Особенности получения катализатора синтеза углеродных нанотрубок

Елена А. Буракова	¹	elenburakova@yandex.ru
Галина С. Бесперстова	¹	bes.galina@mail.ru
Марина А. Неверова	¹	gaaral@mail.ru
Алексей Г. Ткачев	¹	
Наталия В. Орлова	¹	nanotam@yandex.ru
Татьяна П. Дьячкова	¹	mashtatpetr@mail.ru

¹ Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская, 106, г. Тамбов, 392000, Россия

Аннотация. В работе изучены особенности получения Co-Mo/Al₂O₃ катализатора синтеза углеродных нанотрубок (УНТ) методом термического разложения. Выявлено, что продолжительность реализации стадии термического разложения предкатализатора в процессе получения металлоксидной системы оказывает существенное влияние на ее активность в процессе синтеза углеродных наноструктурных материалов методом газофазного химического осаждения (ГФХО). Доказано, что эффективный катализатор синтеза УНТ можно получить методом термического разложения, при реализации термообработки в одну ступень (разложение предкатализатора), при этом отсутствует вторая ступень – стадия прокаливания металлоксидной системы. Использование Co-Mo/Al₂O₃ катализатора, полученного методом термического разложения без реализации стадии прокаливания, в процессе ГФХО способствует снижению себестоимости синтезируемых УНТ. С помощью сканирующей электронной микроскопии показано, что от условий термообработки предкатализатора зависит размер зерен, и удельная поверхность формируемого Co-Mo/Al₂O₃ катализатора. Управляя условиями реализации процесса термического разложения предкатализатора (температура, объем, продолжительность и др.) можно регулировать не только характеристики получаемого катализатора (удельная поверхность, эффективность), но и УНТ (диаметр, степень дефектности). В ходе экспериментов определены оптимальные режимы реализации методики получения Co-Mo/Al₂O₃ катализатора позволяющие формировать систему с удельной поверхностью ~108 м²/г. Использование полученного катализатора в процессе синтеза наноструктурных материалов обеспечивает высокий удельный выход многослойных УНТ диаметром 8-20 нм со степенью дефектности 0,97.

Ключевые слова: катализатор, термообработка, синтез, углеродные нанотрубки, эффективность

Features of obtaining the catalyst for the synthesis of carbon nanotubes

Elena A. Burakova	¹	elenburakova@yandex.ru
Galina S. Besperstova	¹	bes.galina@mail.ru
Marina A. Neverova	¹	gaaral@mail.ru
Alexey G. Tkachev	¹	
Natalia V. Orlova	¹	nanotam@yandex.ru
Tatyana P. Dyachkova	¹	mashtatpetr@mail.ru

¹ Tambov State Technical University, Sovetskaya street, 106, Tambov, 392000, Russia

Abstract. In this paper, the features of obtaining a Co-Mo/Al₂O₃ catalyst to synthesize carbon nanotubes (CNTs) by thermal decomposition were studied. It was revealed that the duration of the pre-catalyst thermal decomposition stage in the process of developing a metal oxide system has a significant impact on its activity in the synthesis of carbon nanostructured materials by chemical vapor deposition (CVD). It was proved that an effective catalyst for CNTs synthesis can be obtained by through thermal decomposition of the pre – catalyst, without calcination of the metal oxide system. The use of the Co-Mo/Al₂O₃ catalyst, synthesized in such a way, in the CVD process makes it possible to reduce the cost of synthesized CNTs. Using scanning electron microscopy, it was shown that the size of the grains, and specific surface area of the formed Co-Mo/Al₂O₃ catalyst depend on the thermal treatment conditions of the pre-catalyst. Under the conditions for the implementation of the pre-catalyst thermal decomposition stage (temperature, volume, duration, etc.), it is possible to control not only the characteristics of the resulting catalyst (specific surface area, efficiency), but also the characteristics of the CNTs (diameter, degree of defectiveness). In the course of experiments, the optimal modes of implementation of the method for obtaining the Co-Mo/Al₂O₃ catalyst allowed forming a system with a specific surface area of ~ 108 m²/g. The use of the resulting catalyst in the synthesis of nanostructured materials provides a high specific yield of multi-walled CNTs with a diameter of 8-20 nm and a degree of defectiveness of 0.97.

Keywords: catalyst, heat treatment, synthesis, carbon nanotubes, efficiency

Для цитирования

Буракова Е.А., Бесперстова Г.С., Неверова М.А., Ткачев А.Г., Орлова Н.В., Дьячкова Т.П. Особенности получения катализатора синтеза углеродных нанотрубок // Вестник ВГУИТ. 2019. Т. 81. № 2. С. 261–267. doi:10.20914/2310-1202-2019-2-261-267

For citation

Burakova E.A., Besperstova G.S., Neverova M.A., Tkachev A.G., Orlova N.V., Dyachkova T.P. Features of obtaining the catalyst for the synthesis of carbon nanotubes. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2019. vol. 81. no. 2. pp. 261–267. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2019-2-261-267

Введение

Углеродные нанотрубки (УНТ) широко используют в производстве конструкционных и функциональных материалов. Они позволяют создавать композиты с улучшенными эксплуатационными характеристиками [1], материалы, способные поглощать электромагнитные волны [2, 3], накапливать электрохимическую энергию [4], осуществлять адресную доставку лекарств. Широкий спектр областей применения УНТ обусловлен их уникальными свойствами, которые они передают создаваемым на их основе материалам. Промышленное производство УНТ налажено во многих странах, в том числе и в России (ООО «НаноТехЦентр», «OCSiAl» и др.), однако для каждой области применения необходимы наноматериалы с определенной морфологией и структурой, поэтому важно уметь управлять их характеристиками (диаметр нанотрубок, степень дефектности, длина и др.) на стадии синтеза.

Существуют разные способы синтеза УНТ, но для их промышленного производства наиболее предпочтительным является метод газофазного химического осаждения на поверхности металлических катализаторов (ГФХО) [5–8]. Исходная форма катализатора чаще всего представляет собой металлооксидную каталитическую систему. В качестве активного компонента катализатора обычно используют металлы группы железа. Роль носителя, не позволяющего спекаться частицам активного компонента, выполняют MgO , Al_2O_3 , Si_2O_3 и др. Часто при получении катализатора прибегают к промотированию (введение Mo , V , W , Y) системы для повышения ее активности. В процессе синтеза углеродных наноструктурных материалов происходит разложение углеводородного сырья, и часть выделившегося водорода инициирует восстановление оксидов металлов до металлов. При этом формирование нанотрубок происходит только на активных центрах металлического катализатора. Согласно физической модели роста УНТ, предложенной А.В. Руховым, во время синтеза происходит циклический процесс формирования нанотрубок, состоящий из следующих стадий:

- дегидрирование углеродсодержащего сырья и накопление углерода на «лобовой» стороне частицы катализатора;
- диффузия углерода в объем частицы и образование неустойчивых карбидов;
- снижение температуры частицы катализатора из-за изменения теплофизических свойств и разрушение сформировавшихся на предыдущей стадии неустойчивых карбидов;

— насыщение металлической частицы углеродом и его кристаллизация на «тыльной» стороне частицы катализатора [9].

В процессе синтеза углеродных наноматериалов методом ГФХО морфология и структура УНТ определяется не только режимными параметрами процесса (температура, давление, продолжительность), природой и расходом углеродсодержащего сырья [10], но и характеристиками, и составом катализатора [11]. Так, согласно [12] диаметр УНТ зависит от размера активных центров катализатора, поэтому правильно подобранные катализатор и условия синтеза позволяют получать нанопродукты с требуемыми характеристиками [13]. В связи с этим получение эффективного катализатора, позволяющего осуществлять направленный синтез наноструктур (длина, диаметр, структура, степень дефектности и др.), остается по-прежнему актуальной задачей.

Существует несколько методов получения катализаторов, но наиболее востребованным является метод термического разложения. Широкое применение его при получении катализаторов синтеза УНТ объясняется простотой реализации, а также возможностью управления процессом формирования активных центров каталитической системы на стадии ее получения. [14]

Основными стадиями процесса получения катализатора методом термического разложения являются: подбор исходных компонентов и приготовление из них раствора, термическая обработка предкатализатора (разложение / разложение и прокаливание) и механоактивация. В работе [15] показано, что стабильность и эффективность катализатора зависит от качества исходных компонентов и условий термообработки раствора на их основе. Так как в результате термического разложения раствора исходных компонентов формируется катализатор и его активные зерна, то особое внимание в процессе получения каталитической системы необходимо уделить изучению стадии термообработки. В данной работе экспериментально было изучено влияние продолжительности стадии термического разложения раствора исходных компонентов на характеристики формируемого $Co-Mo/Al_2O_3$ катализатора и морфологию синтезированных на нем УНТ.

Материалы и методы

В качестве исследуемой каталитической системы был выбран кобальтсодержащий катализатор – $Co-Mo/Al_2O_3$. Для получения катализатора применяли метод термического

разложения нитратов. В качестве исходных реактивов для получения катализатора использовали $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (хч), $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (хч), $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ и дистиллированную воду. Для повышения активности катализатора в систему вводили промотор. Так, введение в небольшом количестве молибдена (исходное вещество — $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) способствовало увеличению эффективности формируемой металлоксидной каталитической системы.

В качестве параметра, характеризующего эффективность $\text{Co-Mo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ катализатора, использовали удельный выход нанопродукта ($\text{г}_{\text{УГЛ}}/\text{г}_{\text{кат}}$). Полученный катализатор использовали для синтеза УНТ методом ГФХО, в качестве углеродсодержащего сырья использовали этилен. Синтез наноструктур осуществляли в лабораторном реакторе периодического действия в течение 30 мин при 650°C . Удельную поверхность полученных катализаторов определяли, используя метод тепловой десорбции газа-адсорбата с поверхности исследуемого образца в динамических условиях, с помощью анализатора «Сорбтометр-М».

Для оценки морфологии образцов $\text{Co-Mo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ катализатора и синтезированных на них УНТ использовали сканирующую электронную микроскопию (СЭМ). Степень

дефектности синтезируемых УНТ определяли при помощи спектрометра комбинированного рассеивания DXR Raman Microscope по соотношению интенсивностей пиков D и G.

Результаты и обсуждение

В соответствии с существующей методикой, для получения $\text{Co-Mo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ катализатора исходные компоненты растворяли в дистиллированной воде при интенсивном перемешивании ($100\text{--}150\text{ мин}^{-1}$) при $50\text{--}55^\circ\text{C}$. Важно на этой стадии не допустить перегрева раствора ($\geq 60^\circ\text{C}$), т. к. это вызовет нежелательное разложение нитратов. Полученный раствор подвергали термическому разложению при 500°C в течение 10 мин, после чего образованную в результате термообработки металлоксидную систему прокаливали в течение 1 ч при 600°C с целью удаления оставшейся органики. Использование полученного $\text{Co-Mo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ катализатора в процессе синтеза углеродных наноструктурных материалов методом ГФХО позволяет формировать многослойные нанотрубки диаметром $5\text{--}25\text{ нм}$ и длиной более 2 мкм со степенью дефектности (D/G) $\sim 1,06$. Эффективность данной каталитической системы оценивали по удельному выходу УНТ, который составлял $\sim 14,0\text{ г}_{\text{УГЛ}}/\text{г}_{\text{кат}}$. Морфология и рамановская спектроскопия синтезированных УНТ представлена на рисунке 1.

Рисунок 1. Морфология и рамановские спектры УНТ, синтезированных на $\text{Co-Mo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ катализаторе, полученном в результате двухстадийной термообработки

Figure 1. Morphology and Raman spectra of CNTs synthesized on $\text{Co-Mo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ catalyst obtained by two-stage heat treatment

В работе были изучены особенности получения $\text{Co-Mo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ катализатора методом термического разложения, а именно влияние продолжительности термического разложения на характеристики формируемой каталитической системы. Для этого образцы $\text{Co-Mo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ катализатора получали в соответствии с описанной выше методикой, но при отсутствии стадии прокаливания металлоксидной системы,

образованной в результате термического разложения предкатализатора.

Продолжительность процесса термического разложения предкатализатора варьировали в диапазоне 10–50 мин. Дальнейшее увеличение продолжительности термообработки предкатализатора оказалось экономически нецелесообразным. СЭМ изображения морфологии полученных образцов $\text{Co-Mo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ катализатора представлены на рисунке 2.

Рисунок 2. СЭМ изображения морфологии Co-Mo/Al₂O₃ катализатора, сформированного в результате термического разложения, мин: *a* – 10; *b* – 15; *c* – 30; *d* – 50

Figure 2. SEM images of the morphology of the Co-Mo/Al₂O₃ catalyst formed as a result of thermal decomposition, min: *a* – 10; *b* – 15; *c* – 30; *d* – 50

На стадии термического разложения предкатализатора происходит процесс кристаллизации, включающий зарождение центров кристаллов и их дальнейший рост на этих центрах. При термообработке предкатализатора в течение 10 мин на поверхности системы частично происходит формирование кристаллов размером ~30 нм (рисунок 2, *a*), при дальнейшем увеличении продолжительности термического разложения кристаллы занимают всю поверхность системы (рисунок 2, *b–d*)

Полученные в ходе эксперимента результаты по влиянию продолжительности стадии термического разложения раствора исходных компонентов Co-Mo/Al₂O₃ катализатора на его удельную поверхность и эффективность в процессе ГФХО, представлены на рисунке 3.

Рисунок 4. СЭМ изображения и раман-спектры УНТ, синтезированных на катализаторе, сформированном в результате термического разложения, мин: *a* – 10; *b* – 15; *c* – 30; *d* – 50

Figure 4. SEM images and Raman spectra of CNTs synthesized on a catalyst formed as a result of thermal decomposition, min: *a* – 10; *b* – 15; *c* – 30; *d* – 50

Рисунок 3. Влияние продолжительности термического разложения раствора исходных компонентов Co-Mo/Al₂O₃ катализатора на его удельную поверхность и эффективность в процессе синтеза УНТ

Figure 3. Effect of the thermal decomposition duration of the solution of the initial components of Co-Mo/Al₂O₃ catalyst on its specific surface area and efficiency in the process of CNTs synthesis

Анализ полученных результатов позволил определить рациональный режим реализации процесса термического разложения предкатализатора, при котором формируется активная Co-Mo/Al₂O₃ каталитическая система синтеза УНТ. Так, Co-Mo/Al₂O₃ катализатор с большей удельной поверхностью (~108 м²/г) и эффективностью (25 г_{угл}/г_{кат}) образуется в результате термического разложения предкатализатора в течение 15–30 мин при 500 °С.

СЭМ изображения и раман-спектры УНТ, синтезированных на полученных образцах Co-Mo/Al₂O₃ катализатора, представлены на рисунке 4.

Использование в процессе синтеза наноструктур Co-Mo/Al₂O₃ катализатора, сформированного термическим разложением предкатализатора в течение 10 мин при 500 °С, позволяет синтезировать УНТ диаметром 8–12 нм со степенью дефектности 0,857 (рисунок 4, а). Увеличение продолжительности процесса термического разложения предкатализатора до 15 мин приводит к повышению удельной поверхности Co-Mo/Al₂O₃ системы на 50%. Применение полученного при таких режимах образца Co-Mo/Al₂O₃ катализатора в процессе ГФХО способствует образованию многослойных нанотрубок диаметром 10–20 нм со степенью дефектности 0,82. Термическая обработка предкатализатора в течение 30 и 50 мин способствует образованию нанотрубок диаметром 8–20 нм со степенью дефектности 0,97 и 1,10 соответственно.

Заключение

Обычно при получении каталитической системы методом термического разложения нитратов процесс термообработки реализуют в два этапа: термическое разложение предкатализатора и прокаливание образовавшейся металлоксидной каталитической системы. Существует гипотеза, что на первой стадии происходит формирование активных центров катализатора, а на второй – их активация. Детальное изучение методики получения Co-Mo/Al₂O₃ катализатора показало возможность синтеза эффективного катализатора без реализации второго этапа термообработки – прокаливания. Реализация термического разложения предкатализатора при 500 °С позволяет формировать каталитические системы с удельной поверхностью

~70,0–108,0 м²/г. Варьируя продолжительность процесса термообработки предкатализатора (10–50 мин) удается управлять не только характеристиками каталитической системы, но и параметрами синтезированных на ней УНТ. В результате исследования были подобраны рациональные режимы реализации стадии термического разложения, позволяющие формировать эффективную Co-Mo/Al₂O₃ каталитическую систему с удельной поверхностью 106,0–108,0 м²/г. Удельный выход УНТ, синтезированных на Co-Mo/Al₂O₃ системе, сформированной в результате термического разложения предкатализатора в течение 20–30 мин, составляет ~23,8–25,1 Г_{угл}/Г_{кат}. Использование полученного Co-Mo/Al₂O₃ катализатора в процессе ГФХО позволяет синтезировать многослойные УНТ диаметром 10–20 нм со степенью дефектности 0,82. Дальнейшее увеличение продолжительности процесса термообработки предкатализатора до 30–50 минут увеличивает степень дефектности УНТ, синтезируемых на данных образцах катализатора, до 0,97–1,10. Правильно подобранные режимы реализации термической обработки предкатализатора (температура, продолжительность, подвод кислорода в зону разложения, объем раствора исходных компонентов катализатора и др.) и реализация методики получения Co-Mo/Al₂O₃ системы методом термического разложения нитратов без стадии прокаливания способствует снижению себестоимости синтезируемых УНТ.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-43-680005.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Плетнёв М.А., Кухто А.В. Свойства функциональных материалов на базе гибридных полимерных композитов с нанокремнеземными включениями // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. С. 142–145.
- 2 Liu L., Zhang S., Yan F., Li Ch. et al. Three-dimensional Hierarchical MoS₂ Nanosheets/Ultralong N-doped Carbon Nanotubes as High-Performance Electromagnetic Wave Absorbing Material // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2018. V. 10. № 16. P. 14108–14115. doi: 10.1021/acsami.8b00709
- 3 Zhao T., Ji X., Jin W., Wang Ch. et al. Direct in situ synthesis of a 3D interlinked amorphous carbon nanotube/graphene/BaFe₁₂O₁₉ composite and its electromagnetic wave absorbing properties // RSC Advances. 2017. № 26. P. 15903–15910. doi: 10.1039/C7RA00623C.
- 4 Du F., Dai Q., Dai L., Zhang Q. et al. Vertically-Aligned Carbon Nanotubes for Electrochemical Energy Conversion and Storage // Nanomaterials for Sustainable Energy. 2016. P. 253–270. doi: 10.1007/978-3-319-32023-6_7

- 5 Kumar M. Chemical Vapor Deposition of Carbon Nanotubes: A Review on Growth Mechanism and Mass Production // Nanoscience and Nanotechnology. 2010. № 10. P. 3739–3758.

- 6 Magrez A., Seo J.W., Smajda R., Mionic M. et al. Catalytic CVD Synthesis of Carbon Nanotubes: Towards High Yield and Low Temperature Growth // Materials (Basel). 2010. V. 3. № 11. P. 4871–4891. doi: 10.3390/ma3114871

- 7 Мищенко С.В., Ткачев А.Г. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.

- 8 Рухов А.В. Основные процессы синтеза углеродных нанотрубок методом газовой фазы химического осаждения // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2013. Т. 56. № 9. С. 117–121.

- 9 Рухов А.В. Основные процессы и аппаратное оформление производства углеродных наноматериалов: диссертация... доктора технических наук: 05.17.08. Иваново, 2013. 344 с.

- 10 Kulmeteva V.B., Maltsev I.A. Effect of specification catalytic pyrolysis of ethanol vapor on characteristic of carbon nanotubes // Digital scientific journal. 2014. № 6. URL: <http://www.science-education.ru/pdf/2014/6/739.pdf>

11 Muangrat W., Porntheeraphat S., Wongwiriyan W. Effect of Metal Catalysts on Synthesis of Carbon Nanomaterials by Alcohol Catalytic Chemical Vapor Deposition // Engineering journal. 2013. V. 17. № 5. P. 35–39. doi:10.4186/ej.2013.17.5.35

12 Kukovitsky E.F., L'vov S.G., Sainov N.A., Shustov V.A. et al. Correlation between metal catalyst particle size and carbon nanotube growth // Chemical Physics Letters. 2002. V. 355. № 5–6. P. 497–503.

13 Oyewemi A., Abdulkareem A.S., Tijani J.O., Bankole M.T. et al. Controlled Syntheses of Multi-walled Carbon Nanotubes from Bimetallic Fe–Co Catalyst Supported on Kaolin by Chemical Vapour Deposition Method // Arabian Journal for Science and Engineering. 2019. V. 44. № 6. P. 5411–5432. doi: 10.1007/s13369-018-03696-4.

14 Rukhov A.V., Burakova E.A., Bakunin E.S., Besperstova G.S. et al. Features of technology of preparation of catalytic systems by thermal decomposition for synthesis of carbon nanotubes // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. V. 8. P. 802–807. doi: 10.1134/S2075113317050276.

15 Burakova E., Dyachkova T., Besperstova G., Rukhov A. et al. Peculiarities of obtaining a catalyst for the synthesis of nanostructured carbon materials via thermal decomposition // AIP Conference Proceedings. 2017. V. 1899. P. 020008. doi: 10.1063/1.5009833.

REFERENCES

1 Pletnev, M.A., Kukhto A.V. Properties of functional materials based on hybrid polymer composites with nanocarbon inclusions. Intelligent systems in production. 2016. pp. 142–145. (in Russian).

2 Liu L., Zhang S., Yan F., Li Ch. et al. Three-dimensional Hierarchical MoS₂ Nanosheets/Ultralong N-doped Carbon Nanotubes as High-Performance Electromagnetic Wave Absorbing Material. ACS Appl. Mater. Interfaces. 2018. vol. 10. no. 16. pp. 14108–14115. doi: 10.1021/acsami.8b00709

3 Zhao T., Ji X., Jin W., Wang Ch. et al. Direct in situ synthesis of a 3D interlinked amorphous carbon nanotube/graphene/BaFe₂O₉ composite and its electromagnetic wave absorbing properties. RSC Advances. 2017. no. 26. pp. 15903–15910. doi: 10.1039/C7RA00623C.

4 Du F., Dai Q., Dai L., Zhang Q. et al. Vertically-Aligned Carbon Nanotubes for Electrochemical Energy Conversion and Storage. Nanomaterials for Sustainable Energy. 2016. pp. 253–270. doi: 10.1007/978-3-319-32023-6_7

5 Kumar M. Chemical Vapor Deposition of Carbon Nanotubes: A Review on Growth Mechanism and Mass Production. Nanoscience and Nanotechnology. 2010. no. 10. pp. 3739–3758.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Елена А. Буракова к.т.н., доцент, кафедра техники и технологий производства нанопроductов, Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская 106, г. Тамбов, 392000, Россия, elenburakova@yandex.ru

Галина С. Бесперстова аспирант, кафедра техники и технологий производства нанопроductов, Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская 106, г. Тамбов, 392000, Россия, bes.galina@mail.ru

Марина А. Неворова магистрант, кафедра техники и технологий производства нанопроductов, Тамбовский государственный технический университет, Адрес (улица, дом, город, индекс, страна), gaaral@mail.ru

6 Magrez A., Seo J.W., Smajda R., Mionic M. et al. Catalytic CVD Synthesis of Carbon Nanotubes: Towards High Yield and Low Temperature Growth. Materials (Basel). 2010. vol. 3. no. 11. pp. 4871–4891. doi: 10.3390/ma3114871

7 Mishchenko S.V., Tkachev A.G. Carbon nanomaterials. Production, properties, application. Moscow, Mashinostroyeniye, 2008. 320 p. (in Russian).

8 Rukhov A.V. Main processes of synthesis of carbon nanotubes by gas-phase chemical vapor deposition. Proceedings of higher educational institutions. Chemistry and chemical technology. 2013. vol. 56. no. 9. pp. 117–121. (in Russian).

9 Rukhov A.V. Basic processes and apparatus design for production of carbon nanomaterials: dissertation... doctor of technical Sciences: 05.17.08 Ivanovo, 2013. 344 p. (in Russian).

10 Kulmeteva V.B., Maltsev I.A. Effect of specification catalytic pyrolysis of ethanol vapor on characteristic of carbon nanotubes. Digital scientific journal. 2014. no. 6. Available at: <http://www.science-education.ru/pdf/2014/6/739.pdf>

11 Muangrat W., Porntheeraphat S., Wongwiriyan W. Effect of Metal Catalysts on Synthesis of Carbon Nanomaterials by Alcohol Catalytic Chemical Vapor Deposition. Engineering journal. 2013. vol. 17. no. 5. pp. 35–39. doi:10.4186/ej.2013.17.5.35

12 Kukovitsky E.F., L'vov S.G., Sainov N.A., Shustov V.A. et al. Correlation between metal catalyst particle size and carbon nanotube growth. Chemical Physics Letters. 2002. vol. 355. no. 5–6. pp. 497–503.

13 Oyewemi A., Abdulkareem A.S., Tijani J.O., Bankole M.T. et al. Controlled Syntheses of Multi-walled Carbon Nanotubes from Bimetallic Fe–Co Catalyst Supported on Kaolin by Chemical Vapour Deposition Method. Arabian Journal for Science and Engineering. 2019. vol. 44. no. 6. pp. 5411–5432. doi: 10.1007/s13369-018-03696-4.

14 Rukhov A.V., Burakova E.A., Bakunin E.S., Besperstova G.S. et al. Features of technology of preparation of catalytic systems by thermal decomposition for synthesis of carbon nanotubes. Inorganic Materials: Applied Research. 2017. vol. 8. pp. 802–807. doi: 10.1134/S2075113317050276.

15 Burakova E., Dyachkova T., Besperstova G., Rukhov A. et al. Peculiarities of obtaining a catalyst for the synthesis of nanostructured carbon materials via thermal decomposition. AIP Conference Proceedings. 2017. vol. 1899. pp. 020008. doi: 10.1063/1.5009833..

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Elena A. Burakova Cand. Sci. (Engin.), associate professor, technique and technology of production of nanoproducts department, Tambov State Technical University, 106, Sovetskaya Str., Tambov, Russia, elenburakova@yandex.ru

Galina S. Besperstova postgraduate, technique and technology of production of nanoproducts department, Tambov State Technical University, 106, Sovetskaya Str., Tambov, Russia, bes.galina@mail.ru

Marina A. Neverova master student, technique and technology of production of nanoproducts department, Tambov State Technical University, 106, Sovetskaya Str., Tambov, Russia, gaaral@mail.ru

Алексей Г. Ткачев д.т.н., профессор, кафедра техники и технологий производства нанопроductов, Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская 106, г. Тамбов, 392000, Россия,

Наталья В. Орлова к.т.н., доцент, кафедра техники и технологий производства нанопроductов, Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская 106, г. Тамбов, 392000, Россия, nanotam@yandex.ru

Татьяна П. Дьячкова д.х.н., профессор, кафедра техники и технологий производства нанопроductов, Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская 106, г. Тамбов, 392000, Россия, mashtatpetr@mail.ru

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Елена А. Буракова предложила методику проведения эксперимента и организовала производственные испытания полученных образцов катализатора синтеза УНТ, обработка полученных данных

Галина С. Бесперстова проведение обзора литературных источников по катализаторам синтеза УНТ, проведение эксперимента

Марина А. Неверова обзор литературных источников по исследуемой проблеме, оформление статьи по требованиям журнала, несет ответственность за плагиат

Алексей Г. Ткачев, **Татьяна П. Дьячкова** консультация в области синтеза УНТ

Наталья В. Орлова подбор оборудования для реализации методики получения катализатора

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 29.03.2019

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 17.05.2019

Alexey G. Tkachev Dr. Sci. (Engin.), professor, technique and technology of production of nanoproducts department, Tambov State Technical University, 106, Sovetskaya Str., Tambov, Russia,

Natalia V. Orlova Cand. Sci. (Engin.), associate professor, technique and technology of production of nanoproducts department, Tambov State Technical University, 106, Sovetskaya Str., Tambov, Russia, nanotam@yandex.ru

Tatyana P. Dyachkova Dr. Sci. (Chem.), professor, technique and technology of production of nanoproducts department, Tambov State Technical University, 106, Sovetskaya Str., Tambov, Russia, mashtatpetr@mail.ru

CONTRIBUTION

Elena A. Burakova proposed a methodology for the experiment and organized production tests of the obtained samples of catalyst synthesis CNT, processing of the data

Galina S. Besperstova the review of literature on catalysts for the synthesis of CNTs, the experiment

Marina A. Neverova review of literary sources on the problem under study, design of the article according to the requirements of the journal and is responsible for plagiarism

Alexey G. Tkachev, **Tatyana P. Dyachkova** consultation in the field of CNT

Natalia V. Orlova selection of equipment for the implementation of methods for obtaining a catalyst

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 3.29.2019

ACCEPTED 5.17.2019