

УДК 546.26-162:534.838.7:547.469.3

Оригинальная статья

Изучение каталитического синтеза углеродных наноструктур при микроволновом пиролизе целлюлозы

А.Н. Заритовский¹, Е.Н. Котенко¹, С.В. Гришук¹, В.А. Глазунова^{1,2}, Г.К. Волкова^{1,2}

¹ФГБНУ «Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко»

283048, Россия, ДНР, г. Донецк, ул. Розы Люксембург, 70

²ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина»

283048, Россия, ДНР, г. Донецк, ул. Розы Люксембург, 72

zaritovski@gmail.com

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.864

Аннотация: Одно из направлений разработки методов эффективного и экономичного синтеза углеродных наноструктур из растительного сырья заключается в использовании для проведения пиролитических преобразований биомассы энергии сверхвысокочастотного электромагнитного поля. Объединение микроволнового облучения и процесса пиролиза представляет собой новое решение, имеющее ряд преимуществ, повышающих эффективность переработки биомассы и определяющих перспективность микроволнового пиролиза в получении углеродных нанопродуктов. В работе изучены условия процесса каталитического синтеза углеродных нанотрубок при микроволновом пиролизе целлюлозы – основного компонента биомассы. Задача исследования – оценка влияния бинарного никель-железного катализатора на углеродном носителе на синтез углеродных наноструктур, протекающий в процессе с участием органических добавок (глюкозы, тиомочевина), назначение которых заключается в предотвращении окислительных процессов в системе и поддержании активности катализатора. Опыты выполнялись посредством обработки микроволновым излучением частотой 2450 МГц и мощностью 1000 Вт смеси реагентов в течение 10-12 минут. Синтезированные образцы охарактеризованы методами рентгенофазового анализа и просвечивающей электронной микроскопии. Во всех экспериментах наблюдалось образование многостенных углеродных нанотрубок и малослойных графеновых частиц. Экспериментально установлено, что используемый катализатор проявил большую активность в процессах микроволнового синтеза углеродных нанотрубок в присутствии глюкозы.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, целлюлоза, микроволновой пиролиз, никель-железный катализатор, глюкоза, тиомочевина.

1. Введение

Углеродные наноматериалы (УНМ), в первую очередь углеродные нанотрубки (УНТ), продолжают привлекать внимание исследователей в плане поиска уникальных и простых маршрутов их синтеза, создания каталитических систем, способствующих максимальному направленному преобразованию УНМ в нужные продукты, разработки современных, высокоэффективных и экологически чистых технологий получения углеродных наноструктур.

В последнее время наблюдается четко выраженная тенденция расширения ассортимента сырьевых источников для синтеза УНМ за счет вовлечения в процесс сырья биологического происхождения. Получение наноматериалов на основе углерода из биологических ресурсов – это

подход, который включает расщепление крупных углеродсодержащих соединений на углеродные структуры наноразмерного диапазона.

Биомасса, являющаяся природным возобновляемым источником, с успехом может выступать в роли прекурсора углерода в синтезе УНТ. Реализованные к настоящему времени на практике технологии термохимической конверсии биомассы, такие как пиролиз и его многочисленные модификации, сориентированы на производство энергетических топливных компонентов и химикатов в различных агрегатных состояниях и не предусматривают возможность эффективного преобразования растительного сырья в передовые наноматериалы на основе углерода.

Один из путей решения данной задачи заключается в использовании для проведения пиролитических преобразований биомассы энергии сверхвысокочастотного электромагнитного поля, инструмента, положительно зарекомендовавшего себя в органической химии при проведении высокотемпературных процессов [1-3].

Объединение микроволнового (МВ) облучения и процесса пиролиза позволяет повысить эффективность переработки биомассы и обеспечивает ряд преимуществ, включая объемный и равномерный нагрев внутри активной зоны на молекулярном уровне, гибкость процесса и портативность оборудования, меньшую тепловую инерцию, более быстрый отклик и более чистые продукты, энергосбережение, определяющих перспективность микроволнового пиролиза растительного сырья. С химической точки зрения МВ излучение способствует синтезу углеродных наноматериалов при термохимическом преобразовании биомассы за счет содействия протеканию процессов карбонизации [4].

Основным компонентом биомассы является целлюлоза, которая считается самым распространенным природным органическим полимером, содержащим около 50% углерода. Это растительный неразветвленный полисахарид со структурой, представленной остатками глюкозы, соединенными между собой β -1,4-гликозидными связями (см. рис. 1) [5].

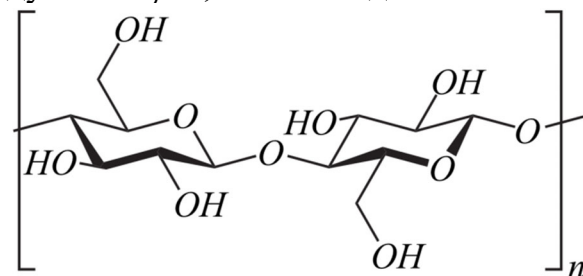


Рис. 1. Химическая структура целлюлозы.

Химические преобразования, происходящие при пиролизе целлюлозного сырья, осуществляются по радикально-цепному механизму и сопровождаются сложными физико-химическими процессами,

связанными со структурными изменениями, снижением степени полимеризации, параллельным и последовательным протеканием многочисленных реакций, проходящих с образованием разнообразных промежуточных и конечных продуктов. Механизм деструкции зависит от характера среды, наличия катализаторов, условий нагрева и ряда других факторов. По мнению автора исследования [6], все процессы термической конверсии целлюлозы можно свести к двум типам превращений: реакциям деструкции полимера и промежуточных продуктов, которые приводят к получению низкомолекулярных соединений, и реакциям конденсации (синтеза), сопровождающимся возникновением новых типов углерод-углеродных связей.

Следует отметить, что сложность и многообразие химических превращений термической конверсии целлюлозы затрудняют интерпретацию и окончательную трактовку механизма протекания процесса, хотя термическая деструкция целлюлозы изучена довольно подробно и эта область исследований характеризуется накоплением обширного экспериментального материала.

Конечными продуктами термохимических превращений целлюлозы, происходящих под воздействием сверхвысокочастотного электромагнитного излучения с участием катализатора, являются в основном газообразные энергетические продукты и смесь твердых углеродистых материалов, включающая многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ) различной морфологии, а также биоуголь – богатый углеродом, аморфный пористый материал с низкой кристалличностью. Биоуголь, в свою очередь, может служить предшественником углерода и катализатором в последующем температурном синтезе МУНТ [1, 4, 7, 8].

Авторы работ [9, 10], изучая процесс микроволнового пиролиза биомассы, установили, что углеродные нанотрубки формировались только под действием МВ излучения, в то время как обычный пиролиз биомассы не приводит к образованию УНТ. При этом именно целлюлоза является активным компонентом, ответственным за синтез нанотрубок за счет летучих веществ, образующихся в процессе МВ пиролиза, которые действуют как эффективный источник углерода для образования УНТ.

Процессы МВ карбонизации целлюлозы, сориентированные на получение УНТ, проводят обычно в инертной атмосфере с использованием металлических катализаторов при температурах 600-1400°C [11].

Следует признать, что в отличие от последовательности и специфики протекания обычного пиролиза, механизм МВ пиролиза, равно как и отдельные параметры проходящих реакций, изучены недостаточно. В частности, окончательно не выяснено влияние характера металла-катализатора и различных добавок в реакционную смесь на направление

преобразований и структуру образующихся нанопродуктов.

Цель настоящей разработки заключается в изучении условий процесса каталитического синтеза углеродных наноструктур при микроволновом пиролизе целлюлозы.

Задача исследования состоит в оценке влияния бинарного металлического катализатора на углеродном носителе на синтез углеродных наноструктур, протекающий при микроволновом пиролизе целлюлозы в присутствии органических добавок.

2. Экспериментальная часть и обсуждение результатов

В работе исследована активность бинарного никель-железного катализатора на графитовой подложке при синтезе УНС в присутствии добавок органических веществ, обладающих восстановительными свойствами, назначение которых, предположительно, заключается в предотвращении окислительных процессов в системе и поддержании активности катализатора. Объектом исследования являлась микрокристаллическая целлюлоза марки МКЦ.

В экспериментах применялся катализатор, состоящий из никеля и железа, осажденных на углеродный носитель (графит марки МККЗ, фракция 0,2-0,4 мм) методом химического восстановления солей из растворов. Содержание никеля и железа составляло 21,7 и 5,3% соответственно. Кроме этих элементов, используемый катализатор содержал фосфор в количестве 0,3%. В роли добавок выступали глюкоза и тиомочевина. Сравнительные эксперименты осуществлялись без добавок.

Опыты выполнялись посредством воздействия микроволновым излучением частотой 2450 МГц и мощностью 1000 Вт на смеси тщательно перемешанных реагентов, помещенных в кварцевую ампулу. Обработка осуществлялась циклически по 2 мин в течение 10-12 минут. Протекание процесса сопровождается возникновением искровых разрядов, свечением реакционной массы, газовыделением. Продукты пиролитических превращений с использованием глюкозы (УМ-1), тиомочевины (УМ-2) и без участия добавок (УМ-3) образуются в виде темных объемных порошков.

Особенности внутренней структуры и морфология синтезированных наноуглеродных частиц – продуктов МВ пиролиза целлюлозы – охарактеризованы методами рентгенофазового анализа (РФА) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с помощью дифрактометра «ДРОН-3» и микроскопа JEM-200A фирмы «JEOL».

На рис. 2 приведены микрофотографии наноуглеродных структур, образовавшихся в экспериментах с участием восстановительных добавок и без них, а также результаты расчетов, выполненных по данным РФА.

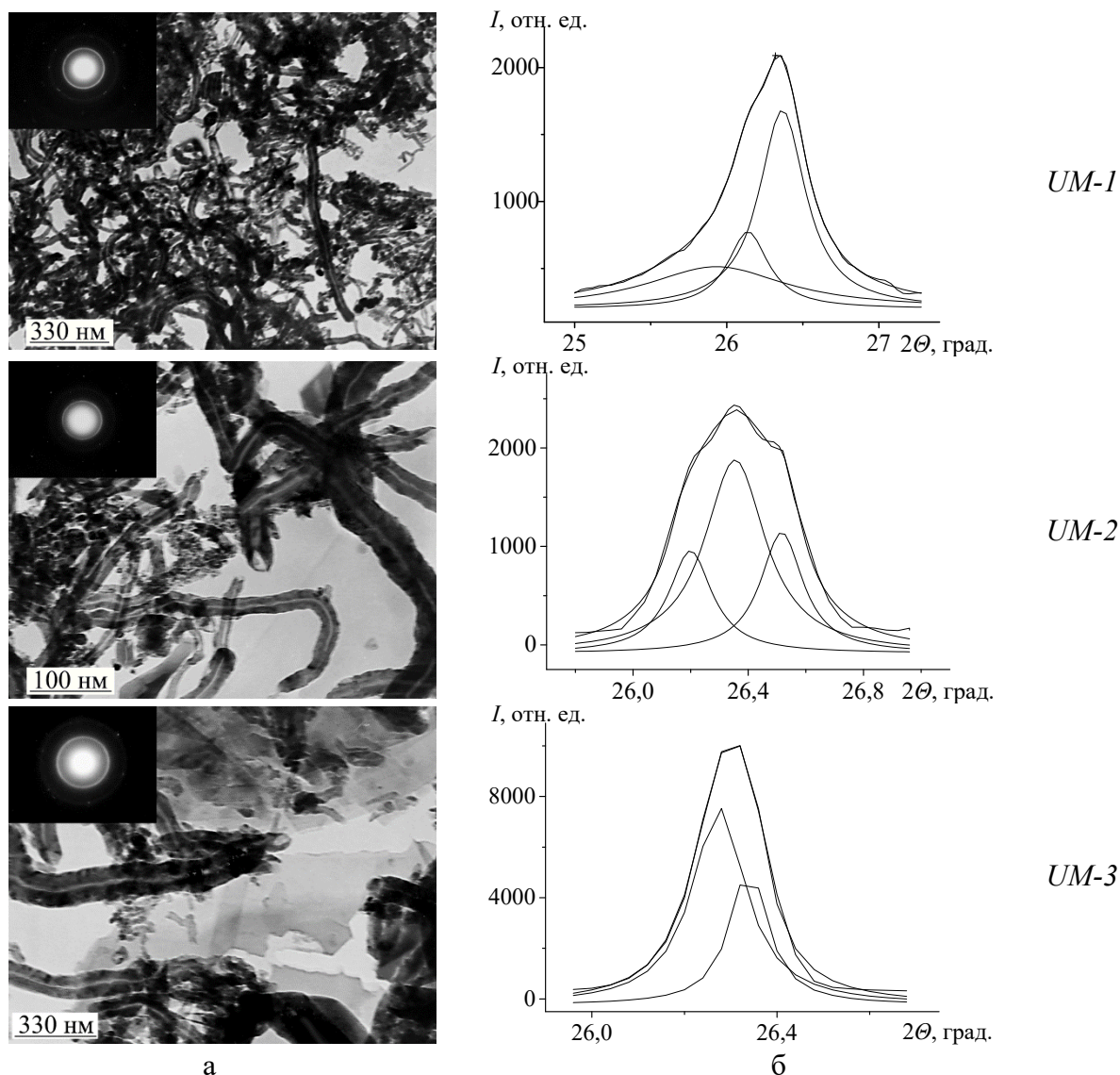


Рис. 2. а – ПЭМ-микрофотографии и б – деконволюция пика 002 продуктов микроволнового пиролиза целлюлозы: UM-1; UM-2; UM-3.

На ПЭМ-изображениях синтезированных образцов во всех случаях наблюдаются многостенные углеродные нанотрубки и малослойные графеновые частицы. Однако, согласно данным ПЭМ, формирование УНТ более продуктивно реализуется в опытах с использованием добавок, особенно в случае с глюкозой. Возможно, это связано с известными сведениями о том, что введение в реакционную смесь глюкозы, проявляющей восстановительные свойства и обладающей способностью ингибировать радикальные реакции, сопровождающие пиролиз целлюлозы, направляет процесс в сторону термоллиза C–C–связей, тем самым, по нашему мнению, способствуя последующему образованию УНТ. Кроме того, результаты экспериментов позволяют высказать предположение, что глюкоза и продукты ее распада участвуют в

поддержании высокой активности катализатора. В случае тиомочевины, характеризующейся более слабыми восстановительными свойствами, процесс протекает менее выражено за счет частичной агрегации катализатора и снижения его каталитической активности, о чем свидетельствует появление на микрофотографиях углеродных трубок большого диаметра.

Микрофотографии образцов *УМ-2* и *УМ-3*, кроме изогнутых углеродных трубок диаметром в интервале 4-59 нм, демонстрируют трубки до 180 нм в диаметре, тогда как в продукте *УМ-1* фиксируются более упорядоченные массивы МУНТ диаметром от 12 до 45 нм.

При рассмотрении процесса микроволновых превращений нельзя исключать участие в нем фосфора, входящего в состав катализатора, учитывая известную информацию о способности фосфора и его соединений выступать при пиролизе целлюлозы в роли антипирена, который способствует процессам дегидратации с получением карбонизованных продуктов и, на наш взгляд, благоприятствует процессу синтеза УНТ. Кроме того, известно, что фосфид железа, образование которого возможно в процессе, катализирует формирование углеродных нанотрубок [12].

Дебаевские кольца на микроэлектронogramмах также свидетельствуют в пользу структур УНТ, а гексагональные рефлексы указывают на наличие малослойных графеновых частиц.

Результаты электронной микроскопии, согласно которым основными компонентами синтезированных УНМ являются МУНТ и пакеты графеновых частиц, подтверждены рентгенофазовым анализом. По данным РФА, линии *001*, наблюдаемые на дифрактограммах синтезированных образцов, имеют низкую интенсивность по сравнению с исходными веществами, несимметричны и сдвинуты в область малых углов 2θ . Несоответствие положений экспериментальных пиков *002* с рассчитанными, а также их уширение и несимметричность свидетельствуют о неоднородности состава образцов. С целью идентификации фаз для каждого образца осуществлено разложение основного пика *002* на составляющие, представив их в виде суперпозиции кривых Лоренца. Выяснилось, что сложные экспериментальные рефлексы графитоподобной фазы образуются путем наложения нескольких профилей, каждый из которых характеризуется своим межплоскостным расстоянием. Основная фаза в структуре наноуглеродных материалов установлена путем вычисления истинного положения максимума рефлекса *002*. Индицирование плоскостей (*hkl*) проводили в рамках гексагональной ячейки. Процедуру деконволюции отражений выполняли с помощью программы Origin. Результаты представлены в Таблице 1.

Таким образом, рассчитанные межплоскостные расстояния основной и первых двух фаз исследованных образцов находятся в области детектирования углеродных нанотрубок и соответствуют фазам МУНТ различной структурной упаковки, тогда как третью фазу можно соотнести со структурой турбостратного углерода.

Таблица 1. Результаты деконволюции профилей 002 для рассчитанных фаз продуктов микроволнового пиролиза целлюлозы.

Образец	Параметр	Фаза			
		Основная	I	II	III
UM-1	2Θ (расч.), °	26,516	26,452	26,380	26,194
	$d_{(002)}$, Å	3,3676	3,3831	3,3790	3,4068
UM-2	2Θ (расч.), °	26,496	26,518	26,356	26,199
	$d_{(002)}$, Å	3,3691	3,3792	3,3822	3,4079
UM-3	2Θ (расч.), °	26,516	26,527	–	26,191
	$d_{(002)}$, Å	3,3655	3,3818	–	3,4131

3. Заключение

Показано, что использование бинарного никель-железного катализатора в термохимическом микроволновом превращении целлюлозы приводит к образованию углеродных наноструктур, среди которых идентифицированы массивы многослойных углеродных нанотрубок и пакеты графеновых частиц. Экспериментально установлено, что более эффективно синтез УНТ реализуется в случае использования в качестве добавки глюкозы. Высказано предположение, что данный факт обусловлен восстановительными свойствами глюкозы, влияющими на процесс термолитиза целлюлозы и поддерживающими активность катализатора синтеза углеродных нанотрубок.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, бюджетная тема «Углеродные наночастицы с заданной морфологией: синтез, структура и физико-химические свойства, FRES-2023-0006».

Библиографический список:

1. **Zhang, X.** An overview of a novel concept in biomass pyrolysis: microwave irradiation / X. Zhang, K. Rajagopalan, H. Lei et al. // Sustainable Energy and Fuels. – 2017. – V. 1. – I. 8. – P. 1664-1699. DOI: 10.1039/c7se00254h.
2. **Baghel, P.** Ultrafast growth of carbon nanotubes using microwave irradiation: characterization and its potential applications / P. Baghel, A.K. Sakhiya, P. Kaushal // Heliyon. – 2022. – V. 8. – I. 10. – Art. № e10943. – 20 p. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e10943.
3. **Ge, L.** A review of comprehensive utilization of biomass to synthesize carbon nanotubes: From chemical vapor deposition to microwave pyrolysis / L. Ge, M. Zuo, Y. Wang et al. // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2024. – V. 177. – Art. № 106320. – 16 p. DOI: 10.1016/j.jaap.2023.106320.
4. **Adeola, A.O.** Microwave-assisted synthesis of carbon-based nanomaterials from biobased resources for water

- treatment applications: emerging trends and prospects / A.O. Adeola, M.P. Duarte, R. Naccache // *Frontiers in Carbon*. – 2023. – V. 2. – Art. № 1220021. – 29 p. DOI: 10.3389/frcarb.2023.1220021.
5. **Mugadza, K.** Synthesis of Carbon Nanomaterials from Biomass Utilizing Ionic Liquids for Potential Application in Solar Energy Conversion and Storage / K. Mugadza, A. Stark, P.G. Ndungu, V.O. Nyamori // *Materials*. – 2020. – V. 13. – Art. № 3945. – 26 p. DOI: 10.3390/ma13183945.
6. **Дейнеко, И.П.** Химические превращения целлюлозы при пиролизе / И.П. Дейнеко // *Лесной журнал*. – 2004. – № 4. – С. 97-111.
7. **Morgan Jr., H.M.** A review of catalytic microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass for value-added fuel and chemicals / H.M. Morgan Jr., Q. Bu, J. Liang et al. // *Bioresource Technology*. – 2017. – V. 230. – P. 112-121. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.01.059.
8. **Wang, Z.** State-of-the-Art on the Production and Application of Carbon Nanomaterials from Biomass / Z. Wang, D. Shen, C. Wu, S. Gu // *Green Chemistry*. – 2018. – V. 20. – I. 22. – P. 5031-5057. DOI: 10.1039/c8gc01748d.
9. **Omoriyekomwan, J.E.** Mechanistic study on direct synthesis of carbon nanotubes from cellulose by means of microwave pyrolysis / J.E. Omoriyekomwan, A. Tahmasebi, J. Zhang, J. Yu // *Energy Conversion and Management*. – 2019. – V. 192. – P. 88-99. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.04.042.
10. **Omoriyekomwan, J.E.** A review on the recent advances in the production of carbon nanotubes and carbon nanofibers via microwave-assisted pyrolysis of biomass / J.E. Omoriyekomwan, A. Tahmasebi, J. Dou et al. // *Fuel Processing Technology*. – 2021. – V. 214. – Art. № 106686. – 22 p. DOI: 10.1016/j.fuproc.2020.106686.
11. **Omoriyekomwan, J.E.** Formation of hollow carbon nanofibers on bio-char during microwave pyrolysis of palm kernel shell / J.E. Omoriyekomwan, A. Tahmasebi, J. Zhang, J. Yu // *Energy Conversion and Management*. – 2017. – V. 148. – P. 583-592. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.06.022.
12. **Cruz-Silva, E.** Heterodoped Nanotubes: Theory, Synthesis, and Characterization of Phosphorus-Nitrogen Doped Multiwalled Carbon Nanotubes / E. Cruz-Silva, D.A. Cullen, L. Gu et al. // *ACS Nano*. – 2008. – V. 2. – № 3. – P. 441-448. DOI: 10.1021/nn700330w.

References:

1. Zhang X., Rajagopalan K., Lei H. et al. An overview of a novel concept in biomass pyrolysis: microwave irradiation, *Sustainable Energy and Fuels*, 2017, vol. 1, issue 8, pp. 1664-1699. DOI: 10.1039/c7se00254h.
2. Baghel P., Sakhiya A.K., Kaushal P. Ultrafast growth of carbon nanotubes using microwave irradiation: characterization and its potential applications, *Heliyon*, 2022, vol. 8, issue 10, art. no. e10943, 20 p. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e10943.
3. Ge L., Zuo M., Wang Y. et al. A review of comprehensive utilization of biomass to synthesize carbon nanotubes: From chemical vapor deposition to microwave pyrolysis, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2024, vol. 177, art. no. 106320, 16 p. DOI: 10.1016/j.jaap.2023.106320.
4. Adeola A.O., Duarte M.P., Naccache R. Microwave-assisted synthesis of carbon-based nanomaterials from biobased resources for water treatment applications: emerging trends and prospects, *Frontiers in Carbon*, 2023, vol. 2, art. no. 1220021, 29 p. DOI: 10.3389/frcarb.2023.1220021.
5. Mugadza K., Stark A., Ndungu P.G., Nyamori V.O. Synthesis of Carbon Nanomaterials from Biomass Utilizing Ionic Liquids for Potential Application in Solar Energy Conversion and Storage, *Materials*, 2020, vol. 13, art. no. 3945, 26 p. DOI: 10.3390/ma13183945.
6. Dejneko I.P. Khimicheskie prevrashcheniya tsellyulozy pri pirolize [Chemical transformations of cellulose under pyrolysis], *Lesnoy Zhurnal [Russian Forestry Journal]*, 2004, no. 4, pp. 97-111. (In Russian).
7. Morgan Jr. H.M., Bu Q., Liang J. et al. A review of catalytic microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass for value-added fuel and chemicals, *Bioresource Technology*, 2017, vol. 230, pp. 112-121. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.01.059.
8. Wang Z., Shen D., Wu C., Gu S. State-of-the-Art on the Production and Application of Carbon Nanomaterials from Biomass, *Green Chemistry*, 2018, vol. 20, issue 22, pp. 5031-5057. DOI: 10.1039/c8gc01748d.
9. Omoriyekomwan J.E., Tahmasebi A., Zhang J., Yu J. Mechanistic study on direct synthesis of carbon nanotubes from cellulose by means of microwave pyrolysis, *Energy Conversion and Management*, 2019, vol. 192, pp. 88-99. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.04.042.
10. Omoriyekomwan J.E., Tahmasebi A., Dou J. et al. A review on the recent advances in the production of carbon nanotubes and carbon nanofibers via microwave-assisted pyrolysis of biomass, *Fuel Processing Technology*, 2021, vol. 214, art. no. 106686, 22 p. DOI: 10.1016/j.fuproc.2020.106686.
11. Omoriyekomwan J.E., Tahmasebi A., Zhang J., Yu J. Formation of hollow carbon nanofibers on bio-char during microwave pyrolysis of palm kernel shell, *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 148, pp. 583-592. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.06.022.

12. Cruz-Silva E., Cullen D.A., Gu L. et al. Heterodoped Nanotubes: Theory, Synthesis, and Characterization of Phosphorus-Nitrogen Doped Multiwalled Carbon Nanotubes, *ACS Nano*, 2008, vol. 2, no. 3, pp. 441-448. DOI: 10.1021/nn700330w.

Original paper

Studying catalytic synthesis of carbon nanostructures during microwave-assisted pyrolysis of cellulose

A.N. Zaritovskii¹, E.N. Kotenko¹, S.V. Grishchuk¹, V.A. Glazunova^{1,2}, G.K. Volkova^{1,2}

¹*L.M. Litvinenko Institute of Physical Organic and Coal Chemistry, Donetsk, Russia*

²*Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering, Donetsk, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.864

Abstract: One of the ways to develop methods for effective and economical synthesis of carbon nanostructures from the plant raw materials is to use the energy of the microwave electromagnetic field for pyrolytic transformations of biomass. Combining microwave irradiation and pyrolysis process is a new solution with several advantages that increase the efficiency of the biomass processing and determine the prospects of the microwave pyrolysis in obtaining carbon nanoproducs. In this work, the conditions for catalytic synthesis of carbon nanotubes through the microwave pyrolysis of cellulose, a major component of biomass, were studied. The objective of the present investigation is to evaluate the effect of a binary nickel-iron catalyst supported on a carbon substrate on synthesis of carbon nanostructures. This process involves the use of organic additives, such as glucose and thiourea, which are intended to prevent oxidative reactions in the system and maintain the activity of the catalyst. Experiments were carried out by treating the mixture of reagents with the microwave radiation with a frequency of 2450 MHz and a power of 1000 W for 10-12 minutes. The synthesis samples were characterized by X-ray phase analysis and transmission electron microscopy. In all experiments, the formation of multi-walled carbon nanotubes and few-layer graphene particles was observed. It was experimentally found that the used catalyst showed great activity in the microwave synthesis of carbon nanotubes in the presence of glucose.

Keywords: carbon nanotubes, cellulose, microwave pyrolysis, nickel-iron catalyst, glucose, thiourea.

Заритовский Александр Николаевич – к.х.н., старший научный сотрудник отдела супрамолекулярной химии, ФГБНУ «Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко»

Котенко Елена Николаевна – младший научный сотрудник отдела супрамолекулярной химии, ФГБНУ «Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко»

Гришук Светлана Владимировна – младший научный сотрудник отдела супрамолекулярной химии, ФГБНУ «Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко»

Глазунова Валентина Александровна – научный сотрудник отдела физики и техники высоких давлений и перспективных технологий, ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», инженер отдела супрамолекулярной химии ФГБНУ «Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко»

Волкова Галина Кузьминична – научный сотрудник отдела физики и техники высоких давлений и перспективных технологий, ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», инженер отдела супрамолекулярной химии ФГБНУ «Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко»

Aleksandr N. Zaritovskii – Ph. D., Senior Researcher, Department of Supramolecular Chemistry, L.M. Litvinenko Institute of Physical Organic and Coal Chemistry

Elena N. Kotenko – Junior Researcher, Department of Supramolecular Chemistry, L.M. Litvinenko Institute of Physical Organic and Coal Chemistry

Svetlana V. Grishchuk – Junior Researcher, Department of Supramolecular Chemistry, L.M. Litvinenko Institute of Physical Organic and Coal Chemistry

Valentina A. Glazunova – Researcher, Department of Physics and Engineering of High Pressure and Advanced Technologies, Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering; Engineer, Department of Supramolecular Chemistry, L.M. Litvinenko Institute of Physical Organic and Coal Chemistry

Galina K. Volkova – Researcher, Department of Physics and Engineering of High Pressure and Advanced Technologies, Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering; Engineer, Department of Supramolecular Chemistry, L.M. Litvinenko Institute of Physical Organic and Coal Chemistry

Поступила в редакцию/received: 10.06.2024; после рецензирования/revised: 12.07.2024; принята/accepted: 15.07.2024.