УДК 546.26-162:534.838.7:547.469.3 *Оригинальная статья*

Изучение параметров синтеза углеродных наноструктур при микроволновом совместном пиролизе полистирола и микрокристаллической целлюлозы

А.Н. Заритовский[1], Е.Н. Котенко[1], С.В. Грищук[1], В.А. Глазунова[1,2], Г.К. Волкова[1,2]
[1]ФГБНУ «Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко»
283048, Россия, ДНР, г. Донецк, ул. Розы Люксембург, 70
[2]ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина»
283048, Россия, ДНР, г. Донецк, ул. Розы Люксембург, 72
zaritovski@gmail.com

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.624

Аннотация: Изучены параметры синтеза углеродных наноструктур в ходе микроволнового каталитического совместного пиролиза полимерных материалов. Донорами углерода выбраны полистирол – высокоуглеродистый синтетический полимер и микрокристаллическая целлюлоза – возобновляемый экологически безопасный источник углерода растительного происхождения. Процессы проводили в присутствии смеси оксалатов никеля и железа, служащих прекурсорами металлических катализаторов, при использовании гранулированного активного угля марки АГ-3 в качестве поглотителя микроволнового излучения для преобразования электромагнитной энергии в тепловую. Исследовано влияние концентрации микроволнового акцептора, времени обработки и способа подготовки реакционной смеси на формирование многостенных углеродных нанотрубок. Оптимальные условия процесса синтеза целевого продукта достигаются при концентрации микроволнового акцептора 40% (мас.) и циклическом воздействии микроволнового излучения мощностью 1000 Вт в течение 5-12 минут. Результаты исследований подтверждены данными просвечивающей электронной микроскопии и рентгенофазового анализа.

Ключевые слова: микроволновый совместный пиролиз, многостенные углеродные нанотрубки, полистирол, целлюлоза.

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 – научный сотрудник отдела супрамолекулярной химии ФГБНУ «Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко»
Грищук 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»

Original paper

Study of the parameters of carbon nanostructures synthesis in microwave co-pyrolysis of polystyrene and microcrystalline cellulose

A.N. Zaritovskii[1], E.N. Kotenko[1], S.V. Grishchuk[1], 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/2026.18.624

Abstract: The parameters of the synthesis of carbon nanostructures during microwave catalytic co-pyrolysis of polymer materials were studied. Polystyrene, which is a typical high-carbon synthetic polymer, and microcrystalline cellulose, a renewable environmentally friendly source of carbon of

© А.Н. Заритовский, Е.Н. Котенко, С.В. Грищук, В.А. Глазунова, Г.К. Волкова, 2026

plant origin, were selected as carbon donors. The processes were carried out in the presence of a mixture of nickel and iron oxalates, which serve as metal catalysts precursors, using granulated activated carbon of AG-3 grade as a microwave absorber to convert electromagnetic energy into thermal energy. The effect of microwave acceptor concentration, treatment time and method of preparing the reaction mixture on the formation of multi-walled carbon nanotubes was investigated. It has been established that the optimal conditions for the synthesis process of the target product are achieved at a microwave acceptor concentration of 40% (wt.) and a cyclic exposure to microwave radiation with a power of 1000 W for 5-12 minutes. The results of studies were confirmed by the data of transmission electron microscopy and X-ray phase analysis.
Keywords: microwave co-pyrolysis, multi-walled carbon nanotubes, polystyrene, cellulose.

Aleksandr N. Zaritovskii – Ph. D., Senior Researcher, Department of Supramolecular Chemistry, L.M. Litvinenko Institute of Physical Organic and Coal Chemistry, ORCID: 0009-0001-1614-3087
Elena N. Kotenko – Researcher, Department of Supramolecular Chemistry, L.M. Litvinenko Institute of Physical Organic and Coal Chemistry, ORCID: 0009-0001-2026-7322
Svetlana V. Grishchuk – Junior Researcher, Department of Supramolecular Chemistry, L.M. Litvinenko Institute of Physical Organic and Coal Chemistry, ORCID: 0009-0006-0103-1898
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, ORCID: 0009-0009-8804-2136
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, ORCID: 0000-0002-0765-5558

Поступила в редакцию/received: 01.04.2026; после рецензирования/revised: 15.04.2026; принята/accepted: 16.04.2026.

1. Введение

В последние годы наблюдается интенсификация исследований, связанных с расширением ассортимента сырьевых источников, используемых для синтеза перспективных углеродных наноматериалов (УНМ), имеющих приложения в различных сферах жизнедеятельности общества. Полимерные материалы синтетического и растительного происхождения, характеризующиеся высоким содержанием углерода и водорода, применяемые для получения жидких и газообразных топливных компонентов, также могут выступать потенциальным сырьём для синтеза УНМ.

На сегодняшний день одним из наиболее эффективных методов направленной переработки полимерных материалов является пиролиз – процесс термической или термокаталитической трансформации органических материалов в отсутствии кислорода [1, 2]. Этот метод зарекомендовал себя как рациональный способ преобразования как синтетических полимеров, так и природного полимерного сырья – лигноцеллюлозной биомассы. Пиролитическая конверсия биомассы, являющейся единственным возобновляемым источником углерода, а также синтетических полимерных материалов (пластмасс) позволяет получать ценные углеродные материалы и, кроме того, успешно решать экологическую проблему их утилизации [3-6].

Более перспективным подходом, по сравнению с раздельной

термохимической переработкой индивидуальных углеводородов, представляется совместный пиролиз (сопиролиз) биомассы и пластиковых отходов. Отличительной особенностью протекания данного процесса является синергетический эффект, проявляющийся во взаимодействии компонентов сырья и продуктов термолиза, приводящий к увеличению выхода конечных продуктов и улучшению их качественных показателей. Совместный пиролиз расширяет возможности синтеза углеродных структур с уникальными свойствами [7-9].

Экономически обоснованной альтернативой традиционному пиролизу является микроволновый (МВ) пиролиз, который обеспечивает быстрый, объёмный и равномерный нагрев реакционной массы. Это способствует значительному снижению энергозатрат (на 30-50%) и сокращению времени процесса [10, 11]. Пиролиз полимеров с использованием МВ энергии – технология термохимического превращения, основанная на нагреве реакционной массы путём преобразования электромагнитной энергии в тепловую за счёт микроволновых поглотителей. В качестве акцепторов МВ энергии могут выступать как компоненты реагирующей смеси, так и вносимые извне материалы, обладающие необходимыми диэлектрическими характеристиками [12, 13].

Недавние исследования свидетельствуют о возможности повышения производительности пиролиза биосырья и пластиковых отходов посредством микроволнового совместного пиролиза. Изначально данный метод исследовался относительно увеличения выхода энергетических продуктов (газа и жидкого топлива). Однако последние работы демонстрируют его возросший потенциал для направленного синтеза углеродных наноматериалов с заданными свойствами. Быстрый нагрев, обеспечиваемый микроволнами, минимизирует различия во временных интервалах разложения биомассы и пластика, что способствует более благоприятному взаимодействию образующихся промежуточных продуктов и, как следствие, формированию углеродных наноструктур [14-16].

Несмотря на очевидные преимущества, область применения микроволнового сопиролиза для получения УНМ остаётся недостаточно изученной. Требуются дальнейшие исследования, сфокусированные на оптимизации ключевых параметров процесса, таких как соотношение компонентов сырья, природа и состав катализатора, а также режимы микроволнового воздействия, для наиболее полного раскрытия возможностей этого метода и его успешного применения.

Целью данной работы является поиск оптимальных условий синтеза углеродных наноструктур в процессах микроволнового каталитического совместного пиролиза полимерных и биоорганических материалов.

2. Экспериментальная часть и обсуждение результатов

В рамках изучения условий протекания процесса была выполнена серия экспериментов для оценки влияния времени микроволнового воздействия, концентрации МВ поглотителя, а также способа подготовки реакционной массы на формирование углеродных наноструктур в ходе совместного микроволнового пиролиза синтетических и природных полимерных материалов. Все синтезы осуществляли в модифицированной мультимодовой микроволновой печи (частота 2450 МГц, мощность 200-1000 Вт), оснащённой системой подачи инертного газа и отвода газообразных продуктов реакции. В качестве модельных объектов для исследования были выбраны полистирол (ПС) как типичный высокоуглеродистый синтетический полимер и целлюлоза (МКЦ) – возобновляемый экологически безопасный источник углерода растительного происхождения. Синтез углеродных наноструктур проводили в присутствии смеси оксалатов никеля и железа, служащих прекурсорами металлических катализаторов; в роли акцептора микроволнового излучения, преобразующего электромагнитную энергию в тепловую, использовали гранулированный активный уголь марки АГ-3.

Одним из основных показателей, определяющих продуктивность термохимических превращений, а также выход и качество получаемых углеродных наноструктур, является время проведения процесса. Этот параметр зависит от ряда факторов, включая мощность СВЧ-излучения, тип катализатора, состав реакционной смеси (в частности, соотношение полистирола и целлюлозы), содержание МВ акцептора и атмосферу синтеза. Особое значение имеет необходимость согласования скорости быстрого термического разложения полистирола с более медленной карбонизацией целлюлозы, что достигается подбором оптимальной продолжительности обработки.

Синтез осуществляли при мощности 1000 Вт в токе инертного газа (аргон) с использованием смесей тщательно перемешанных реагентов. Процесс сопровождался быстрым разогревом, искрением, интенсивным газовыделением, красным калением реакционной массы. Газовыделение на начальных стадиях процесса связано, по нашему мнению, с частичным улетучиванием газообразных компонентов, образующихся при пиролизе. Полученные тёмные порошки подвергали очистке от остатков катализатора путём обработки растворами неорганических кислот с последующей промывкой водой.

Исследования показали, что при синтезе многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) в условиях совместного пиролиза полистирола и целлюлозы оптимальное время МВ обработки находится в диапазоне 5-12 минут. Экспериментально установлено, что для поддержания

температурного режима предпочтительно использовать ступенчатый (циклический) нагрев с длительностью отдельных импульсов до 5 минут.

Как известно, эффективность синтеза углеродных наноструктур в процессе микроволнового пиролиза углеродного сырья в значительной степени определяется способностью реакционной смеси поглощать микроволновое излучение и преобразовывать его в тепловую энергию.

Поскольку исходное сырьё на основе пластика или биомассы, как правило, обладает низкой диэлектрической проницаемостью и слабо взаимодействует с МВ полем, введение в систему поглотителя (МВ акцептора) является необходимым условием для создания и поддержания температурных режимов процесса пиролиза [16].

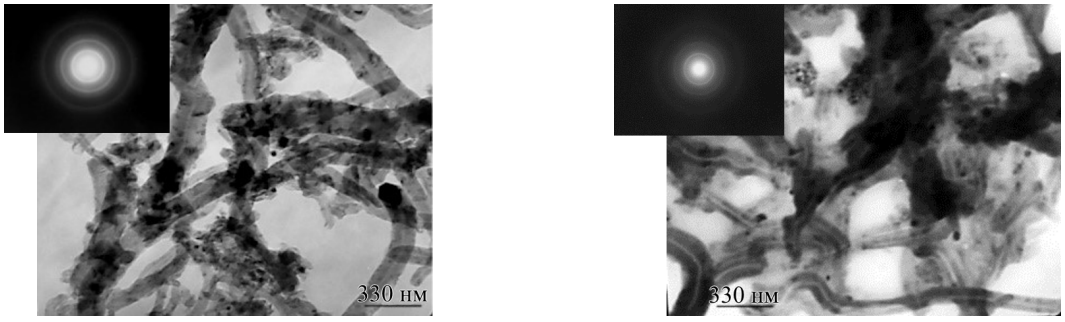
В настоящем исследовании проведен ряд экспериментов с целью установления оптимальной массовой доли МВ акцептора, обеспечивающей интенсивное протекание процесса пиролиза с образованием углеродных наноструктур. Опыты осуществлялись на индивидуальных компонентах реакционной смеси (полистирол и целлюлоза) при варьировании содержания МВ акцептора в диапазоне от 20 до 50% (мас.) с шагом 10%. В качестве критерия оптимизации принимали максимальное содержание МУНТ в составе твердых продуктов пиролиза по сравнению с другими формами углеродных наноструктур, такими как аморфный углерод, графитоподобные частицы или нановолокна неупорядоченной морфологии.

Анализ морфологии и внутренней структуры полученных продуктов выполнен с применением просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе JEM-200A (JEOL) и рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре ДРОН-3.

Проведенные исследования показали, что при концентрации МВ акцептора 40% (мас.) наблюдается наиболее выраженный рост МУНТ с высокой степенью упорядоченности и минимальным содержанием побочных углеродных форм. При более низком его содержании (20-30%) процесс пиролиза протекает недостаточно интенсивно, что связано с ограниченным поглощением микроволновой энергии и, как следствие, недостаточным нагревом реакционной среды. Это приводит к неполному разложению исходного органического материала, снижению концентрации активных предшественников углерода, необходимых для каталитического роста нанотрубок, а также к образованию аморфного углерода, что в совокупности отрицательно влияет на выход и качество МУНТ. Возрастание доли акцептора до 50%, напротив, способствует интенсификации процесса за счёт более активного разложения исходного материала, что также влечёт за собой снижение выхода МУНТ, поскольку условия становятся менее благоприятными для их структурной

организации и роста, вероятно, из-за ускоренного отвода необходимых газообразных предшественников.

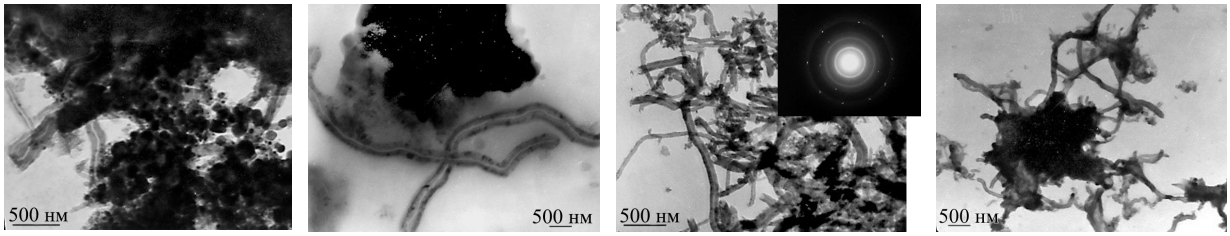
На рис. 1 представлены ПЭМ-микрофотографии продуктов микроволнового каталитического пиролиза индивидуальных компонентов (ПС и МКЦ) при 40%-ном содержании МВ акцептора. Аналогичная оптимизация была реализована для совместного пиролиза смеси полистирола и целлюлозы, взятых в массовом соотношении 1 : 1.



а б

Рис. 1. ПЭМ-микрофотографии продуктов микроволнового каталитического пиролиза: а – ПС, б – МКЦ.

По данным ПЭМ, как видно из рис. 2, в результате МВ сопиролиза ПС и МКЦ получена смесь УНС, преобладающими компонентами которой являются МУНТ и малослойные графеновые частицы, что также подтверждается картинами электронной микродифракции (дебаевские кольца, характерные для поликристаллических образцов, указывают на структуры МУНТ, в то время как гексагональные дифракционные максимумы соответствуют малослойным графеновым доменам).



а б в г

Рис. 2. ПЭМ-микрофотографии продуктов микроволнового каталитического совместного пиролиза ПС и МКЦ (1 : 1) при различных концентрациях МВ акцептора: а – 20%, б – 30%, в – 40%, г – 50%.

Согласно РФА, рентгенограммы исследованных образцов демонстрируют графитоподобную дифракционную картину с характерными особенностями (см. рис. 3). Низкая интенсивность, уширение, асимметрия и смещение рефлексов семейства (*00l*) в область меньших углов 2Θ свидетельствуют о нарушении межслоевой периодичности и увеличении межплоскостного расстояния d_{002}, что типично для МУНТ. Преобладание рефлексов *hk0* над слабыми и

уширенными *00l* отражениями подтверждает высокую кристалличность внутри слоёв при низкой межслоевой упорядоченности, вызванной искривлениями и нарушением регулярной укладки, что указывает на анизотропию структуры МУНТ с разнообразной морфологией и ориентацией. На рентгенограмме, относящейся к образцу, содержащему 20% (мас.) МВ акцептора (см. рис. 3, кривая 2), в области малых углов 2Θ наблюдается «гало», служащее признаком образования аморфного углерода. Установленная основная (доминирующая) фаза всех синтезированных наноматериалов, определённая по рассчитанному межплоскостному расстоянию d_{002} = 3,36-3,39 Å, также попадает в область детектирования многослойных углеродных нанотрубок, что в совокупности с приведенными выше данными ПЭМ свидетельствует о преимущественном образовании в процессе пиролиза МУНТ.

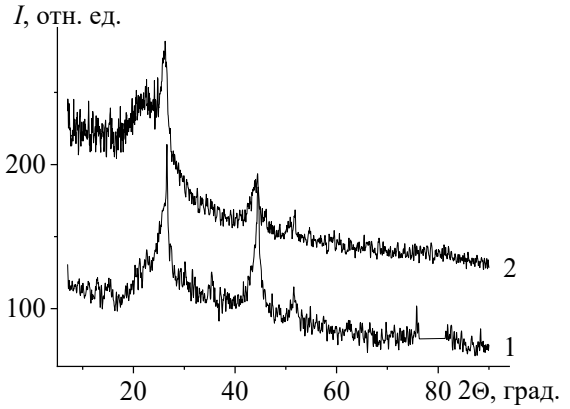


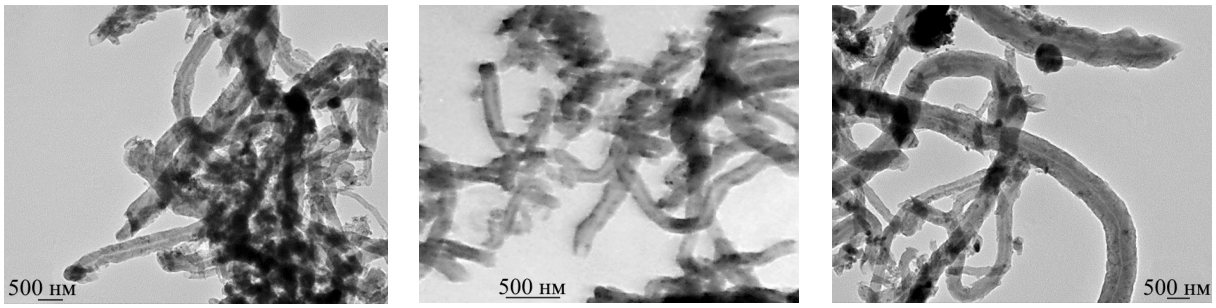
Рис. 3. Дифрактограммы продуктов микроволнового каталитического сопиролиза ПС и МКЦ (1 : 1) при концентрации МВ акцептора: (1) – 40%, (2) – 20%.

Таким образом, несмотря на различие в химической природе компонентов (синтетический полимер и природный полисахарид), оптимальная концентрация МВ акцептора, обеспечивающая максимальный выход МУНТ в процессе микроволнового сопиролиза ПС и МКЦ, взятых в соотношении 1 : 1, также составила 40% (мас.) (см. рис. 2в). Это означает, что данная концентрация представляет собой компромисс между эффективностью поглощения микроволновой энергии, скоростью нагрева и температурным режимом, благоприятным для каталитического роста МУНТ в условиях микроволнового воздействия.

Ещё один из потенциально значимых, но недостаточно описанных в литературе факторов, определяющих направленность и результативность микроволнового каталитического пиролиза, – степень гомогенности исходной реакционной смеси. Несмотря на то, что в доступных источниках отсутствует информация о систематических исследованиях этого параметра, можно предположить его важную роль, особенно при совместном пиролизе полимеров различной природы, таких как полистирол и целлюлоза. Неоднородное распределение компонентов – катализатора, МВ акцептора и исходного сырья – может приводить к локальным очагам поглощения

микроволновой энергии, что, в свою очередь, вызывает неравномерный нагрев и снижает общую производительность процесса. Такие условия могут негативно сказываться на селективности образования углеродных нанотрубок, способствуя росту аморфных или графитоподобных фаз.

Для оценки влияния гомогенности на выход и морфологию продуктов был исследован альтернативный метод приготовления реакционной смеси, предполагающий предварительное растворение одного из компонентов (полистирола) в органическом растворителе (толуоле или ацетоне), последующее смешивание с остальными твердыми реагентами, удаление растворителя и проведение пиролиза в стандартном режиме. Хотя данный подход теоретически должен был обеспечить более равномерное распределение всех компонентов, экспериментальные результаты показали, что он не приводит к существенному улучшению ни количественных, ни качественных характеристик процесса по сравнению с традиционным механическим (сухим) смешиванием. В обоих случаях были получены МУНТ, их морфология и относительное содержание в конечном продукте оказались сопоставимы (см. рис. 4). Это указывает на то, что в условиях интенсивного микроволнового нагрева, где процессы массо- и теплопередачи протекают крайне быстро, начальная гомогенность смеси, достигнутая за счёт растворения, не оказывает решающего влияния на механизм роста УНТ.



а б в

Рис. 4. ПЭМ-микрофотографии продуктов МВ сопиролиза ПС и МКЦ (1 : 1): при сухом смешивании компонентов (а); в случае предварительного растворения полистирола в: (б) – толуоле, (в) – ацетоне.

3. Заключение

Осуществлён синтез углеродных наноструктур методом микроволнового каталитического сопиролиза полистирола и микрокристаллической целлюлозы. Исследования синтезированных продуктов, проведенные методами ПЭМ и РФА, подтвердили формирование МУНТ и малослойных графеноподобных структур. Установлено, что оптимальные условия процесса достигаются при концентрации микроволнового акцептора 40% (мас.) и времени обработки

5-12 мин с использованием циклического режима микроволнового нагрева, что обеспечивает эффективное поглощение СВЧ-энергии, стабильный температурный режим и высокую селективность образования целевых наноуглеродных фаз.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, бюджетная тема «Получение и анализ супрамолекулярных и легированных углеродных структур с промышленно полезными свойствами, FRES-2026-0015».

Библиографический список:

1. **Waluyo, J.** Biomass pyrolysis: a comprehensive review of production methods, derived products, and sustainable applications in advanced materials / J. Waluyo, I.T. Purba, Z.A. Linanggeng et al. // Applied Science and Engineering Progress. – 2025. – V. 18. – № 2. – Art. № 7645. – 49 p. DOI: 10.14416/j.asep.2024.11.009.
2. **Osman, A.I.** Synergistic technologies for a circular economy: upcycling waste plastics and biomass / A.I. Osman, M. Nasr, C.O. Aniagor et al. // Frontiers of Chemical Science and Engineering. – 2025. – V. 19. – I. 1. – Art. № 2. – 35 p. DOI: 10.1007/s11705-024-2507-0.
3. **Cukierman, A.L.** Strategies for sustainable synthesis processes of nanocarbons from biomass / A.L. Cukierman, P.B. Bonelli // In book: Bio-Based Nanomaterials: Synthesis Protocols, Mechanisms and Applications; ed. by A.K. Mishra, C.N. Hussain. – Amsterdam: Elsevier, 2022. – Ch. 2. – P. 21-51. DOI: 10.1016/B978-0-323-85148-0.00011-7.
4. **Bazargan, A.** A review – synthesis of carbon nanotubes from plastic wastes / A. Bazargan, G. McKay // Chemical Engineering Journal. – 2012. – V. 195-196. – P. 377-391. DOI: 10.1016/j.cej.2012.03.077.
5. **Williams, P.T.** Hydrogen and carbon nanotubes from pyrolysis-catalysis of waste plastics: a review / P.T. Williams // Waste and Biomass Valorization. – 2021. – V. 12. – I. 1. – P. 1-28. DOI: 10.1007/s12649-020-01054-w.
6. **Заритовский, А.Н.** Влияние параметров процесса микроволнового каталитического пиролиза целлюлозы на синтез углеродных наноструктур / А.Н. Заритовский, Е.Н. Котенко, С.В. Грищук // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2025. – Вып. 17. – С. 841-850. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.841.
7. **Weldekidan, H.** Upcycling of plastic wastes and biomass for sustainable graphitic carbon production: a critical review / H. Weldekidan, A.K. Mohanty, M. Misra // ACS Environmental Au. – 2022. – V. 2. – I. 6. – P. 510-522. DOI: 10.1021/acsenvironau.2c00029.
8. **Ковалева, Н.Ю.** Переработка отходов биомассы и пластиков методом их совместного пиролиза. Обзор / Н.Ю. Ковалева // Химическая безопасность. – 2023. – Т. 7. – № 2. – С. 95-133. DOI: 10.25514/CHS.2023.2.25007.
9. **Deng, J.** Co-pyrolysis of biomass and plastic waste into carbon materials with environmental applications: a critical review / J. Deng, B. Yi, O. Mašek et al. // Green Chemistry. – 2025. – V. 27. – I. 22. – P. 6320-6341. DOI: 10.1039/D4GC04842C.
10. **Li, Z.** Advanced mechanisms and applications of microwave-assisted synthesis of carbon-based materials: a brief review / Z. Li, K. Peng, N. Ji et al. // Nanoscale Advances. – 2025. – V. 7. – I. 2. – P. 419-432. DOI: 10.1039/d4na00701h.
11. **Ковалева, Н.Ю.** Перспективы применения микроволнового излучения для пиролиза различных видов пластиковых отходов / Н.Ю. Ковалева // Химическая безопасность. – 2025. – Т. 9. – № 1. – С. 105-137. DOI: 10.25514/CHS.2025.1.28006.
12. **Suriapparao, D.V.** Resource recovery from synthetic polymers via microwave pyrolysis using different susceptors / D.V. Suriapparao, R. Vinu // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2015. – V. 113. – P. 701-712. DOI: 10.1016/j.jaap.2015.04.021.
13. **Yang, C.** A review on the microwave-assisted pyrolysis of waste plastics / C. Yang, H. Shang, J. Li et al. // Processes. – 2023. – V. 11. – I. 5. – Art. № 1487. – 22 p. DOI: 10.3390/pr11051487.
14. **Caroko, N.** A review on microwave-assisted co-pyrolysis of biomass-polymer / N. Caroko, H. Saptoadi, T.A. Rohmat // International Review of Mechanical Engineering (IREME). – 2020. – V. 14. – № 5. – P. 339-350. DOI: 10.15866/ireme.v14i5.19002.
15. **Suriapparao, D.V.** Effective deoxygenation for the production of liquid biofuels via microwave assisted co-pyrolysis of agro residues and waste plastics combined with catalytic upgradation / D.V. Suriapparao, R. Vinu, A. Shukla, S. Haldar // Bioresource Technology. – 2020. – V. 302. – Art. № 122775. – 10 p. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.12277.

16. **Suriapparao, D.V.** A review on role of process parameters on pyrolysis of biomass and plastics: present scope and future opportunities in conventional and microwave-assisted pyrolysis technologies / D.V. Suriapparao, R. Tejasvi // Process Safety and Environmental Protection. – 2022. – V. 162. – P. 435-462. DOI: 10.1016/j.psep.2022.04.024.

References:

1. Waluyo J., Purba I.T., Linanggeng Z.A. et al. Biomass pyrolysis: a comprehensive review of production methods, derived products, and sustainable applications in advanced materials, *Applied Science and Engineering Progress,* 2025, vol. 18, no. 2, art. no. 7645, 49 p. DOI: 10.14416/j.asep.2024.11.009.
2. Osman A.I., Nasr M., Aniagor C.O. et al. Synergistic technologies for a circular economy: upcycling waste plastics and biomass, *Frontiers of Chemical Science and Engineering,* 2025, vol. 19, issue 1, art. no. 2, 35 p. DOI: 10.1007/s11705-024-2507-0.
3. Cukierman A.L., Bonelli P.B. Strategies for sustainable synthesis processes of nanocarbons from biomass, *Bio-Based Nanomaterials: Synthesis Protocols, Mechanisms and Applications,* ed. by A.K. Mishra, C.N. Hussain. Amsterdam: Elsevier, 2022, chapter 2, pp. 21-51. DOI: 10.1016/B978-0-323-85148-0.00011-7.
4. Bazargan A., McKay G. A review – synthesis of carbon nanotubes from plastic wastes, *Chemical Engineering Journal,* 2012, vol. 195-196, pp. 377-391. DOI: 10.1016/j.cej.2012.03.077.
5. Williams P.T. Hydrogen and carbon nanotubes from pyrolysis-catalysis of waste plastics: a review, *Waste and Biomass Valorization,* 2021, vol. 12, issue 1, pp. 1-28. DOI: 10.1007/s12649-020-01054-w.
6. Zaritovskii A.N., Kotenko E.N., Grishchuk S.V. Vliyanie parametrov protsessa mikrovolnovogo kataliticheskogo piroliza tsellyulozy na sintez uglerodnykh nanostruktur [Influence of the parameters of microwave catalytic pyrolysis of cellulose on the carbon nanostructures synthesis], *Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials],* 2025, issue 17, pp. 841-850. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.841. (In Russian).
7. Weldekidan H., Mohanty A.K., Misra M. Upcycling of plastic wastes and biomass for sustainable graphitic carbon production: a critical review, *ACS Environmental Au,* 2022, vol. 2, issue 6, pp. 510-522. DOI: 10.1021/acsenvironau.2c00029.
8. Kovaleva N.Yu. Pererabotka otkhodov biomassy i plastikov metodom ikh sovmestnogo piroliza. Obzor [Processing of biomass and plastics waste by their copyrolysis – a review], *Khimiczeskaya bezopasnost [Chemical Safety Science],* 2023, vol. 7, no. 2, pp. 95-133. DOI: 10.25514/CHS.2023.2.25007. (In Russian).
9. Deng J., Yi B., Mašek O. et al. Co-pyrolysis of biomass and plastic waste into carbon materials with environmental applications: a critical review, *Green Chemistry,* 2025, vol. 27, issue 22, pp. 6320-6341. DOI: 10.1039/D4GC04842C.
10. Li Z., Peng K., Ji N. et al. Advanced mechanisms and applications of microwave-assisted synthesis of carbon-based materials: a brief review, *Nanoscale Advances,* 2025, vol. 7, issue 2, pp. 419-432. DOI: 10.1039/d4na00701h.
11. Kovaleva N.Yu. Perspektivy primeneniya mikrovolnovogo izlucheniya dlya piroliza razlichnykh vidov plastikovykh otkhodov [Prospects for the application of microwave radiation for the pyrolysis of various plastic waste types], *Khimiczeskaya bezopasnost [Chemical Safety Science],* 2025, vol. 9, no. 1, pp. 105-137. DOI: 10.25514/CHS.2025.1.28006. (In Russian).
12. Suriapparao D.V., Vinu R. Resource recovery from synthetic polymers via microwave pyrolysis using different susceptors, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,* 2015, vol. 113, pp. 701-712. DOI: 10.1016/j.jaap.2015.04.21.
13. Yang C., Shang H., Li J. et al. Review on the microwave-assisted pyrolysis of waste plastics, *Processes,* 2023, vol. 11, art. no. 1487, 22 p. DOI: 10.3390/pr11051487.
14. Caroko N., Saptoadi H., Rohmat T.A. A review on microwave-assisted co-pyrolysis of biomass-polymer, *International Review of Mechanical Engineering (IREME),* 2020, vol. 14, no. 5, pp. 339-350. DOI: 10.15866/ireme.v14i5.19002.
15. Suriapparao D.V., Vinu R., Shukla A., Haldar S. Effective deoxygenation for the production of liquid biofuels via microwave assisted co-pyrolysis of agro residues and waste plastics combined with catalytic upgradation, *Bioresource Technology,* 2020, vol. 302, art. no. 122775, 10 p. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.12277.
16. Suriapparao D.V., Tejasvi R. A review on role of process parameters on pyrolysis of biomass and plastics: present scope and future opportunities in conventional and microwave-assisted pyrolysis technologies, *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, vol. 162, pp. 435-462. DOI: 10.1016/j.psep.2022.04.024.