

раздел ХИМИЯ

УДК 547.541.3, 547.542.7

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2023.2.4

**КАТАЛИЗАТОРЫ НА ОСНОВЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ:
СИНТЕЗ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ**

© Н. М. Алиева

*Институт нефтехимических процессов им. акад. Ю. Г. Мамедалиева
Министерства Науки и Образования Азербайджана
Азербайджан, AZ102 г. Баку, пр. Ходжалы 30.*

Тел.: + (99412) 490 24 76.

Email: nusabaaliyeva2007@gmail.com

Катализаторы играют очень важную роль в химической промышленности. Катализаторы использовались для переработки топлива, такого как нефть, газ и уголь, очистки сточных вод и промышленных отходящих газов и т.д. Гетерогенные катализаторы привлекают больше внимания по сравнению с гомогенными катализаторами, поскольку они обеспечивают большую селективность и лучший выход. Исследования новых каталитических материалов или оптимизация существующих каталитических систем имеют огромное значение для повышения эффективности катализатора, что приводит к более высокому выходу и чистоте продукта. В настоящее время исследования больше сосредоточены на наноструктурированных катализаторах с улучшенными физико-химическими свойствами. Наноразмерные катализаторы обладают высокой удельной поверхностью и поверхностной энергией, что в конечном итоге приводит к высокой каталитической активности. Нанокатализаторы улучшают селективность реакций, позволяя проводить реакции при более низких температурах, уменьшая возникновение побочных реакций, повышая скорость рециркуляции и восстанавливая потребление энергии. Поэтому они широко используются в зеленой химии, оздоровлении окружающей среды, эффективном преобразовании биомассы, развитии возобновляемых источников энергии и других областях, представляющих интерес. В обзоре рассмотрены перспективы получения и каталитического применения наноматериалов в химии органического синтеза, обсуждены перспективы их развития, в том числе показаны результаты собственных исследований автора, в частности, применение наноразмерных частиц оксида алюминия в качестве каталитической системы с рядом оксидов металлов в реакции дегидратации спиртов в соответствующие углеводороды.

Ключевые слова: *наноразмерные материалы, нанокатализаторы, катализ, биокатализаторы, ферменты, наночастицы.*

Катализаторы на основе наноматериалов обычно представляют собой гетерогенные катализаторы, разбитые на металлические наночастицы для ускорения каталитического процесса. Наночастицы металлов имеют большую площадь поверхности, что может увеличить каталитическую активность. Катализаторы в виде наночастиц можно легко отделить и использовать повторно. Они обычно используются в мягких условиях, чтобы предотвратить разложение наночастиц. Функционализированные металлические наночастицы более устойчивы к растворителям по сравнению с нефункционализированными металлическими наночастицами. В жидкостях на наночастицы металлов может действовать сила Ван-дер-Ваальса. Агрегация частиц может иногда снижать каталитическую активность за счет уменьшения площади поверхности. Наночастицы также могут быть функционализированы полимерами или олигомерами для стерической стабилизации наночастиц путем создания защитного слоя, предотвращающего взаимодействие наночастиц друг с другом. Сплавы двух металлов, называемые биметаллическими наночастицами, используются для создания синергетических сплавов.

Среди основных областей применения наноматериалов в качестве катализаторов можно выделить следующие направления:

1) Дегалогенирование и гидрирование.

Катализаторы наночастиц активны для гидрогенолиза связей C-Cl, таких как полихлорированные бифенилы. Другая реакция гидрирования галогенированных ароматических аминов также важна для синтеза гербицидов и пестицидов, а также для получения топлива. В органической химии гидрирование связи C-Cl дейтерием используется для селективной маркировки ароматического кольца в экспериментах, связанных с кинетическим изотопным эффектом. Например, наночастицы, образованные на основе комплексов родия, катализировали дегалогенирование ароматических соединений, а также гидрирование бензола до циклогексана. Стабилизированные полимером наночастицы также можно использовать для гидрирования коричневого альдегида и цитронеллала. Также установлено, что рутениевые нанокатализаторы более селективны в гидрировании цитронеллала по сравнению с используемыми традиционными катализаторами.

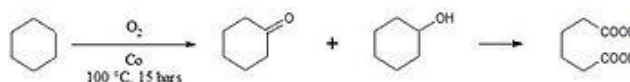
2) Реакции гидросилилирования.

Восстановление металлоорганических комплексов золота, кобальта, никеля, палладия или платины силанами приводит к образованию наночастиц металла, которые катализируют реакцию гидросилилирования. BINAP-функционализированные наночастицы палладия и наночастицы золота использовались для гидросилилирования стирола в мягких условиях; было обнаружено, что они более каталитически активны и более стабильны, чем комплексы Pd-BINAP, не содержащие наночастиц. Реакцию также может катализировать наночастица, состоящая из двух металлов.



3) Окислительно-восстановительные реакции органических соединений.

Реакцию окисления с образованием адипиновой кислоты можно катализировать с помощью наночастиц кобальта. Это используется в промышленных масштабах для производства полимера нейлона 6.6. Другие примеры реакций окисления, которые катализируются металлическими наночастицами, включают окисление циклооктана, окисление этена и окисление глюкозы.



4) Реакции сочетания.

Металлические наночастицы могут катализировать реакции сочетания C-C, такие как гидроформилирование олефинов, синтез витамина E и реакции сочетания Хека и сочетания Сузуки. Было обнаружено, что наночастицы палладия эффективно катализируют реакции сочетания Хека. Установлено, что повышенная электроотрицательность лигандов наночастиц палладия повышает их каталитическую активность. Соединение Pd₂(dba)₃ является источником Pd(0), который является каталитически активным источником палладия, используемого во многих реакциях, включая реакции кросс-сочетания.

5) Синтез альтернативных источников энергии.

Наночастицы оксида железа и кобальта можно наносить на различные поверхностно-активные материалы, такие как оксид алюминия, для преобразования газов, таких как монооксид углерода и водород, в жидкое углеводородное топливо с использованием процесса Фишера-Тропша. Многие исследования катализаторов на основе наноматериалов связаны с максимизацией эффективности каталитического покрытия в топливных элементах. Платина в настоящее время является наиболее распространенным катализатором для этого применения, однако она дорогая и редкая, поэтому было проведено множество исследований по максимизации каталитических свойств других металлов путем их сжатия до наночастиц в надежде, что когда-нибудь они станут эффективным катализатором. Наночастицы золота также проявляют каталитические свойства, несмотря на то, что объемное золото не реагирует. Было обнаружено, что наночастицы циркония, стабилизированные иттрием, повышают эффективность и надежность твердооксидного топливного элемента. Наноматериальные рутениево-платиновые катализаторы потенциально могут быть использованы для катализа очистки водорода для хранения водорода. Наночастицы палладия могут быть функционализированы металлоорганическими лигандами для катализа окисления CO и NO для контроля загрязнения воздуха в окружающей среде. Катализаторы на основе углеродных нанотрубок могут использоваться в качестве катодной каталитической подложки для топливных элементов, а металлические наночастицы использовались для катализа. Платиново-кобальтовые биметаллические наночастицы в сочетании с углеродными нанотрубками являются многообещающими кандидатами для топливных элементов прямого действия на метаноле, поскольку они обеспечивают электрод с более высоким стабильным током.

6) Наномедицина.

В магнитной химии наночастицы могут использоваться в качестве носителя катализатора для медицинских целей. Помимо обычного катализа, наноматериалы были исследованы для имитации природных ферментов. Наноматериалы с активностью, имитирующей ферменты, называются наноэнзимами. Многие наноматериалы использовались для имитации разновидностей природных ферментов, таких как оксидаза, пероксидаза, каталаза, СОД, нуклеаза и т.д. Наноэнзимы нашли широкое применение во многих областях, от биосенсоров и биоимиджинга до терапии и очистки воды.

7) Электрокатализ.

Нанокатализаторы представляют большой интерес для топливных элементов и электролизеров, где катализатор сильно влияет на эффективность. В топливных элементах для изготовления катодов широко используются нанопористые материалы. Пористые наночастицы платины обладают хорошей активностью в нанокатализе, но менее стабильны и имеют короткое время жизни. Одним из недостатков использования наночастиц является их склонность к агрегации. Проблема может быть смягчена с помощью правильной подложки для катализатора. Наночастицы являются оптимальными структурами для использования в качестве наносенсоров, поскольку их

можно настроить для обнаружения конкретных молекул. Примеры наночастиц Pd, электроосажденных на многостенных углеродных нанотрубках, показали хорошую активность в отношении катализа реакций кросс-сочетания.

Нанопроволоки очень интересны для электрокаталитических целей, поскольку их проще производить, а контроль их характеристик в процессе производства достаточно точен. Кроме того, нанопроволоки могут увеличить фарадеевскую эффективность благодаря их пространственной протяженности и, следовательно, большей доступности реагентов на активной поверхности.

Наноструктуры, участвующие в процессах электрокатализа, могут состоять из различных материалов. За счет использования наноструктурированных материалов электрокатализаторы могут обеспечить хорошую физико-химическую стабильность, высокую активность, хорошую проводимость и низкую стоимость. Металлические наноматериалы обычно состоят из переходных металлов (в основном железа, кобальта, никеля, палладия, платины). Мультиметаллические наноматериалы проявляют новые свойства благодаря характеристикам каждого металла. Преимущества заключаются в повышении активности, селективности и стабильности, а также в снижении стоимости. Металлы можно комбинировать по-разному, например, в биметаллической структуре ядро-оболочка: самый дешевый металл образует ядро, а наиболее активный (обычно благородный металл) – оболочку. Приняв эту конструкцию, можно сократить использование редких и дорогих металлов до 20%.

Одной из задач будущего является поиск новых стабильных материалов с хорошей активностью и особенно низкой стоимостью. Металлические стекла, полимерный нитрид углерода (PCN) и материалы, полученные из металлоорганических каркасов (MOF), – это лишь несколько примеров материалов с электрокаталитическими свойствами, в которые в настоящее время инвестируются исследования.

7) Фотокатализ.

Многие фотокаталитические системы могут выиграть от сочетания с благородным металлом; в первой ячейке Fujishima-Honda также использовалась пластина сокатализатора. Например, основная конструкция дисперсного фотокаталитического реактора для расщепления воды представляет собой водный золь, в котором дисперсная фаза состоит из полупроводниковых квантовых точек, каждая из которых связана с металлическим сокатализатором: КТ преобразует входящее электромагнитное излучение в экситон, в то время как сокатализатор действует как поглотитель электронов и снижает перенапряжение электрохимической реакции.

Наночастицы являются одной из наиболее распространенных форм наноматериалов, которые могут иметь различный состав и размеры. Возможность настраивать и создавать наночастицы с определенными функциональными свойствами привела к их применению в различных областях. Одной из областей, где они начинают находить широкое применение, является синтетический катализатор (т.е. не встречающийся в природе катализатор, такой как ферменты и т.д.). В работе [1] авторы исследуют различные области, в которых наночастицы можно использовать в качестве синтетических катализаторов. Наночастицы официально определяются как частицы размером от 1 до 100 нм. Чтобы несколько частиц можно было определить как систему наночастиц, по крайней мере 50% частиц в системе должны попадать в этот диапазон размеров. Наночастицы являются полезным материалом для катализа из-за их большой относительной площади поверхности: если система наночастиц имеет тот же объем, что и сыпучий материал, ее относительная активная площадь поверхности больше, чем у сыпучего материала. Поэтому наночастицы добавляются в качестве гетерогенных катализаторов (разнофазных катализаторов) для действия в качестве центра связывания/адсорбции или в качестве каталитической подложки, причем их большая активная площадь поверхности используется для различных типов реакций.

Отмечается [2], что в эпоху нанонауки, когда все устройства и технологии становятся все меньше и меньше в размерах с улучшенными свойствами, катализ становится наиболее важной областью применения. В этой обзорной статье авторы обобщают опубликованные в литературе данные о применении наноразмерных катализаторов в нашей повседневной жизни, полезных для человека. Обсуждается улучшение каталитических свойств за счет уменьшенных до наноразмера параметров катализатора. Введение в нанонауку, их функциональные подходы, текущие исследования также рассмотрены авторами статьи. Показаны основные области применения нанокатализаторов: в очистке воды; топливные элементы; хранилище энергии; в смесевых твердых ракетных топливах; производство биодизеля; в медицине; в красителе; применение углеродных нанотрубок и некоторые другие области применения.

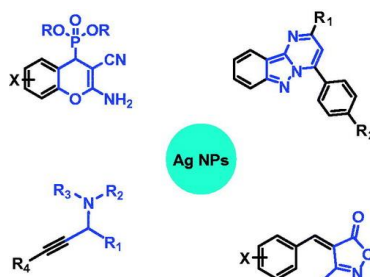
Поскольку в настоящее время мир сталкивается с огромными проблемами, касающимися атмосферы, энергии и окружающей среды, инновации в области катализа имеют все признаки того, что они становятся критически важными для энергетики, процессов синтеза и окружающей среды [3]. В последние годы с развитием нанотехнологий наблюдалась трансформация исследований каталитической активности и усовершенствованных катализаторов. Несомненно, использование наноматериалов в катализе и, особенно, неорганических наночастиц повлекло за собой множество попыток исследований по всему миру для создания творческих и более экологических конвенций. Эти наночастицы могут использоваться в качестве катализатора или посредника и могут стимулировать процесс реагента в новой среде, такой как вода. Кроме того, благодаря их небольшому размеру и расширенной площади поверхности нанокатализаторы, очевидно, стали интересным кандидатом на стыке гомогенного и гетерогенного катализа, принимая во внимание расширенную скорость отклика. Кроме того, наночастицы

дают дополнительные функциональные возможности реагентов из-за присущих им интересных свойств (например, наноманетизма, фотокаталитической активности). В соответствии с этим в поисках экологически чистого и более доступного катализатора нанокатализ превращается в важную область науки, которая широко применяется в академических и промышленных областях.

В работе [4] сообщается, что катализ представляет собой краеугольный камень химии, т.к. каталитические процессы широко распространены почти во всех химических процессах, разработанных для получения товаров народного потребления. Нанокатализ в настоящее время представляет собой инновационный подход к получению лучших свойств катализаторов: стабильной активности, хорошей селективности, легкости восстановления и возможности повторного использования. В последние годы для получения новых катализаторов на смену классическим методам, основанным на потенциально опасных реагентах, пришли новые методы, возникшие при замене этих реагентов растительными экстрактами, полученными в различных условиях. Благодаря разнообразию по морфологии и химическому составу эти материалы имеют различные свойства и области применения, что представляет собой перспективную область исследований. В этом контексте в обзоре основное внимание уделяется важности металлических нанокатализаторов, различным методам синтеза с акцентом на природные соединения, используемые в качестве носителя, методам характеристики, параметрам, связанным с подбором состава, размера и формы наночастиц и применениям в катализе. В данном обзоре представлены некоторые примеры зеленых нанокатализаторов, сгруппированные по их природе (моно- и биметаллические наночастицы, оксиды металлов, сульфиды, хлориды и другие комплексные катализаторы).

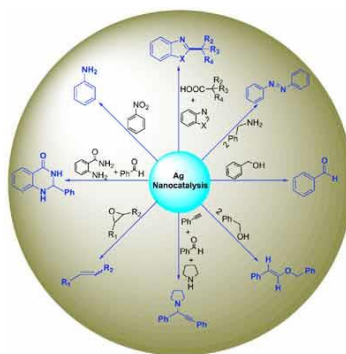
Ферменты, ответственные за каталитические реакции в биологических реакциях нашего организма, трудно использовать для диагностики или лечения, поскольку они реагируют только на определенные молекулы или обладают низкой стабильностью. Многие исследователи ожидают, что, если эти проблемы будут устранены или если будут разработаны искусственные катализаторы для создания синергетического эффекта за счет взаимодействия с ферментами в организме, появятся новые способы диагностики и лечения заболеваний. В частности, если будут разработаны искусственные катализаторы, реагирующие на внешние раздражители, такие как магнитные поля, реальностью могут стать новые методы лечения, дистанционно управляющие биореакциями *in vivo* [5]. Исследовательская группа под руководством профессора Ин Су Ли разработала магниточувствительный искусственный катализатор MAG-NER, который демонстрирует высокую каталитическую эффективность в живых клетках. Исследовательская группа имитировала структуру везикул, органелл внутри клетки, и синтезировала нанореактор с комбинированным магнитным катализатором с наночастицами оксида железа и палладиевыми катализаторами внутри полый наноболочка из кремнезема. Когда MAG-NER сталкивается с переменным магнитным полем, наночастицы оксида железа внутри вызывают тепло, вызванное магнитным полем, и активируют только палладиевый катализатор без повышения внешней температуры. Авторам удалось с высокой эффективностью реализовать каталитическую реакцию, которая превращает нефлуоресцентные реагенты во флуоресцентные продукты путем имплантации MAG-NER в живые клетки с последующим применением переменных магнитных полей. Авторы также подтвердили, что катализатор MAG-NER может оставаться активным в течение длительного периода времени, не загрязняясь биомолекулами в клетках, и не влияет на выживаемость клеток. Ожидается, что с помощью MAG-NER будут разработаны методы диагностики и лечения, которые могут искусственно управлять функциями клетки на расстоянии, поскольку искусственные молекулы могут быть синтезированы или химические реакции могут быть вызваны внутри клеток с использованием магнитных полей, которые безвредны для тела.

В последнее время [6] наночастицы серебра (НЧ Ag) широко использовались в качестве катализатора в разнообразных органических превращениях, таких как реакции сочетания, восстановления и многокомпонентные реакции. В этом обзоре авторы представляют последние разработки в области каталитического применения наночастиц серебра (НЧ Ag) в химических реакциях.



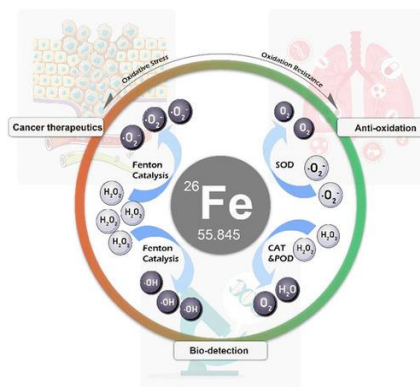
Сообщается [7], что селективный синтез наночастиц по размеру и форме и их каталитическое применение вызывают значительный интерес в последние годы. Гомогенный катализ важен из-за присущих ему преимуществ, таких как мягкие условия реакции и высокая селективность. Однако он обладает серьезным недостатком разделения катализатора и продукта и рециркуляции по сравнению с их гетерогенными аналогами, что ограни-

чивает их применение. Использование наноразмерного катализатора является альтернативной методологией сочетания преимуществ гетерогенного и гомогенного катализа. Наночастицы серебра важны, поскольку они находят применение в катализе, органических превращениях, синтезе тонких химикатов и органических промежуточных продуктов. Этот обзор охватывает результаты синтеза наночастиц Ag, наночастиц Ag на носителе и биметаллических наночастиц Ag-металл, а также их характеристики с помощью различных методов. Также обсуждается применение наночастиц Ag в нескольких органических превращениях, включая реакции образования связей C-C, C-N, C-S, C-O, а также реакции восстановления и окисления. Использование наночастиц Ag в катализе выгодно, т.к. позволяет избежать использования лигандов; легкое отделение катализатора для повторного использования делает протокол неоднородным и экономичным. Наночастицы Ag обладают хорошей каталитической активностью по отношению к целевым продуктам из-за большой площади поверхности. Учитывая эти преимущества, исследователи сосредоточили свое внимание на применении наночастиц Ag в катализе.



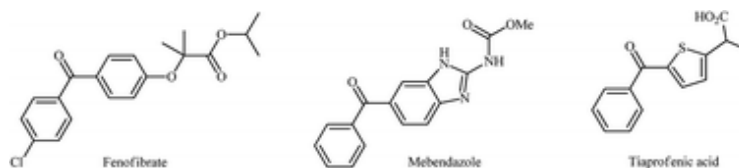
День за днем увеличивается значение металлических наночастиц в различных областях, таких как катализаторы, электроника, магнитные, механические, оптоэлектронные материалы, материалы для солнечных и топливных элементов, медицина, биовизуализация, косметика, сверхбыстрая передача данных и оптическое хранение данных и т.д. увеличивая их стоимость [8]. Наночастицы щелочных и благородных металлов (медь, серебро, платина, палладий, золото и др.) имеют широкую полосу поглощения в видимой области электромагнитного спектра света, т.к. растворы наночастиц этих металлов имеют интенсивную окраску, которой отсутствует в их объемных аналогах, а также на их атомном уровне. Основная причина этого явления связана с коллективными колебаниями свободных проводящих электронов, которые индуцируются взаимодействием с электромагнитным полем. Весь инцидент известен как локализованный поверхностный плазмонный резонанс. Из них авторы выбрали наночастицы серебра для исследований. В этой статье авторы обсудили синтез, характеристику и применение наночастиц серебра, а также будущие перспективы и проблемы в области коммерциализации наносеребра.

Железо можно найти во всех клетках млекопитающих, и оно имеет решающее значение для разнообразной клеточной активности в организме человека. Широкое применение и основные химические и биологические фундаментальные исследования наноматериалов на основе железа, особенно в области биомедицины, в последнее время вызывают растущий интерес в сообществе [9]. В этом обзоре авторы сосредоточились на каталитических характеристиках наноматериалов на основе железа (называемых нанокатализаторами, сокращенно НК) и их нанокаталитических биомедицинских применениях в нанокаталитической терапии Фентона, нанокаталитических оксигенационных терапевтических средствах и нанокаталитических биодетекциях с пероксидным окислением. Методологии изготовления НК на основе железа также обобщаются вместе с их применением. Обсуждаются репрезентативные терапевтические действия против злокачественных опухолей, болезни Альцгеймера (и других патологических отклонений) и биодетекция на основе нанокатализаторов. Наконец, рассматриваются перспективы будущего развития НК на основе железа с целью обеспечения более светлого будущего для НК на основе железа в нанокаталитической медицине.

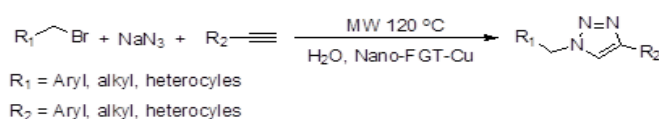


В работе [10] представлен обзор последних достижений в области катализа с коллоидными наночастицами металлического рутения за последние пять лет. Цель состоит в том, чтобы осветить интерес к металлическому рутению в наномасштабе для выбора каталитических реакций, проводимых в условиях раствора. Недавний прогресс в нанохимии позволил получить хорошо контролируемые наночастицы рутения, которые служили моделями и позволили изучить, как их характеристики влияют на их каталитические свойства. Хотя этот параметр недостаточно часто принимается во внимание, химию поверхности наночастиц рутения начинают лучше понимать. Таким образом, это дает прочную основу для лучшего понимания каталитических процессов на поверхности металла, а также для изучения того, как на них могут влиять стабилизирующие молекулы, а также кристаллографическая структура рутения. Сообщалось о применении наночастиц рутения в качестве катализаторов в растворах для различных реакций. Основные из них – восстановление, окисление Фишера-Тропша, активация C-H, CO₂, и получение водорода посредством дегидрирования аминокорана или реакций расщепления воды, которые рассмотрены в работе. Полученные результаты показали, что наночастицы рутения могут быть очень эффективными в этих реакциях, но все еще требуются усилия, чтобы иметь возможность рационализировать результаты. Помимо своих каталитических характеристик, рутениевые нанокатализаторы являются очень хорошими моделями для исследования ключевых параметров для более контролируемого нанокатализа. Это сложная, но фундаментальная задача для разработки более эффективных каталитических систем, а именно – более активных и селективных катализаторов, способных работать в мягких условиях.

В последние несколько десятилетий кросс-сочетание арилгалогенидов и арилборных кислот в присутствии монооксида углерода (CO), также называемое карбонильным сочетанием Сузуки, с образованием двух новых углерод-углеродных связей при производстве синтетически и биологически важных биарилкетонов, было широко изучено [11]. Следовательно, различные каталитические системы были тщательно исследованы, чтобы максимизировать эффективность этой привлекательной области синтеза биарилкетонов. Как показано в литературе, системы на основе нанометаллов являются одними из самых мощных катализаторов для этого преобразования, поскольку их большое отношение площади поверхности к объему и реакционная морфология обеспечивают более высокие скорости реакции при более мягком давлении CO даже при очень низких нагрузках катализатора.



В работе [12] показаны нанокатализаторы с магнитным сердечником и их применение в нанокатализе. Магнитно перерабатываемые нанокатализаторы и их использование в безвредных средах – идеальное сочетание для разработки устойчивых методологий органического синтеза. Вода или полиэтиленгликоль (ПЭГ) обеспечивают хорошую среду для проведения таких химических реакций с магнитными нанокатализаторами, поскольку эта комбинация придает исключительную ценность общему устойчивому развитию процесса. В этом мини-обзоре описано использование перерабатываемых магнитным полем нанокатализаторов для различных органических реакций в сочетании с активацией с помощью микроволнового излучения.



Таким образом, нами рассмотрены основные направления применения нанокатализаторов на современном этапе. Как следует из приведенного обзора, роль нанокатализаторов в современном катализе исключительно велика, в связи с чем следует развивать широкие исследования в этом направлении для нахождения более приемлемых условий проведения органических реакций, что позволит добиться получения целевых продуктов с более высоким выходом, конверсией и селективностью.

В наших исследованиях использованы наночастицы оксида алюминия в качестве сокатализатора для ряда металлоксидных катализаторов и показана их роль в процессе приготовления катализатора, а также выявлен механизм протекания реакций на полученном наноразмерном катализаторе [13–16]. Изучено влияние нанокатализатора на протекание реакции конверсии некоторых спиртов в соответствующие углеводороды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gu H., Wang J. Novel metal nanomaterials and their catalytic applications // *Molecules*. 2016. Vol. 21. N 2. Pp. 141–162.
2. Pragnesh Ch., Dave N., Shah N. K. Applications of nano-catalyst in new era // *Journal of Saudi Chemical Society*. 2012. Vol. 16. N 3. Pp. 307–325.
3. Somwanshi S., Sandeep S., Kharat P. Nanocatalyst: A Brief Review on Synthesis to Applications // *Journal of Physics Conference Series*. 2020. Vol. 1644. Pp. 12046–12050.

4. Fierascu R. C., Ortan A., Avramescu S. M., Fierascu I. Phyto-Nanocatalysts: Green Synthesis, Characterization, and Applications // *Molecules*. 2019. Vol. 24. N 19. Pp. 3418–3440.
5. Jihwan L. Magnetothermal-induced catalytic hollow nanoreactor for bioorthogonal organic synthesis in living cells // *Nano Letters*. 2020. N 1. Pp. 1–8.
6. Ardakani L. S., Surendar A., Thanqavelu L., Mandal T. Silver nanoparticles (Ag NPs) as catalyst in chemical reactions // *Synthetic Communications*. 2021. Vol. 51. N 10. Pp. 1516–1536.
7. Bhosale M., Bhanage B. Silver Nanoparticles: Synthesis, Characterization and their Application as a Sustainable Catalyst for Organic Transformations // *Current Organic Chemistry*. 2015. Vol. 19. N 8. Pp. 708–727.
8. Chouhan N. Silver Nanoparticles: Synthesis, Characterization and Applications // in Book *Silver Nanoparticles* edited by K. Maaz. 2018. 321 p.
9. Peilei L., Minfeng H. Nanocatalytic Medicine of Iron-Based Nanocatalysts // *Chinese Chemical Society*. 2021. Vol. 3. N 2. Pp. 2445–2463.
10. Axet R., Philippot K. Catalysis with Colloidal Ruthenium Nanoparticles // *Chem. Rev.* 2020. Vol. 120. N 2. Pp. 1085–1145.
11. Sogutlu I., Mahmood E. A., Ahmadizadeh S., Ebrahimi S. Recent progress in application of nanocatalysts for carbonylative Suzuki cross-coupling reactions // *RSC Advances*. 2021. Vol. 11. N 4. Pp. 2112–2125.
12. Varma R. Nano-catalysts with magnetic core: sustainable options for greener synthesis // *Sustainable Chemical Processes*. 2014. Vol. 2. Pp. 113–117.
13. Алиева Н. М., Тагиева Ш. Ф., Исмаилов Э. Г., Гасимова Л. Х. Влияние ионов Cl^- , SO_4^{2-} на концентрацию электроно-акцепторных, электроно-донорных центров и каталитическую активность Zr/Al оксидного контакта в конверсии этанола в углеводороды / IX Бакинская Междунар. Мамадалиевская конф. по нефтехимии. Баку, 2016. С. 72.
14. Алиева Н. М., Исмаилов Э. Г., Юсифов Ю. Г., Акперли Г. Н. Исследование конверсии адсорбированного на $\text{Fe-Zr}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ этанола сочетанием методов ТГ/ДСК и ГХ // Мат-лы XVI симпозиума «Современная химическая физика». Туапсе, 2014. С. 150–151.
15. Алиева Н. М., Маммадов Э. Э., Аббасов Я. А., Зарбалиев Р. З., Исмаилов Э. Г. Исследование конверсии этанола в углеводороды на $\text{Zr-Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ катализаторах методом *in situ* EMR/GC-MS // Мат-лы II Российского конгресса по катализу. Самара, 2014. С. 52.
16. Алиева Н. М., Тагиева Ш. Ф., Маммадов Э. Э., Гасимова Ф. И., Исмаилов Э. Г. Взаимодействие адсорбированных *n*-и *изо*-пропиловых спиртов с Zr/Si оксидным катализатором по данным молекулярного состава газофазных и элементного, фазового состава твердых продуктов реакции в режиме термодесорбции // Бутлеровские сообщения. 2016. Т. 46. №4. С. 23–28.

Поступила в редакцию 03.04.2023 г.

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2023.2.4

**CATALYSTS BASED ON NANOMATERIALS:
SYNTHESIS AND APPLICATIONS**

© N. M. Aliyeva

*Institute of Petrochemical Processes,
Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan,
30 Khojaly Avenue, AZ1025 Baku, the Republic of Azerbaijan*

*Phone: (+99412) 490 24 76
Email: nusabaaliyeva2007@gmail.com*

Catalysts play a very important role in the chemical industry. They are used in processes such as the processing of fuels (oil, gas, and coal), the treatment of wastewater and industrial waste gases, and so on. Heterogeneous catalysts are attracting more attention compared to homogeneous catalysts because they provide greater selectivity and better yields. Studying of new catalytic materials or optimization of existing catalytic systems is essential for improvement of catalyst efficiency resulting in higher yields and product purity. Currently, studies are more focused on nanostructured catalysts with improved physicochemical properties. Nanoscale catalysts have a high specific surface area and surface energy, which ultimately leads to high catalytic activity. Nanocatalysts improve reaction selectivity by allowing reactions to be carried out at a lower temperature, reducing the occurrence of side reactions, increasing recycling rates, and restoring energy consumption. Therefore, they are widely used in green chemistry, environmental sanitation, efficient biomass conversion, renewable energy development, and other fields of interest. The author of the paper considers the prospects for the production and catalytic application of nanomaterials in the chemistry of organic synthesis, discusses the prospects for their development, including the results of the author's own research, in particular, the use of nanosized aluminum oxide particles as a catalytic system with a number of metal oxides in the reaction of dehydration of alcohols into the corresponding hydrocarbons.

Keywords: nanoscale materials, nanocatalysts, catalysis, biooctalizers, enzymes, nanoparticles.

Received 03.04.2023.