УДК 546.26-162; 66.094.3; 661.66 *Оригинальная статья*

Влияние природы органо-лигандного комплекса переходных металлов и термохимической активации на эффективность металлоксидных катализаторов роста углеродных нанотрубок в CVD процессе

А.П. Прудченко, О.Ю. Полякова, Ю.С. Протасевич
ФГБНУ «Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко»
283048, Россия, Донецкая Народная Республика, Донецк, ул. Розы Люксембург, 70
prudchenko.a@yandex.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.917

Аннотация: В данной работе представлены результаты исследования влияния природы органических лигандов, состава органо-лигандных комплексов 3d-металлов и условий их термодеструкции в синтезе металлоксидных катализаторов роста углеродных нанотрубок на их эффективность в процессах каталитического химического осаждения углерода из газовой фазы. Металлоксидные катализаторы были синтезированы по методике, сочетающей подходы метода полимеризованных комплексных предшественников, хелатного метода золь-гель технологии и термического разложения и термохимической активации носителя. Установлено, что эффективность катализаторов общего состава $Me_2Co/CaCO_3$ (*Me–Fe*, *Ni*) в CCVD синтезе углеродных нанотрубок зависит как от природы органических лигандов комплексов переходных металлов, так и от состава активных металлов. Влияние структуры лигандов, использованных в синтезе металлоксидных катализаторов, и для комбинации *Fe–Co,* и для *Ni–Co* подобно и заключается в увеличении эффективности в ряду: гликоли < полигликоли < полиспирты < углеводы (моно- и дисахариды) < разветвленные полиспирты (пентаэритрит). Замена *Fe* на *Ni* в органо-лигандном комплексе позволяет значительно снизить оптимальную температуру процесса с 800°С до 500°С, а также увеличить удельный выход углеродного продукта. По результатам анализа температурных зависимостей на примере катализаторов, где лигандами были сахароза, фруктоза, пентаэритрит и лимонная кислота, сделано предположение, что снижение производительности, наблюдаемое при повышении температуры, может быть связано с увеличением подвижности каталитических частиц, их агломерацией, спеканием и, как следствие, потерей активности. Установлено, что при значительном избытке органические лиганды могут играть роль дополнительного топлива в процессе термохимической активации носителя, влияя на его морфологию, состав, текстуру поверхности, а также энергетику процесса.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, металлоксидные катализаторы, органические лиганды, хелаты, CVD синтез, углеродные наноматериалы.

Прудченко Анатолий Павлович – к.х.н., старший научный сотрудник отдела супрамолекулярной химии ФГБНУ «Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко»
Полякова Оксана Юрьевна – младший научный сотрудник отдела супрамолекулярной химии ФГБНУ «Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко»
Протасевич Юлия Станиславовна – ведущий инженер отдела супрамолекулярной химии ФГБНУ «Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко».

Original paper

Influence of the nature of the organo-ligand complex of transition metals and thermochemical activation on the effectiveness of metal oxide catalysts for carbon nanotube growth in the CVD process

A.P. Prudchenko, O.Yu. Poliakova, Ju.S. Protasevich
L.M. Litvinenko Institute of Physical Organic and Coal Chemistry, Donetsk, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.917

Abstract: This paper presents the results of a study of the effect of the nature of organic ligands, the composition of organo-ligand complexes of 3d-metals, and the conditions of their thermal degradation

© А.П. Прудченко, О.Ю. Полякова, Ю.С. Протасевич, 2026

in the synthesis of metal oxide catalysts for the growth of carbon nanotubes on their effectiveness of the processes of catalytic chemical deposition of carbon from the gas phase. Metal oxide catalysts were synthesized using a technique combining the approaches of polymerized complex precursors, the chelation method of sol-gel technology, as well as thermal decomposition and thermochemical activation of the carrier. It has been established that the effectiveness of catalysts of the general composition $Me_2CO/CaCO_3$ (*Me–Fe*, *Ni*) in the CCVD synthesis of carbon nanotubes depends both on the nature of organic ligands of transition metal complexes and on the composition of active metals. The effect of the structure of the ligands used in the synthesis of metal oxide catalysts for both the *Fe–Co* and *Ni–Co* combinations is similar and consists in increasing the effectiveness in the following sequence: glycols < polyglycols < polyalcohols < carbohydrates (mono- and disaccharides) < branched polyalcohols (pentaerythritol). Replacing *Fe* with *Ni* in the organo-ligand complex can significantly reduce the optimal process temperature from 800°C to 500°C, as well as increase the specific yield of the carbon product. Based on the results of the analysis of temperature dependences using the example of catalysts where the ligands were sucrose, fructose, pentaerythritol and citric acid, it was assumed that the decrease in productivity observed with increasing temperature may be due to an increase in the mobility of catalytic particles, their agglomeration, sintering and, as a result, loss of activity. It has been established that, in case of significant excess, organic ligands can play the role of additional fuel in the process of thermochemical activation of the carrier, affecting its morphology, composition, surface texture, and energy efficiency.
Keywords: carbon nanotubes, metal oxide catalysts, organic ligands, chelates, CVD synthesis, carbon nanomaterials.

Anatoliy P. Prudchenko – Ph. D., Senior Researcher, Department of Supramolecular Chemistry, L.M. Litvinenko Institute of Physical Organic and Coal Chemistry. ORCID: 0009-0002-5664-4932
Oksana Yu. Poliakova – Junior Researcher, Department of Supramolecular Chemistry, L.M. Litvinenko Institute of Physical Organic and Coal Chemistry. ORCID: 0009-0002-4189-4947
Julia S. Protasevich – Leading Engineer, Department of Supramolecular Chemistry, L.M. Litvinenko Institute of Physical Organic and Coal Chemistry. ORCID: 0009-0001-8704-887X

Поступила в редакцию/received: 02.07.2026; после рецензирования/revised: 28.07.2026; принята/accepted: 01.08.2026.

1. Введение

Катализ, каталитические процессы – это основополагающие понятия современной химии, без которых невозможно представить ни развитие химической технологии и промышленности, ни прогресс в области фундаментальных исследований, направленных на создание новых функциональных материалов, в том числе углеродных наноматериалов (УНМ). Поскольку требования к химической промышленности постоянно смещаются в сторону более эффективных, экологичных, основанных на возобновляемых источниках сырья процессов, потребность в разработке новых высокоактивных и селективных катализаторов по-прежнему высока [1, 2]. Металлоксидные катализаторы (МОК) роста углеродных нанотрубок (УНТ) для процессов химического осаждения углерода из газовой фазы (CVD), как правило, представляют собой сложную систему смешанных оксидов 3d-металлов (*Fe*, *Co*, *Ni*), нанесенных на носители различной природы [3-5]. Однако, по сути, МОК являются лишь предшественниками катализаторов, коими выступают соответствующие металлы, образующиеся либо в процессе предварительного восстановления в атмосфере водорода, либо этот процесс протекает *in situ* в CVD процессе в

восстановительной атмосфере реактора. Дисперсность образующихся при этом структур от атомно-молекулярных комплексов до гомо- и гетерогенных кластеров и наночастиц зависит от однородности распределения молекул предкатализатора на поверхности и в порах носителя, природы носителя, условий и параметров процесса. Мультифакторность – отличительная черта и самого CVD процесса, эффективность которого зависит от множества параметров: состава МОК, природы прекурсора углерода, состава газовой смеси, скорости потоков, температуры и т.д. Все это делает создание новых МОК чрезвычайно сложной и почти прецизионной работой.

В последнее время активно развиваются концепции катализа коктейльного типа и полностью определенного катализа (totally defined catalysis) [6, 7]. Исходя из их основных положений, при гетерогенном катализе активное состояние катализатора динамично, с циклами окисления-восстановления, взаимодействиями металл-носитель и явлениями реструктуризации, приводящими к непрерывно развивающемуся каталитическому ансамблю. Эта концепция подчеркивает существование динамического квазиравновесного или квазистационарного состояния между несколькими каталитическими видами, включая молекулярные комплексы, кластеры и наночастицы, которые активно взаимопревращаются во время реакции. Использование расширяющейся базы данных о состоянии каталитических частиц, компьютерного моделирования и машинного зрения в сочетании с последними достижениями аналитических методов *in situ* позволяет отслеживать положение отдельных каталитических видов на (в) носителе, их взаимопревращения и определять вклад каждого из них в общий процесс. Такой подход позволит обоснованно менять параметры катализаторов в нужную для основного процесса сторону, устраняя условия их дезактивации и избегая неоправданного переизбытка активных металлов. Безусловно, что с позиций классического механистического подхода к проблеме синтеза катализаторов для гетерофазных реакций также есть понимание этих проблем и разработанные алгоритмы «доводки» и тонкой регуляции свойств системы МОК-носитель. Как правило, они связаны с оптимизацией состава композиции 3d-металлов [8], подбором типа носителя, оптимизацией параметров процесса получения предкатализатора и активации поверхности [9, 10]. Например, от силы взаимодействия металла с подложкой зависит дисперсность частиц, устойчивость к агломерации, тип роста УНТ – базовый или верхушечный и, в конечном счете, морфология полученного УНМ. По данным [10] температура и длительность процесса на стадиях термического разложения и прокаливания предкатализатора существенным образом влияют на

удельный выход УНТ. Гомогенному распределению ионов металлов в матрице катализатора и получению мезопористой структуры способствует применение различных хелатных агентов [11] и металлосодержащих молекулярных кластеров для формирования дискретных частиц катализатора с контролируемым размером. К этому классу неорганических соединений относятся, в частности, полиоксометаллаты (ПОМ) со структурой Кеггина ($\{Ni_4Mo_{12}\}$, $\{Co_4Mo_{12}\}$) [12] и Кеплератов $\{Fe_{30}Mo_{72}\}$ [13], успешно примененных в синтезе высококачественных тонкостенных УНТ с узким распределением по диаметру. Необходимо отметить, что все реализованные подходы в организации каталитической системы сводятся к главной задаче: а – получить ультрадисперсный, высокопористый нанесенный металлоксидный предкатализатор с максимально однородным распределением ионов активных металлов и активной дефектной поверхностью с большой удельной площадью; б – ограничить тепловую миграцию кластеров металлов в CVD процессе; в – за счет оптимизации состава металлов обеспечить высокую скорость диффузии углерода в теле частицы и роста УНТ, сведя к минимуму процессы коксования и карбонизации поверхности каталитической наночастицы.

Таким образом, задачей настоящего исследования является изучение возможности управления эффективностью МОК, сочетая методы дизайна органо-лигандных комплексов активных металлов (использование хелатирующих агентов), методы предорганизации 3d-структуры катализаторов (полимеризованных комплексных предшественников (ПКП) и золь-гель) и методы их термохимической активации (самораспространяющийся термический синтез).

2. Экспериментальная часть и обсуждение результатов

Металлоксидные катализаторы (МОК-ПКП) общего состава $Me_2Co/CaCO_3$ ($Me-Fe$, Ni) с мольным соотношением, равным 0,12 : 1 получены по описанной ранее методике [14], в которой были применены подходы метода полимеризованных комплексных предшественников, хелатного метода золь-гель технологии, методов термического разложения и самораспространяющегося термического синтеза (в пламени) с использованием на стадии предорганизации 3d-структуры катализатора органических лигандов: сахароза (САХ), «ч», фруктоза (ФР), «ч», этиленгликоль (ЭГ), «ч», диэтиленгликоль (ДЭГ), «ч», глицерин (ГЛИ), «ч», 1,2-пропиленгликоль (ПГ), «ч», 1,4-бутиленгликоль (БГ), «ч», полиэтиленгликоль (ПЭГ) МВ 300, поливиниловый спирт (ПВС) МВ 200, «ч», пентаэритрит (ПЭТ), «ч», лимонная кислота (Л), пищевая. В качестве предшественников оксидов активных металлов и носителя использовали $Fe(NO_3)_3\times 9H_2O$, «ч», $Co(NO_3)_2\times 6H_2O$, «ч», $Ni(NO_3)_2\times 6H_2O$, «чда»,

$Ca(NO_3)_2 \times 4H_2O$, «ч». Во всех случаях мольное соотношение лиганд$\div Me$ составляло 2-5÷1.

CCVD синтез УНТ с использованием полученных катализаторов проводили в трубчатом реакторе при T = 500-800°С в течении 1 часа (газ-носитель – Ar, He, 60 см^3/мин; газ-прекурсор углерода – коммерческая пропан-бутановая смесь (по ГОСТ 27578-87), 30 см^3/мин).

Выделение УНМ проводили путем обработки углерод-минерального продукта смесью 30% HCl и 30% HNO_3 в соотношении 3 : 1 (по объему), взятой в избытке, выдерживали при кипении в течение 2-х часов, затем охлаждали до комнатной температуры, оставляли на 24 часа, после чего фильтровали на стеклянном фильтре, промывали деионизированной водой до $pH \approx 7$, ацетоном, сушили при 105°С до постоянной массы.

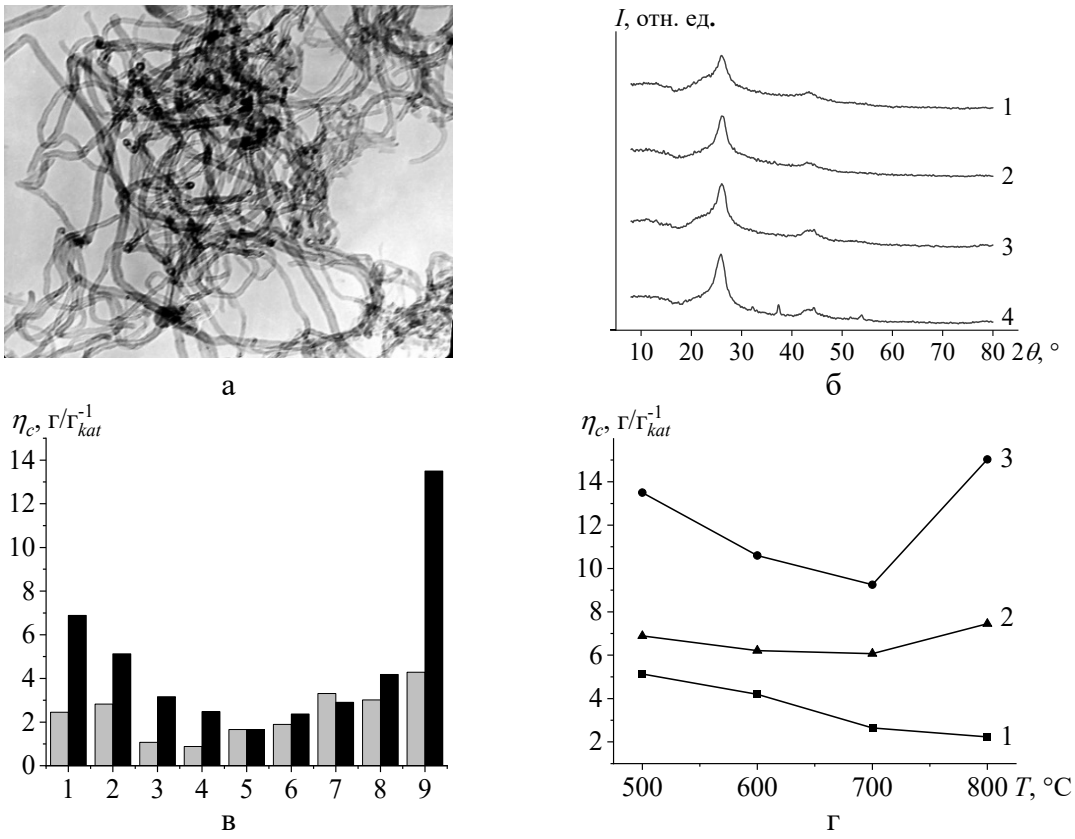

Рис. 1. а – ПЭМ-изображения УНТ; б – рентгеновские дифрактограммы продуктов CCVD синтеза (МОК-ПКП – $Ni_2Co/CaCO_3$, лиганды – ПЭТ + Л) при 500°С (1), 600°С (2), 700°С (3), 800°С (4); в – зависимость эффективности МОК-ПКП общего состава $Me_2Co/CaCO_3$ ($Me-Fe$, 800°С (серый цвет), $Me-Ni$, 500°С (черный цвет) в CCVD синтезе УНТ от природы органических лигандов комплексов переходных металлов, где 1 – ФР, 2 – САХ, 3 – ЭГ + Л, 4 – ГЛИ + Л, 5 – БГ + Л, 6 – ДЭГ + Л, 7 – ПЭГ + Л, 8 – ПВС + Л, 9 – ПЭТ + Л); г – зависимость удельного выхода УНМ от температуры CCVD синтеза (МОК-ПКП – $Ni_2Co/CaCO_3$, лиганды – САХ (1), ФР (2), ПЭТ + Л (3)).

Особенности фазового состава и структуры УНМ исследовали методом рентгенофазового анализа (РФА) с помощью дифрактометра «ДРОН-3» с использованием $CuK\alpha$ излучения, длина волны $\lambda\acute{a}$ = 1,54181 Å (U = 30 кВ, I = 20 мА). Исследования морфологии УНМ проводили методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с использованием микроскопа JEM-200A фирмы «JEOL».

Выделенные после удаления темплата углеродные продукты в основном представляют собой клубки УНТ диаметром 20-40 нм (см. рис. 1 а) однородного состава с малым содержанием аморфного углерода (АУ), что подтверждается данными РФА по наличию рефлекса (*002*) графита при $2\theta°$ = 25,88-26,08 (см. рис. 1 б).

Из представленных на рис. 1 в данных следует, что эффективность МОК-ПКП общего состава $Me_2Co/CaCO_3$ ($Me-Fe$, 800°С (серый цвет), $Me-Ni$, 500°С (черный цвет) в CCVD синтезе УНТ зависит как от природы органических лигандов комплексов переходных металлов, так и от состава активных металлов. Влияние структуры лигандов, использованных в синтезе МОК, и для комбинации $Fe-Co$ и для $Ni-Co$, в общем и целом, подобно и заключается в увеличении эффективности МОК в ряду: гликоли < полигликоли < полиспирты < углеводы (моно- и дисахариды) < разветвленные полиспирты (пентаэритрит). Замена Fe на Ni в органо-лигандном комплексе приводит к более значимым последствиям – сохранение, превышение или значительное увеличение эффективности МОК даже при снижении температуры CCVD синтеза с 800°С до 500°С. На общем фоне выделяются МОК, в синтезе которых использованы в качестве лигандов углеводы – МОК-I (сахароза), МОК-II (фруктоза) и МОК-III (пентаэритрит). Из анализа температурных зависимостей (см. рис. 1 г) следует, что удельный выход УНМ (η_C, $г_{УНМ}/г_{КТЗ}$), полученных в CVD процессе на катализаторах МОК-(I-III) меняется по-разному. Для МОК-I η_C понижается с ростом температуры процесса (см. рис. 1 г, кривая 1), для МОК-II практически сохраняет постоянство с небольшим подъемом при 800°С (см. рис. 1 г, кривая 2), а для МОК-III при значительном абсолютном увеличении (в 2-3 раза) η_C снижается до минимума при 700°С и далее растет в интервале 700-800°С (см. рис. 1 г, кривая 3), что свидетельствует о существенных изменениях в процессе образования УНМ. При этом, поскольку по данным ПЭМ и РФА продуктами CCVD синтеза во всем температурном интервале являются многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ), смена механизма накопления углерода исключается.

Причиной снижения производительности МОК при повышении температуры CVD синтеза может быть увеличение тепловой миграции

каталитических частиц (КЧ) на поверхности носителя, слияние частиц, образование частиц с критическим радиусом, после чего рост УНТ прекращается. Устойчивость к агломерации гомогенных или гетерогенных кластеров атомов металлов определяется силой их взаимодействия с поверхностью носителя, а также текстурой поверхности – шероховатостью, дефектностью, наличием активных сайтов. Если гомогенность распределения КЧ в основном определяются природой хелатных комплексов и их устойчивостью, то текстурные характеристики нанесенных МОК и дисперсность КЧ определяются на стадии термического разложения прекурсора катализатора. В примененной нами методике синтеза МОК органические хелаты (лиганды) взяты с избытком и, поэтому, дополнительно являются топливом в процессе термодеструкции прекурсора МОК и термохимической активации поверхности носителя. На этой стадии тепловой режим зависит от интенсивности процесса термоокисления органической компоненты, различия в которой определяются природой лигандов и составом активных металлов. Это в полной мере проявляется в синтезе МОК-(I, II, III), где в качестве лигандов были использованы сахароза, фруктоза и пентаэритрит. Так для МОК-(I, II) это горение разной интенсивности с последующим тлением, для МОК-III – самораспространяющийся термический синтез, приобретающий характер взрывного процесса. В результате, по нашему мнению, создаются условия для образования большого количества дефектов и активных центров на поверхности носителя, удерживающих КЧ и препятствующих процессу их спекания и дезактивации. Кроме того, локальные перегревы, возникающие при термохимической активации поверхности носителя также способствуют изменению фазового состава катализатора вследствие протекания реакции разложения носителя $CaCO_3$ до более реакционноспособного CaO. Этот процесс становится заметным уже с 750°С и существенно ускоряется в атмосфере реактора в присутствии углеводородов и инертного газа. Тем не менее, уже на стадии термолиза прекурсоров катализаторов появляются зародыши и идет быстрая кристаллизация новой фазы. Различия в виде температурных зависимостей, приведенных на рис. 1 г, являются следствием разной интенсивности экзотермических процессов, зависящей от природы лиганда (топлива) и разной степени завершенности фазовых переходов. Реакция разложения кальцита сопровождается выделением углекислого газа, который сам может вовлекаться в сложный процесс взаимопревращений различных углеродсодержащих продуктов в условиях CVD синтеза углерода (реакция Будуара). С другой стороны, при высоких температурах CO_2 является хорошим окислительным агентом, препятствующим излишней карбонизации поверхности частиц металлов и снижению их каталитической активности [9].

3. Заключение

В работе представлены данные по изучению зависимости эффективности МОК общего состава $Me_2Co/CaCO_3$ ($Me-Fe$, Ni), синтезированных по методике, сочетающей подходы хелатного метода золь-гель технологии, методов полимеризованных комплексных предшественников и термического разложения. Установлено, что эффективность МОК в существенной мере зависит как от состава активных металлов, так и природы хелатных агентов, используемых на стадии предорганизации 3d-структуры катализатора. Замена *Fe* на *Ni* в комбинации металлов позволяет снизить оптимальную температуру CVD синтеза с 800°C до 500°C с увеличением производительности в 2-3 раза. Соединения-хелаты выполняют двойную функцию – образование органо-лигандных комплексов металлов и «топлива» в экзотермическом процессе их распада.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, бюджетная тема FRES-2026-0015: «Получение и анализ супрамолекулярных и легированных углеродных структур с промышленно полезными свойствами».

Библиографический список:

1. **Булярский, С.В.** Углеродные нанотрубки: технология, управление свойствами, применение / С.В. Булярский. – Ульяновск: Стрежень, 2011. – 479 с.
2. **Мищенко, С.В.** Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение / С.В. Мищенко, А.Г Ткачев. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
3**. Lim, X.-X.** A critical review of heterogeneous catalyst design for carbon nanotubes synthesis: Functionalities, performances, and prospects / X.-X. Lim, S.C. Low, W.D. Oh // Fuel Processing Technology. – 2023. – V. 241. – Art. № 107624. – 28 p. DOI: 10.1016/j.fuproc.2022.107624.
4. **Allaedini, Gh.** Carbon nanotubes via different catalysts and the important factors that affect their production: A review on catalyst preferences / Gh. Allaedini, M.T. Siti, P. Aminayi et al. // International Journal of Nano Dimension. – 2016. – V. 7. – № 3. – P. 186-200. DOI: 10.7508/ijnd.2016.03.002.
5. **Shah, K.A.** Synthesis of carbon nanotubes by catalytic chemical vapour deposition: A review on carbon sources, catalysts and substrates / K.A. Shah, B.A. Tali // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2016. – V. 41. – P. 67-82. DOI: 10.1016/j.mssp.2015.08.013.
6. **Prima, D.O.** Cocktail-type catalysis: an emerging concept in metal-mediated transformations / D.O. Prima, S.Z. Vatsadze // Organometallics. – 2025. – V. 44. – I. 13. – P. 1337-1357. DOI: 10.1021/acs.organomet.5c00117.
7. **Galushko, A.S.** Totally defined catalysis as a new paradigm for describing catalytic systems by combining advanced analytics and machine learning techniques / A.S. Galushko, V.A. Cherepanova, V.P. Ananikov // Advances in Organometallic Chemistry. – 2025. – V. 84. – P. 255-285. DOI: 10.1016/bs.adomc.2025.09.005.
8. **Li,Z.** Carbon nanotube growth on calcium carbonate / Z. Li, E. Dervishi, Y. Xu et al. // Catalysis Letters. – 2009. – V. 131. – I. 3-4. – P. 356-363. DOI 10.1007/s10562-009-0061-5.
9. **Magrez, A.** Catalytic CVD synthesis of carbon nanotubes: towards high yield and low temperature growth / A. Magrez, J.W. Seo, R. Smajda et al. // Materials. – 2010. – V. 3. – I. 11. – P. 4871-4891. DOI: 10.3390/ma3114871.
10. **Буракова, Е.А.** Влияние термообработки на свойства катализатора синтеза углеродных нанотрубок / Е.А. Буракова, Г.С. Бесперстова, М.А. Неверова и др. // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2020. – Т. 82. – № 1. С. 237-246. DOI: 10.20914/2310-1202-2020-1-237-246.
11. **Poliakova, O.Yu**. Influence of the nature of chelating agents on the activity and structural pre-organization

of metal oxide catalysts for the growth of carbon nanotubes synthesized by the method of polymerized complex precursors / O.Yu. Poliakova, A.P. Prudchenko, Yu.S. Protasevich // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2024. – V. 21. – I. 4. – P. 761-763. DOI: 10.1134/S1547477124701280.
12. **Lobiak, E.V.** Ni–Mo and Co–Mo alloy nanoparticles for catalytic chemical vapor deposition synthesis of carbon nanotubes / E.V. Lobiak, E.V. Shlyakhova, L.G. Bulusheva et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – V. 621. – P. 351-356. DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.09.220.
13. **Lobiak, E.V.** Carbon nanotube synthesis using Fe-Mo/MgO catalyst with different ratios of CH_4 and H_2 gases / E.V. Lobiak, E.V. Shlyakhova, A.V. Gusel'nikov et al. // Physica status solidi (b). – 2017. – V. 255. – I. 1. –Art. № 1700274. – 6 p. DOI: 10.1002/pssb.201700274.
14. **Prudchenko, A.P.** Metal oxide catalysts for low-temperature template CCVD synthesis of carbon nanotubes / A.P. Prudchenko, O.Yu. Polyakova, Yu.S. Protasevich // Journal of Advanced Materials and Technologies. – 2024. – V. 9. – № 1. – P. 12-22. DOI: 10.17277/jamt 01.pp.012-022.

References:

1. Bulyarsky S.V. *Uglerodnye nanotrubki: tekhnologiya, upravlenie svojstvami, primenenie* [Carbon nanotubes: technology, property control, and applications]. Ulyanovsk, Strezhen Publ., 2011, 479 p. (In Russian).
2. Mishchenko S.V., Tkachev A.G. *Uglerodnye nanomaterialy. Proizvodstvo, svojstva, primenenie* [Carbon nanomaterials. Production, properties, and applications]. Moscow: Mechanical Engineering Publ., 2008, 320 p. (In Russian).
3. Lim X.X., Low S.C., Oh W.D. A critical review of heterogeneous catalyst design for carbon nanotubes synthesis: functionalities, performances, and prospects, *Fuel Processing Technology*, 2023, vol. 241, art. no. 107624, 28 p. DOI: 10.1016/j.fuproc.2022.107624.
4. Allaedini Gh. Siti M.T., Aminayi P. et al Carbon nanotubes via different catalysts and the important factors that affect their production: A review on catalyst preferences, *International Journal of Nano Dimension,* 2016, vol. 7, no 3, pp. 186–200. DOI: 10.7508/ijnd.2016.03.002.
5. Shah K.A., Tali B.A. Synthesis of carbon nanotubes by catalytic chemical vapour deposition: A review on carbon sources, catalysts and substrates, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2016, vol. 41, pp. 67-82. DOI: 10.1016/j.mssp.2015.08.013.
6. Prima D.O., Vatsadze S.Z. Cocktail-type catalysis: an emerging concept in metal-mediated transformations, *Organometallics*, 2025, vol. 44, issue 13, pp. 1337-1357. DOI: 10.1021/acs.organomet.5c00117.
7. Galushko A.S., Cherepanova V.A., Ananikov V.P. Totally defined catalysis as a new paradigm for describing catalytic systems by combining advanced analytics and machine learning techniques, *Advances in Organometallic Chemistry*, 2025, vol. 84, pp. 255-285. DOI: 10.1016/bs.adomc.2025.09.005.
8. Li Z., Dervishi E., Xu Y. et al. Carbon nanotube growth on calcium carbonate, *Catalysis Letters*, 2009, vol. 131, issue 3-4, pp. 356-363. DOI: 10.1007/s10562-009-0061-5.
9. Magrez A., Seo J.W., Smajda R. et al. Catalytic CVD synthesis of carbon nanotubes: towards high yield and low temperature growth, *Materials*, 2010, vol. 3, issue 11, pp. 4871-4891. DOI: 10.3390/ma3114871.
10. Burakova E.A., Besperstova G.S., Neverova M.A. et al. Vliyanie termoobrabotki na svojstva katalizatora sinteza uglerodnykh nanotrubok [Influence of heat treatment on the properties of a catalyst for the synthesis of carbon nanotubes], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologij [Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies]*, 2020, vol. 82, no 1, pp. 237-246. DOI: 10.20914/2310-1202-2020-1-237-246.
11. Poliakova O.Yu., Prudchenko A.P., Protasevich Yu.S. Influence of the nature of chelating agents on the activity and structural pre-organization of metal oxide catalysts for the growth of carbon nanotubes synthesized by the method of polymerized complex precursors, *Physics of Particles and Nuclei Letters,* 2024, vol. 21, issue 4, pp. 761-763. DOI: 10.1134/S1547477124701280.
12. Lobiak E.V., Shlyakhova E.V., Bulusheva L.G. et al. Ni–Mo and Co–Mo alloy nanoparticles for catalytic chemical vapor deposition synthesis of carbon nanotubes, *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol. 621, pp. 351-356. DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.09.220.
13. Lobiak E.V., Shlyakhova E.V., Gusel'nikov A.V. et al. Carbon nanotube synthesis using Fe-Mo/MgO catalyst with different ratios of CH_4 and H_2 gases, *Physica status solidi (b)*, 2017, vol. 255, issue 1, art. no. 1700274, 6 p. DOI: 10.1002/pssb.201700274.
14. Prudchenko A.P., Polyakova O.Yu., Protasevich Yu.S. Metal oxide catalysts for low-temperature template CCVD synthesis of carbon nanotubes, *Journal of Advanced Materials and Technologies*, 2024, vol. 9, no. 1, pp. 12-22. DOI: 10.17277/jamt 01.pp.012-022.