

ISSN 1561-8331 (Print)
ISSN 2524-2342 (Online)

ФІЗИЧНАЯ ХІМІЯ
PHYSICAL CHEMISTRY

УДК 535.33;544.478-03;544.476.2
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-1-7-14>

Поступила в редакцию 17.11.2020
Received 17.11.2020

А. А. Луговский¹, Г. А. Гусаков², М. П. Самцов², В. А. Пархоменко², С. В. Адамчик²

¹*Республиканский центр проблем человека Белорусского государственного университета,
Минск, Беларусь*

²*Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко
Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь*

**КАТАЛИТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕАКЦИЙ КРОСС-СОЧЕТАНИЯ
НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ АЛМАЗОВ**

Аннотация. Разработаны методы получения нанокompозитов модифицированного ультрадисперсного алмаза детонационного синтеза с металлическим палладием и изучена их каталитическая активность в реакции кросс-сочетания Сузуки–Мияуры в различных реакционных средах. Исследованы методики регенерации палладийсодержащих нанокompозитов из реакционной смеси. Каталитическая активность нанокompозитов подтверждена исследованием кинетики реакции кросс-сочетания хроматографическим анализом реакционной смеси и сопоставима с уже используемыми подобными катализаторами. Регенерированные нанокompозиты показали сохранение каталитической активности для 3 последовательных циклов кросс-сочетания на модельных системах.

Ключевые слова: наноалмаз, катализ, кросс-сочетание, Сузуки, кинетика, палладий, композит, очистка, агрегация, ультразвук, отжиг, озонирование, восстановление, водород

Для цитирования. Каталитические системы для реакций кросс-сочетания на основе модифицированных ультрадисперсных алмазов / А. А. Луговский [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2021. – Т. 57, № 1. – С. 7–14. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-1-7-14>

A. A. Lugovski¹, G. A. Gusakov², M. P. Samtsov², V. A. Parhomenko², S. V. Adamchik²

¹*Republican Centre for Human Problems of the Belarusian State University, Minsk, Belarus*

²*A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University, Minsk, Belarus*

**MODIFIED ULTRADISPERSED DIAMONDS BASED CATALYTIC SYSTEMS
IN CROSS-COUPLING REACTIONS**

Abstract. Methods for preparation of nanocomposites of modified detonation nanodiamonds (DND) with metallic palladium have been developed and their catalytic activity in the Suzuki-Miyaura cross-coupling reaction in various reaction media has been studied. Methods for the regeneration of palladium-containing nanocomposites from the reaction mixture have been developed. The high catalytic activity of nanocomposites is confirmed by kinetic analysis based on the results of chromatographic analysis of the reaction mixture and is comparable to the literature data about similar catalytic systems. Regenerated nanocomposites showed the retention of catalytic activity for 3 consecutive cross-coupling cycles on model systems.

Keywords: nanodiamond, catalysis, cross-coupling, Suzuki, kinetics, palladium, composite, purification, aggregation, ultrasound, annealing, ozonation, reduction, hydrogen

For citation. Lugovski A. A., Gusakov G. A., Samtsov M. P., Parhomenko V. A., Adamchik S. V. Modified ultradispersed diamonds based catalytic systems in cross-coupling reactions. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navyk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2021, vol. 57, no. 1, pp. 7–14. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-1-7-14>

Введение. Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза (ДНА) являются одними из наиболее перспективных углеродных наноматериалов [1–5]. Интерес к наноалмазам вызван уникальным сочетанием их характеристик: малый размер (~5 нм) и большая активная поверхность частиц, потенциальная возможность управления ее функциональным составом, устойчивая к фотообесцвечиванию флуоресценция, низкая токсичность, химическая инертность алмазного ядра,

а также относительно низкая стоимость и масштабируемое производство. ДНА уже активно используются в качестве добавок в различные материалы и покрытия, которые обеспечивают упрочнение получаемых композитов [4, 6]. На основе наноалмазов созданы эффективные лубриканты, а также полировальные пасты для финишной полировки, обеспечивающие высокую чистоту обработки поверхности [1, 4, 7]. В последнее время активно проводятся исследования различных направлений биомедицинского применения ДНА, такие как создание диагностических люминесцентных меток, платформ для адресной доставки лекарственных препаратов, разработка эффективных антибактериальных препаратов и др. [4, 8–11]. Перспективным также является использование порошков ДНА в качестве носителя для каталитических материалов в промышленных процессах гетерогенного катализа [4, 12]. Накопленный опыт подтверждает лучшие эксплуатационные характеристики некоторых типов подобных катализаторов по сравнению с материалами на известных носителях [4]. Использование наноалмазов в качестве основы с высокой удельной поверхностью для металлов расширило их применение в таких реакциях, как окисление, дегидрохлорирование, гидроаминирование, гидрирование, гидрирующее дезаминирование и др. [13–16].

Настоящая работа рассматривает каталитические системы ДНА-палладий в реакции кросс-сочетания Сузуки–Мияуры. Цель работы – разработка таких систем, способов их изготовления и оценка каталитической активности.

Методы исследований. Из известных способов металлизации подходящим по доступности, повторяемости и контролируемости является жидкофазное восстановление соединений палладия в присутствии матрицы синтезируемого композита – суспензированного наноалмаза. В качестве восстановителей выступали газообразный водород и гидразин (ДНА-Pd-H₂, ДНА-Pd-N₂H₄). Спектрофотометрический анализ супернатантов реакционных смесей с Арсеназо III [17] показал отсутствие палладия в пределах обнаружения метода, что говорит о количественном осаждении металла на алмазной матрице.

Метод растровой электронной микроскопии использовали для изучения однородности распределения металлического палладия в нанокompозите. Для образцов композитов катализаторов ДНА-Pd-H₂ и ДНА-Pd-N₂H₄ были получены микрофотографии, приведенные на рис. 1.

Результаты и их обсуждение. На поверхности первичных агрегатов наноалмаза средних размеров 40–50 нм наблюдаются частицы осажденного палладия. Светлые области соответствуют областям локализации палладия, темные – агрегатам наноалмаза (в режиме вторичных электронов участки образца с атомами элементов с большим атомным номером имеют большую яркость).

Образование агрегатов Pd большего размера в случае образца ДНА-Pd-H₂ объясняется, вероятно, более выраженным эффектом автокаталитического роста за счет растворения водорода

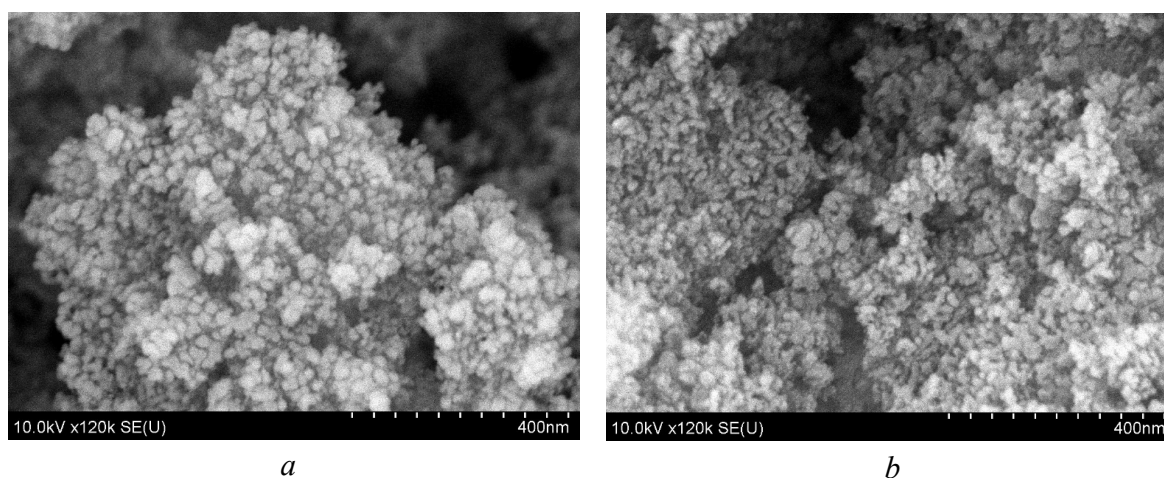


Рис. 1. Микрофотографии образцов нанокompозитов ДНА-Pd, полученных восстановлением H₂ (a) и N₂H₄ (b)

Fig. 1. SEM images of the nanocomposite samples of DND-Pd obtained by reduction with H₂ (a) and N₂H₄ (b)

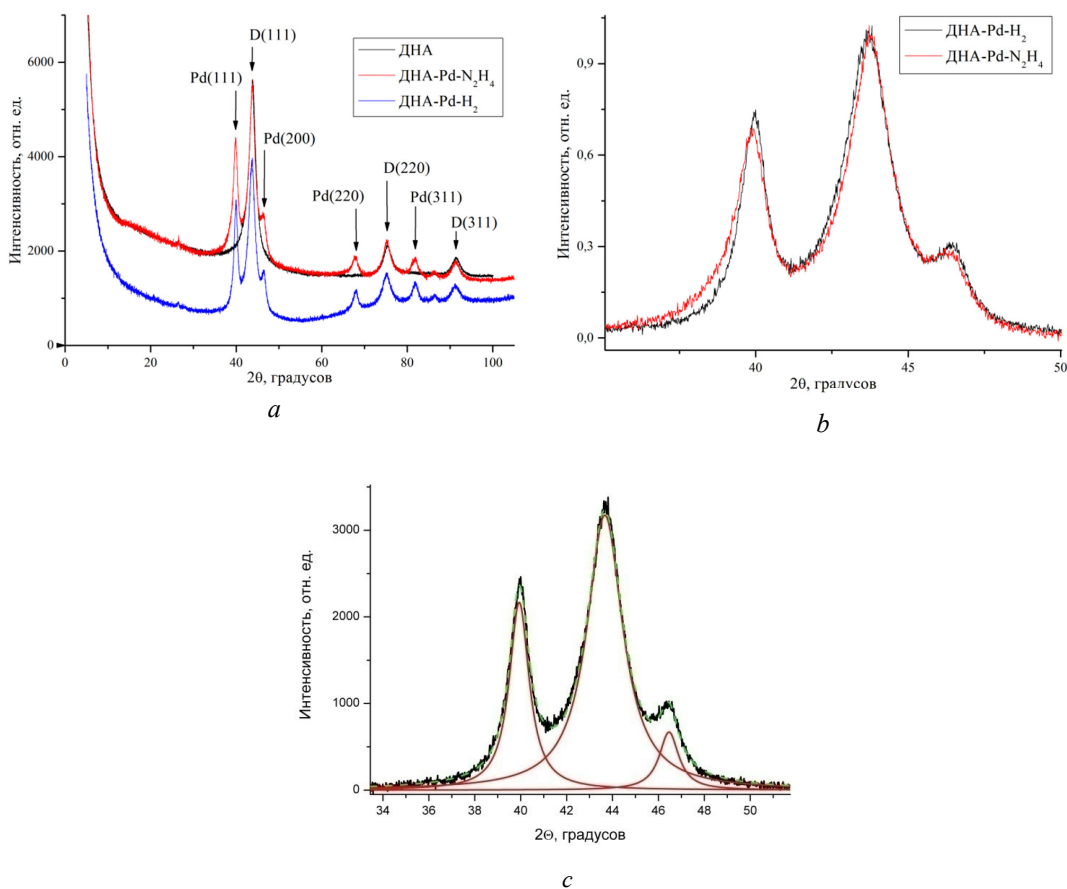


Рис. 2. Дифрактограммы порошков ДНА

Fig. 2. XRD patterns of DND powders

в уже сформированной фазе металла, в то время как при восстановлении гидразином в процессе получения образца ДНА-Pd-N₂H₄ с относительно большей вероятностью происходит зародышеобразование, что в конечном итоге увеличивает число агрегатов и соответственно уменьшает степень агрегирования, а также и их средний размер.

Элементный анализ, выполненный с помощью рентгеноспектрального анализатора, выявил содержание Pd в образцах после восстановления водородом и гидразином 5,3 и 2,7 мас.% соответственно, что согласуется со вносимым количеством PdCl₂. Для подтверждения данных о концентрации, размере кристаллитов и агрегатов металлического палладия применен метод рентгенодифракционного анализа. Дифрактограммы образцов ДНА-Pd-H₂ и ДНА-Pd-N₂H₄, а также исходного ДНА приведены на рис. 2, а.

Хорошо видно, что дифрактограммы образцов ДНА-Pd-H₂ и ДНА-Pd-N₂H₄ представляют собой суперпозицию дифрактограмм ДНА и чистого металла, что облегчает интерпретацию рефлексов. Для исследованных образцов наблюдаются некоторые отличия в положении и полуширине дифракционных максимумов (рис. 2, б), что может быть следствием различия в размерах кристаллитов и/или наличия в них внутренних напряжений.

Оценочный расчет размеров кристаллитов произведен по уравнению Селякова–Шеррера:

$$d = \frac{180K\lambda}{\pi\beta \cos\theta},$$

где K – коэффициент формы частиц (постоянная Шеррера; 0,9 для сферы); λ – длина волны использованного рентгеновского излучения (0,154 нм для источника Cu-K α); β – ширина рефлекса на полувысоте, градус; θ – угол дифракции рассматриваемого рефлекса, градус.

Декомпозицию дифрактограмм в диапазоне $2\theta = 35\div 50^\circ$ производили при помощи функций Лоренца (рис. 2, *c*). Количественные результаты декомпозиции приведены в табл. 1.

Образование кристаллитов Pd большего размера в случае образца ДНА-Pd-H₂ можно объяснить растворением водорода в сформированном зародыше и преимущественном восстановлении палладия на металлической фазе; зародышеобразование при этом сильно затруднено. Можно отметить также сдвиг линии (111) алмаза для образца ДНА-Pd-H₂ в сторону больших межплоскостных расстояний и ее некоторое уширение (от 1,79 до 1,91 град), что, вероятно, свидетельствует о наличии микронапряжений в кристаллитах и может быть обусловлено растворением водорода в поверхностной оболочке наноалмазов.

Т а б л и ц а 1. Результаты декомпозиции дифрактограмм в диапазоне $2\theta = 35\div 50^\circ$ и расчета размеров кристаллитов

Table 1. XRD pattern decomposition in the range $2\theta = 35\div 50^\circ$ and crystallite size calculation results

Образец	Площадь пика		Полуширина, градус		Расчетный размер кристаллитов, нм		Параметр решетки, нм	
	Pd(111)	D(111)	Pd(111)	D(111)	Pd(111)	D(111)	Pd(111)	D(111)
ДНА-Pd-H ₂	1,11	2,89	1,05	1,91	8,05	4,48	0,3907	0,3587
ДНА-Pd-N ₂ H ₄	1,36	2,63	1,44	1,79	5,87	4,78	0,3918	0,3582

Полученные положительные результаты различных инструментальных методов исследования доказывают корректность выведенных методик синтеза палладийсодержащих наноконпозигов на основе ДНА. Так, и электронная микроскопия, и рентгенодифракционный анализ показали высокую степень дисперсности компонентов композита, что является основным критерием активности создаваемой на его основе каталитической системы.

Для изучения активности и специфичности полученных катализаторов предложен анализ кинетики реакции Сузуки–Мияуры в различных реакционных средах, при изменении температуры и с различными субстратами. В качестве критериев используются такие параметры, как константа скорости реакции, выход реакции, частота оборотов катализатора.

Исследуемый пример реакции Сузуки–Мияуры – сочетание арилборной кислоты и арилгалогенида с образованием замещенного бифенила, проводимое в присутствии металлического палладия Pd⁰ (рис. 3). Содержание компонентов в реакционной смеси оценивалось по соотношению площадей хроматографических пиков внутреннего стандарта – дифенила – и искомого вещества.

Для оценки каталитической активности синтезированного наноконпозигов исследована кинетика реакций Сузуки–Мияуры. Серия опытов № 4–6 повторяет серию опытов № 1–3 с образцом катализатора ДНА-Pd-N₂H₄ (табл. 2).

В опытах № 2, 3, 5, 6 исследовалась деградация катализатора. Для этого порошок катализатора, отделенный в опыте № 1 и 4, последовательно вводили в реакции 2, 3 и 5, 6 соответственно. Кинетические кривые перечисленных реакций – зависимости степени протекания от времени – отображены на рис. 4.

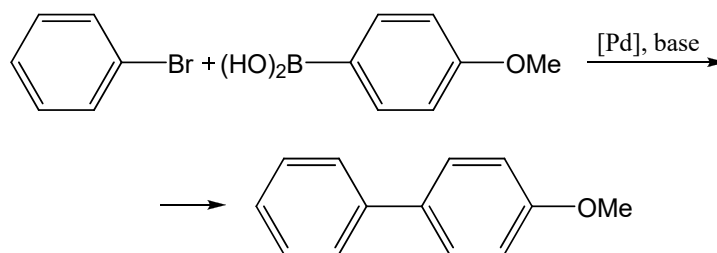


Рис. 3. Схема реакции Сузуки–Мияуры

Fig. 3. Suzuki-Miyaura reaction scheme

Таблица 2. Результаты исследования деградации катализатора в условиях реакции Сузуки–Мияуры

Table 2. Results of catalyst degradation study in Suzuki-Miyaura reaction

Номер опыта	Катализатор	Основание	Растворитель	Температура, °C	Время, ч	Выход, %	TOF, ммоль/ч·г
1	ДНА-Pd-H ₂	K ₂ CO ₃	Вода/метилцеллозоль 1:3	60	5	61	24
2	ДНА-Pd-H ₂	K ₂ CO ₃	Вода/метилцеллозоль 1:3	60	5	54	22
3	ДНА-Pd-H ₂	K ₂ CO ₃	Вода/метилцеллозоль 1:3	60	5	58	23
4	ДНА-Pd-N ₂ H ₄	K ₂ CO ₃	Вода/метилцеллозоль 1:3	60	5	64	26
5	ДНА-Pd-N ₂ H ₄	K ₂ CO ₃	Вода/метилцеллозоль 1:3	60	5	59	24
6	ДНА-Pd-N ₂ H ₄	K ₂ CO ₃	Вода/метилцеллозоль 1:3	60	5	57	23

Небольшое падение скорости и итогового выхода в случае использования образца ДНА-Pd-H₂ в опытах № 1–3 относительно ДНА-Pd-N₂H₄ (опыты № 4–6) подтверждает зарегистрированные инструментальными методами различия в морфологии и составе композитов: так, по результатам рентгенодифракционного анализа и растровой электронной микроскопии в случае композита ДНА-Pd-N₂H₄ были зарегистрированы меньшие размеры кристаллитов и агрегатов металлического палладия соответственно. Это подтверждает принципиальную необходимость получения как можно более высокодисперсной фазы Pd в составе композита.

Следует отметить, что в водно-солевой фазе реакционной смеси наблюдается относительно низкая агрегационная устойчивость ДНА. Это связано с коагуляцией порошков катализатора, что визуально проявляется как образование воскообразных отложений на стенках реакционной колбы, не диспергирующихся даже при интенсивном перемешивании. Данный процесс усиливается с накоплением в реакционной массе основного и побочного продуктов ($t_{пл} = 86$ и 175 °C соответственно) конденсации. Массоперенос в данном случае крайне затруднен, и наблюдается диффузионное ограничение скорости реакции. Возможность увеличения выхода реакции может быть получена за счет корректировки условий проведения процесса: увеличения апротонной полярной составляющей в смеси растворителей и подбора соответствующего основания, растворимого в данной среде.

Результаты последовательного ввода катализатора на основе нанокompозита в модельный эксперимент показали отсутствие заметной его деградации. Это подтверждает возможность многократного повторного использования разработанной каталитической системы без дополнительной очистки.

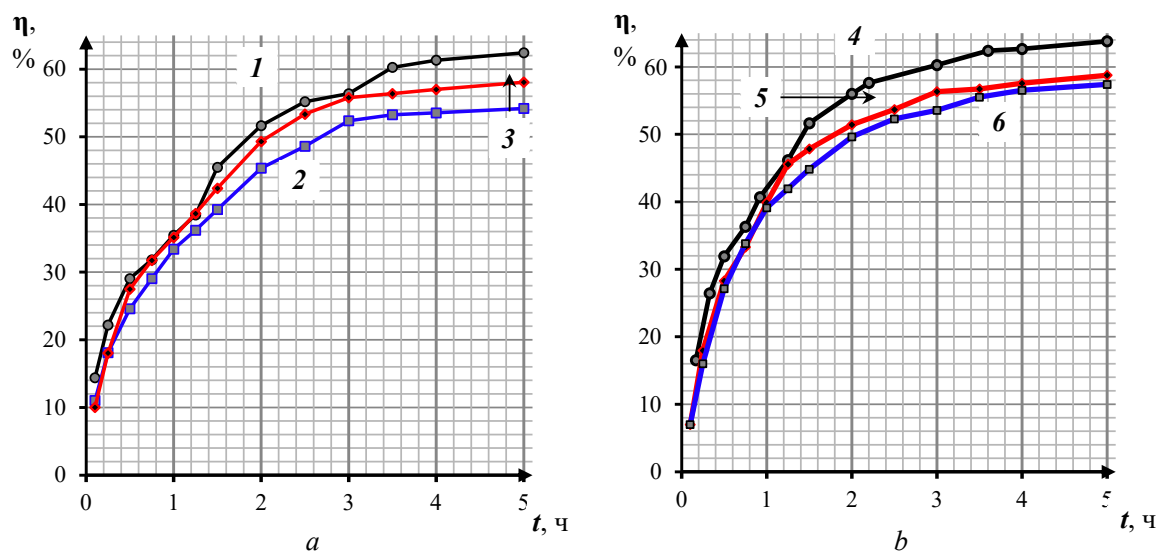


Рис. 4. Степень протекания реакции сочетания Сузуки–Мияуры в поставленных опытах (a – опыты № 1–3; b – опыты № 4–6)

Fig. 4. Conversion degree in the Suzuki-Miyaura coupling reaction in the set of experiments (a – experiments N 1–3; b – experiments N 4–6)

Экспериментальная часть. Исходным алмазосодержащим сырьем в настоящей работе послужила суспензия ДНА марки «УДА-ГО-СП» производства НП ЗАО «Синта» (г. Минск). Стандартная схема получения предполагает обработку АШ концентрированной азотной кислотой в автоклаве при температуре до 240 °С и давлении до 100 атм и несколько последовательных стадий декантации и промывки водой. Для УЗ обработки использовали УЗ-ванну мощностью 150 Вт с частотой 30 кГц.

Отжиг образцов УДА производили в вакууме (10^{-2} Па) в течение часа при температуре 750 °С при охлаждении образцов после отжига вместе с печью. Центрифугирование производилось в центрифуге ЦЛн-16 с максимальной скоростью вращения 8000 об/мин и радиусом ротора 15 см, что соответствует максимальному относительному ускорению 5000 g.

Для анализа образцов ДНА использовали электронный микроскоп LEO 1455 VP (CarlZeiss) с энергодисперсионным спектрометром для электронно-зондового микроанализа AztecEnergy-Advanced X-Max 80 (OxfordInstruments), Фурье-спектрометр Vertex 70 (Bruker, Германия), рентгеновский дифрактометр общего назначения Empyrean (PANalitical, Нидерланды), анализатор площади поверхности и размера пор SA 3100 фирмы «BECKMAN COULTER» (США).

ДНА-Pd-H₂. Образец ДНА массой 500 мг диспергировали ультразвуком в 10 мл воды. В полученную суспензию медленно в течение не менее 10 мин добавляли полученный ранее раствор соли палладия. После выдерживания смеси 15 мин, суспензию продули десятью порциями водорода сначала по 1 мл с интервалом 1 мин, а затем со скоростью 1,5 мл/с в течение 5 мин. Полученную суспензию трехкратно промыли 1 М HCl с последующим центрифугированием на 8000 об/мин (5200 g), затем еще три раза водой. Полученный порошок металлизированного ДНА сушили на воздухе при 120 °С до постоянной массы.

ДНА-Pd-N₂H₄. Для приготовления образца нанокompозита порошок ДНА массой 500 мг, предварительно измельченный в фарфоровой ступке, диспергировали в 10 мл воды под воздействием ультразвука до полного исчезновения видимых агрегатов. К нему добавили раствор соли палладия. Далее при воздействии ультразвука в суспензию прикапывали 20 мл 0,1 %-ного раствора гидразина со скоростью не менее одной капли в 20 с. Отделение, промывка и сушка аналогичны методике, описанной для образца ДНА-Pd-H₂.

Список использованных источников

1. Vul', A. Detonation Nanodiamonds: Science and Applications / A. Vul', O. Shenderova. – Boca Raton: Pan Stanford Publishing, 2013. – 346p. <https://doi.org/10.1201/b15541>
2. Williams, O. A. Nanodiamond / O. A. Williams. – London: The Royal Society of Chemistry, 2014. – 530 p. <https://doi.org/10.1039/9781849737616>
3. Ho, D. Nanodiamonds: Applications in Biology and Nanoscale Medicine / D. Ho. – N. Y.: Springer Science + Business Media, 2010. – 286 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0531-4>
4. The properties and applications of nanodiamonds / V. N. Mochalin [et al.] // Nature Nanotech. – 2012. – Vol 7, N 1. – P. 11–23. <https://doi.org/10.1038/nnano.2011.209>
5. Arnault, J.-C. Nanodiamonds / J.-C. Arnault. – London: Elsevier, 2017. – 514.
6. Turcheniuk, K. Biomedical applications of nanodiamond / K. Turcheniuk, V. Mochalin // Nanotechnology. – 2017. – Vol. 28, N 25. – P. 252001. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa6ae4>
7. Mochalin, V. N. Covalent Incorporation of Aminated Nanodiamond into an Epoxy Polymer Network / V. N. Mochalin // ACS Nano. – 2011. – Vol. 5, N 9. – P. 7494–7502. <https://doi.org/10.1021/nn2024539>
8. Dolmatov, V. Y. Detonation nanodiamonds in oils and lubricants / V. Y. Dolmatov // J. Superhard Mater. – 2010. – Vol. 32, N 1. – P. 14–20. <https://doi.org/10.3103/s1063457610010028>
9. Chauhan, S. Nanodiamonds with powerful ability for drug delivery and biomedical applications: Recent updates on in vivo study and patents / S. Chauhan, N. G. Jain, U. Nagaich // J. Pharm. Anal. – 2020. – Vol. 10, N 1. – P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jpha.2019.09.003>
10. Moghimi, S. M. Nanoparticle transport pathways into tumors / S. M. Moghimi, D. Simberg // J. Nanopart. Res. – 2018. – Vol. 20, N 169. – P. 168–172. <https://doi.org/10.1007/s11051-018-4273-8>
11. Fluorescent nanodiamond tracking reveals intraneuronal transport abnormalities induced by brain-disease-related genetic risk factors / S. Haziza [et al.] // Nat. Nanotechnol. – 2017. – Vol. 12, N 4. – P. 322–328. <https://doi.org/10.1038/nnano.2016.260>

12. Whitlow, J. Multifunctional nanodiamonds in regenerative medicine: Recent advances and future directions / J. Whitlow, S. Pacelli, A. Paul // *J. Control. Release.* – 2017. – N 261. – P. 62–86. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2017.05.033>
13. Serp, P. *Carbon Materials for Catalysis* / P. Serp, J. L. Figueiredo. – Oxford: John Wiley & Sons, 2009. – 589 p. <https://doi.org/10.1002/9780470403709>
14. Reduction of nitrobenzene catalyzed by carbon materials / S. Wu [et al.] // *Chin. J. Catal.* – 2014. – Vol. 35, N 6. – P. 914–921. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(14\)60102-9](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(14)60102-9)
15. Palladium on ultradisperse diamond and activated carbon: the relation between structure and activity in hydrodechlorination / S. A. Kachevskii, [et al.] // *Russ. J. Phys. Chem.* – 2007. – Vol. 81, N 6. – P. 866–873. <https://doi.org/10.1134/S0036024407060064>
16. Synthesis and application of gold-carbon hybrids as catalysts for the hydroamination of alkynes / Seral-Ascaso [et al.] // *Appl. Catal. A: Gen.* – 2013. – Vol. 456. – P. 88–95. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2013.02.008>
17. Arsenazo III and its analogues-VI* Some new photometric reagents for palladium / S. B. Savvin [et al.] // *Talanta.* – 1969. – Vol. 16. – P. 423–429. [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(69\)80036-6](https://doi.org/10.1016/0039-9140(69)80036-6)

References

1. Vul' A., Shenderova O. *Detonation Nanodiamonds: Science and Applications*. Boca Raton: Pan Stanford Publishing, 2013. 346 p. <https://doi.org/10.1201/b15541>
2. Williams O. A. *Nanodiamond*. London: The Royal Society of Chemistry, 2014. 530 p. <https://doi.org/10.1039/9781849737616>
3. Ho D. *Nanodiamonds: Applications in Biology and Nanoscale Medicine*. N.Y.: Springer Science + Business Media, 2010. 286 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0531-4>
4. Mochalin V. N., Shenderova O., Ho D., Gogotsi Y. The properties and applications of nanodiamonds. *Nature Nanotechnology*, 2012, vol. 7, no. 1, pp. 11–23. <https://doi.org/10.1038/nnano.2011.209>
5. Arnault J.-C. *Nanodiamonds*. London: Elsevier, 2017. 514 p.
6. Turcheniuk K., Mochalin V. Biomedical applications of nanodiamond. *Nanotechnology*, 2017, vol. 28, iss. 25, p. 252001. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa6ae4>
7. Mochalin V. N. Covalent Incorporation of Aminated Nanodiamond into an Epoxy Polymer Network. *ACS Nano*, 2011, vol. 5, iss. 9, pp. 7494–7502. <https://doi.org/10.1021/nn2024539>
8. Dolmatov V. Y. Detonation nanodiamonds in oils and lubricants. *Journal of Superhard Materials*, 2010, vol. 32, no. 1, pp. 14–20. <https://doi.org/10.3103/s1063457610010028>
9. Chauhan S., Jain N. G., Nagaich U. Nanodiamonds with powerful ability for drug delivery and biomedical applications: Recent updates on in vivo study and patents. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 2020, vol. 10, iss. 1, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jpha.2019.09.003>
10. Moghimi S. M., Simberg D. Nanoparticle transport pathways into tumors. *Journal of Nanoparticle Research*, 2018, vol. 20, iss. 169, pp. 168–172. <https://doi.org/10.1007/s11051-018-4273-8>
11. Haziza S., Mohan N., Loe-Mie Y., Lepagnol-Bestel A.-M., Massou S., Adam M.-P., Xuan Loc Le, Viard J., Plancon C., Daudin R., Koebel P., Dorard E., Rose C., Hsieh F.-J., Chih-Che Wu, Potier B., Herault Y., Sala C., Corvin A., Allinquant B., Huan-Cheng Chang, Treussart F., Simonneau M. Fluorescent nanodiamond tracking reveals intraneuronal transport abnormalities induced by brain-disease-related genetic risk factors. *Nature Nanotechnology*, 2017, vol. 12, iss. 4, pp. 322–328. <https://doi.org/10.1038/nnano.2016.260>
12. Whitlow J., Pacelli S., Paul A. Multifunctional nanodiamonds in regenerative medicine: Recent advances and future directions. *Journal of Controlled Release*, 2017, vol. 261, pp. 62–86. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2017.05.033>
13. Serp P., Figueiredo J. L. *Carbon Materials for Catalysis*. Oxford: John Wiley & Sons, 2009. 589 p. <https://doi.org/10.1002/9780470403709>
14. Wu S., Wen G., Zhong B., Zhang B., Gu X., Wang N., Su D. S. Reduction of nitrobenzene catalyzed by carbon materials. *Chinese Journal of Catalysis*, 2014, vol. 35, iss. 6, pp. 914–921. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(14\)60102-9](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(14)60102-9)
15. Kachevskii S. A., Golubina E. V., Lokteva E. S., Lunin V. V. Palladium on ultradisperse diamond and activated carbon: the relation between structure and activity in hydrodechlorination. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2007, vol. 81, iss. 6, pp. 866–873. <https://doi.org/10.1134/S0036024407060064>
16. Seral-Ascaso A., Luquin A., Lázaro M. J., Germán F., Laguna M., Muñoz E. Synthesis and application of gold-carbon hybrids as catalysts for the hydroamination of alkynes. *Applied Catalysis A: General*, 2013, vol. 456, pp. 88–95. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2013.02.008>
17. Savvin S. B., Propistsova R. F., Okhanova L. A. Arsenazo III and its analogues-VI* Some new photometric reagents for palladium. *Talanta*, 1969, vol. 16, pp. 423–429. [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(69\)80036-6](https://doi.org/10.1016/0039-9140(69)80036-6)

Информация об авторах

Луговский Александр Анатольевич – канд. хим. наук, доцент, директор Республиканского центра проблем человека Белгосуниверситета (Курчатова, 7, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lugovski@bsu.by

Information about the authors

Alexander A. Lugovski – Ph. D. (Chemistry), Head of the Republican Center for Human Problems of the Belarusian State University (7, Ac. Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lugovski@bsu.by

Гусаков Григорий Анатольевич – канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник. Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белгосуниверситета (Курчатова, 7, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: gga68@rambler.ru

Самцов Михаил Петрович – д-р физ.-мат. наук, доцент, зав. лаб. Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белгосуниверситета (Курчатова, 7, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: samtsov@bsu.by

Пархоменко Владислав Александрович – мл. науч. сотрудник. Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белгосуниверситета (Курчатова, 7, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: parkhomm2@mail.ru

Адамчик Сергей Владимирович – науч. сотрудник. Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белгосуниверситета (Курчатова, 7, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sergey.adamchik@gmail.com

Gregory A. Gusakov – Ph. D. (Physics), Senior Researcher. A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University (7, Ac. Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gga68@rambler.ru

Mihail P. Samtsov – Ph. D. (Physics), Associate Professor, Head of the Laboratory. A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University (7, Ac. Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: samtsov@bsu.by

Vladislav A. Parhomenko – Junior Researcher. Republican Center for Human Problems of the Belarusian State University (7, Ac. Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: parkhomm2@mail.ru

Sergey V. Adamchik – Researcher. Republican Center for Human Problems of the Belarusian State University (7, Ac. Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sergey.adamchik@gmail.com