Key words: 2D carbon structures, method of self-propagating high-temperature synthesis, bio polymers carbonization, biopreparations

Литература

1. Sur U. K. Graphene: A Rising Star on the Horizon of Materials Science // *International Journal of Electrochemistry*. – 2012. – P. 1–12. doi:10.1155/2012/237689.
2. Foo M. E., Gopinath S. C. Feasibility of graphene in biomedical applications // *Biomedicine & Pharmacotherapy*. – 2017. –94. – P. 354–361.
3. Hummers W. S., Offeman R. E. (). Preparation of Graphitic Oxide // *Journal of the American Chemical Society*. – 1958. –80. N 6. – P. 1339. doi:10.1021/ja01539a017
4. Promises, facts and challenges for graphene in biomedical applications / G. Reina, J. M. González-Domínguez, A.Criado, et al.// *Chemical Society Reviews*. – 2017. –46. – N 15. – P. 4400–4416.
5. Sytshev A. E., Merzhanov A. G. Self-propagating high-temperature synthesis of nanomaterials // *Russian chemical reviews*. – 2004. –73. – N 2. – 147–159.
6. Левашов Е.А., Рогачев А.С., Юхвид В.И., Боровинская И.П. Физико-химические и технологические основы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. – М.: БИНОМ, 1999. – 176 с.
7. Перспективы использования графеноподобного материала, полученного карбонизацией крахмала, для создания комбинированных микробных препаратов / И. В. Шугалей, И. И. Новикова, И. В. Бойкова и др. // *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*. Сб. науч. тр. – Выпуск 21. – Киев: ИСМ им.В.Н.Бакуля, НАН Украины, 2016. – С. 200–208.
8. Voznyakovskii A. P., Neverovskaya A. Y., Gorelova E. V., Zabelina, A. N. Facile synthesis of 2D carbon structures as a filler for polymer composites // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. – 2018. – 9. – N1. – P. 125–128.
9. A novel high surface area spherical carbon from cassava starch / D. Jin, X. Yang, M. Zhang, et al. // *Materials Letters*. – 2015. – 139. – P. 262–264.

Поступила 15.07.19

References

1. Sur, U. K. (2012). Graphene: A Rising Star on the Horizon of Materials Science. *International Journal of Electrochemistry*, doi:10.1155/2012/237689.
2. Foo, M. E., & Gopinath, S. C. (2017). Feasibility of graphene in biomedical applications. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 94, 354–361.
3. Hummers, W. S., & Offeman, R. E. (1958). Preparation of Graphitic Oxide. *Journal of the American Chemical Society*, 80, 6, 1339.
4. Reina, G., González-Domínguez, J. M., Criado, A., Vázquez, E., et al.(2017). Promises, facts and challenges for graphene in biomedical applications. *Chemical Society Reviews*, 46, 15, 4400–4416.
5. Sytshev, A. E., & Merzhanov, A. G. (2004). Self-propagating high-temperature synthesis of nanomaterials. *Russian chemical reviews*, 73, 2, 147–159.
6. Levashov, E. A., Rogachev, A. S., Ukhvid, V. I., & Borovinskaya, I. P. (1999). *Fisiko-khimicheskie I tekhnologicheskie osnivy samorasprostraniayushchegosia vysokotemperaturnoho sinteza [Physico-chemical and technological bases of self-propagating high-temperature synthesis]*. Moscow: BINOM.

7. Shugalei, I. V., Novikova, I. I., Boikova, I. V., et al. (2018). Perspektivy ispolzovaniia hrafenopodobnogo materiala, poluchenohto karbonizatsiei krakhmala, dlia sozdaniia kombinirovannykh mikrobnnykh preparatov [Prospects for using graphene-like material obtained by starch carbonization to create combined microbial preparations]. *Porodorazrushaiushchii i metalloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika i tekhnologiya ego izgotovleniia i primeneniia – Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications*, 21, 200–208 [in Russian].
8. Voznyakovskii, A. P., Neverovskaya, A. Y., Gorelova, E. V., & Zabelina, A. N. (2018). Facile synthesis of 2D carbon structures as a filler for polymer composites. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 9, 1, 125–128.
9. Jin, D., Yang, X., Zhang, M., et al. (2015). A novel high surface area spherical carbon from cassava starch. *Materials Letters*, 139, 262–264.