

УДК 547.541.3, 547.542.7

DOI: 10.34824/VKNPIRAN.2023.13.2.001

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ В КАЧЕСТВЕ КАТАЛИЗАТОРОВ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ

© Алиева Нушаба Муса гызы

Институт Нефтехимических процессов Министерства Науки и Образования,
Азербайджан, г. Баку; кандидат химических наук, nusabaaliyeva2007@gmail.com

Аннотация. Катализаторы играют очень важную роль в химической промышленности. Катализаторы использовались в таких процессах, как переработка топлива, такого как нефть, газ и уголь, очистка 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 низкой температуре, уменьшая возникновение побочных реакций, повышая скорость рециркуляции и восстанавливая потребление энергии. Поэтому они широко используются в зеленой химии, оздоровление окружающей среды, эффективное преобразование биомассы, развитие возобновляемых источников энергии и другие области, представляющие интерес

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

APPLICATION OF NANOMATERIALS AS CATALYSTS OF CHEMICAL REACTIONS

© Aliyeva Nushaba Musa

Institute of Petrochemical Processes of the Ministry of Science and Education, Azerbaijan, Baku;
Candidate of Chemical Sciences, nusabaaliyeva2007@gmail.com

Abstract. Catalysts play a very important role in the chemical industry. Catalysts have been

used in processes such as the processing of fuels such as oil, gas and coal, the treatment of waste water 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. Research into new catalytic materials or optimization of existing catalytic systems is essential to improve catalyst efficiency, resulting in higher yields and product purity. Currently, research is 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.

Key words: nanoscale materials, nanocatalysts, catalysis, bioocatalizers, enzymes, nanoparticles.

Наночастицы, в частности наночастицы золота, на протяжении тысячелетий использовались в Китае и Египте женщинами как в лечебных, так и в эстетических целях, а также художниками для изготовления и украшения очков и керамики, таких как прославленная чаша Ликурга (пятый век нашей эры) [1]. Трактаты о коллоидных наночастицах появились с начала XVII в., а в области катализа первые работы были опубликованы еще в 1941 г. по катализаторам гидрирования, защищенным поли(виниловым) спиртом, наночастицами палладия и платины, полученными восстановлением солей металлов H₂. Еще один большой прорыв в 20-м веке произошел в 1987 году, когда Харута обнаружил, что каталитическая активность наночастиц золота для окисления CO до CO₂ с помощью O₂ повышается, когда эти наночастицы золота меньше 5 нм. Таким образом, хотя наномир в оптике (плазмон), наномедицине, нанотехнологиях и нанонауке в целом охватывает диапазон от 1 до 100 нм и более, поразительное открытие Харуты свело направление исследований нанокатализа к мельчайшим наночастицам. Однако есть исключения; например, плазмонное возбуждение при облучении видимым светом больших наночастиц золота генерирует горячие электроны, которые активируют полупроводники, такие как TiO₂, для преобразования подложки. Даже субнаночастицы некоторых переходных металлов очень активны, хотя оптимум каталитической активности, вероятно, достигается для частиц, содержащих от 12 до 20 атомов металла, т.е. с размерами, близкими к 1 нм или чуть меньше. Эти характеристики стали возможными благодаря современным методам, таким как электронная микроскопия с коррекцией аббераций и рентгеновская абсорбционная спектроскопия, которые теперь позволяют наблюдать даже отдельные атомы металлов и субнанокластеры вместе с их близким окружением. Небольшие наночастицы обычно называют нанокластерами или субнанокластерами, если они меньше 1 нм, хотя существует континуум ситуаций от молекул до твердого состояния между небольшими кластерами, определяемыми молекулярными орбиталями, и более крупными наночастицами, определяемыми структурами энергетических зон. Эти различные типы различаются количеством атомов металла, природой лигандов и дисперсностью. Строго говоря, термин «кластер» или «нанокластер» относится только к молекулярно точным полиметаллическим молекулам с лигандами, для которых известна

рентгеновская кристаллическая структура, тогда как термин «наночастицы» используется для смесей более или менее полидисперсных крупных нанокластеров, определяемых гистогаммой, полученной при измерении с помощью просвечивающей электронной микроскопии. Кластеры, связанные металл-металл, обычно содержат несколько атомов металла, хотя известны и крупные атомы.

Нанокатализ уже давно стал важной частью нанонауки. Наночастицы могут заменить обычный материал и служить активными и стабильными гетерогенными катализаторами или материалом-носителем для различных каталитических групп [2,3]. Нанокатализ является быстро развивающейся областью, которая включает использование наноматериалов в качестве катализаторов для различных применений гомогенного и гетерогенного катализа. Гетерогенный катализ представляет собой одну из старейших коммерческих практик нанонауки; наночастицы металлов, полупроводников, оксидов и других соединений широко используются для важных химических реакций. Хотя исследования поверхности внесли значительный вклад в наше фундаментальное понимание катализа, большинство коммерческих катализаторов по-прежнему производятся путем «смешивания, встряхивания и выпекания» смесей из нескольких компонентов; их наноструктуры плохо контролируются, а отношения синтез-структура-производительность плохо изучены. Из-за их сложных физико-химических свойств в нанометровом масштабе даже характеристика различных активных центров большинства коммерческих катализаторов оказывается труднодостижимой. Ключевой задачей исследований в области нанокатализа является получение катализаторов со 100% селективностью, чрезвычайно высокой активностью, низким энергопотреблением и длительным сроком службы. Этого можно достичь только точно контролируя размер, форму, пространственное распределение, состав поверхности и электронную структуру, а также термическую и химическую стабильность отдельных наноконпонентов.

Область нанокатализа (использование наночастиц для катализа реакций) за последнее десятилетие претерпела взрывной рост как в гомогенном, так и в гетерогенном катализе. Поскольку наночастицы имеют большое отношение поверхности к объему по сравнению с сыпучими материалами, они являются привлекательными кандидатами для использования в качестве катализаторов.

В гомогенном катализе в качестве катализаторов используются наночастицы переходных металлов в коллоидных растворах. В этом типе катализа коллоидные наночастицы переходного металла тонко диспергированы в органическом или водном растворе или в смеси растворителей. Гетерогенные металлические нанокатализаторы получают адсорбцией наночастиц на носителях, которая включает функционализацию носителей для адсорбции на них наночастиц и изготовление наноструктур на носителях литографическими методами.

К важнейшим областям применения нанокатализа можно отнести:

- 1) Газификация биомассы для получения синтез-газа с высоким содержанием синтетического газа и пиролиз биомассы для производства бионефти
- 2) Производство биодизеля из отработанного растительного сырья
- 3) Производство зеленого дизельного топлива с использованием синтеза Фишера-Тропша
- 4) Дегидрирование парафинов, риформинг нефти. Селективное гидрирование,

гидрообесеривание

- 5) Улучшенное экономичное каталитическое сжигание авиационного топлива JP-10 с использованием растворимого нанокатализатора углеводородного топлива
- 6) Производство водорода путем паровой конверсии этанола на наноструктурированных катализаторах из оксида индия
- 7) Адсорбционная десульфуризация и биодесульфуризация ископаемых масел
- 8) Гидрообесеривание дизельного топлива
- 9) Применение нанокатализаторов с ядром и оболочкой для топливных элементов
- 10) Производство водорода на месте путем реакции аммиака и нанокатализаторов и др.

В работе [4] увеличение потребности населения в индустриализации и урбанизации привело к появлению в окружающей среде новых опасных химических веществ. Наиболее значительные части этих вредных веществ, обнаруженных в водоемах, остаются на втором плане, создавая опасность для здоровья людей и животных. Крайне важно удалять эти токсичные химические вещества из сточных вод, чтобы поддерживать чистоту и экологичность окружающей среды. Следовательно, в наши дни очистка сточных вод является сложной областью для эффективного управления жидкими отходами. Поэтому ученые ищут новые технологии для очистки и повторного использования сточных вод, и нанотехнология является одной из них благодаря потенциалу наночастиц эффективно очищать сточные воды, а также быть экологически безопасными. Однако относительно мало информации о применимости нанокатализаторов, их эффективности, и проблемы для будущих применений в очистке сточных вод. Данный обзор призван обобщить недавние исследования по применению различных типов нанокатализаторов для очистки сточных вод. В этом обзорном документе освещаются инновационные работы по использованию нанокатализаторов для очистки сточных вод, а также определяются вопросы и проблемы, которые необходимо решить для практического применения нанокатализаторов для очистки сточных вод.

За последние несколько десятилетий синтез и возможные применения нанокатализаторов привлекли большое внимание научного сообщества [5,6]. Многие хорошо зарекомендовавшие себя методы широко используются для синтеза нанокатализаторов. Однако большинство традиционных физических и химических методов имеют некоторые недостатки, такие как токсичность материалов-предшественников, необходимость использования высокотемпературных сред и высокая стоимость синтеза, что в конечном итоге препятствует их плодотворному применению в различных областях. Биoinsпирированный синтез является экологически чистым, экономически эффективным и требует низкой энергии/температуры окружающей среды. Различные микроорганизмы, такие как бактерии, грибы и водоросли, используются в качестве нанофабрик и могут обеспечить новый метод синтеза различных типов нанокатализаторов. Синтезированные нанокатализаторы могут найти дальнейшее применение в различных приложениях, таких как удаление тяжелых металлов, очистка промышленных стоков, изготовление материалов с уникальными свойствами, биомедицина и биосенсоры. В этом обзоре основное внимание уделяется биогенному синтезу нанокатализаторов из различных зеленых источников, которые были приняты в последние два десятилетия, и их потенциальному применению в различных областях.

Сообщается [7], что катализ как ключевая и перспективная технология играет все

более важную роль в различных областях, от энергетики, окружающей среды и сельского хозяйства до здравоохранения. Рациональный дизайн и синтез высокоэффективных катализаторов стали конечной целью исследований в области катализа. Благодаря быстрому развитию нанонауки и нанотехнологий и, в частности, теоретическому пониманию настройки электронной структуры в наноразмерных системах, этот элемент дизайна становится возможным благодаря точному контролю состава, морфологии, структуры и электронного состояния наночастиц. В то же время важно разработать инструменты для определения характеристик нанокатализаторов *in-situ* в реальных условиях реакции и для мониторинга динамики катализа с высоким пространственным, временным и энергетическим разрешением. В этом обзоре авторы обсуждают эффекты локализации в нанокатализе. Взяв в качестве примеров ограниченные каталитические системы углеродных нанотрубок (УНТ), наноксиды, ограниченные металлом, и двумерные (2D) слоистые нанокатализаторы, авторы суммируют и анализируют фундаментальные концепции, методы исследования и некоторые ключевые научные проблемы, связанные с нанокатализом. Кроме того, авторы представляют взгляд на проблемы и возможности будущих исследований в области нанокатализа с точки зрения: 1) контролируемого синтеза нанокатализаторов и рационального конструирования каталитически активных центров; 2) натурная характеристика нанокатализаторов и динамика каталитических процессов; 3) масштабирование и коммерциализация нанокатализаторов.

Отмечается [8,9], что 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 низкой температуре, уменьшая возникновение побочных реакций, повышая скорость рециркуляции и восстанавливая потребление энергии. Поэтому они широко используются в зеленой химии, оздоровление окружающей среды, эффективное преобразование биомассы, развитие возобновляемых источников энергии и другие области, представляющие интерес. В обзоре рассмотрены перспективы, парадоксальность и перспективность получения и каталитического применения наноматериалов в химии органического синтеза, обсуждены перспективы их развития.

В работах [10,11] показано, что нанокатализ – это одна из самых интересных областей нанотехнологии, в которой неожиданно увеличивается контакт между катализатором и реагентами. Нанокатализаторы обычно имеют большую площадь поверхности и способность достигать желаемых физических и химических свойств. Большинство этих катализаторов состоят из металлических частиц размером в несколько нанометров. Наночастицы металлов (НЧ), нанесенные на неорганические матрицы, продемонстрировали многообещающие свойства, такие как более высокая каталитическая активность и/или селективность в мягких условиях, чем обычные катализаторы, во многих реакциях. Применение НЧ в ката-

лизаторах приводит к уникальным каталитическим свойствам полученных нанокатализаторов. Большая площадь поверхности НЧ и значительное количество поверхностных атомов приводят к увеличению количества активных центров. Другими словами, поверхность НЧ играет важную роль в катализе, отвечая за их селективность и активность. Наночастицы имеют высокое отношение поверхности к объему, что делает их привлекательными для использования по сравнению с объемными каталитическими материалами. Однако их поверхностные атомы также очень активны из-за их высокой поверхностной энергии. В результате поверхностные атомы становятся настолько активными, что их размер и форма могут изменяться в ходе их каталитической функции. Поверхностные атомы химически более активны по сравнению с объемными атомами, поскольку они обычно имеют меньше соседних координационных атомов и ненасыщенных атомов. сайты или несколько оборванных связей. Каталитические свойства НЧ зависят от их размера, распределения по размерам, концентрации и электронных свойств в желаемой среде. Наночастицы с большой площадью поверхности, нанесенные на различные носители, в настоящее время широко используются в качестве катализаторов химических превращений.

Зеленая химия – это прагматизм набора принципов, которые исключают использование или производство опасных веществ в дизайне, разработке, синтезе и применении химических продуктов [12]. Соответственно, зеленые синтетические методы направлены на снижение опасности в качестве основных критериев при разработке новых химических процессов. Катализ лежит в основе всех химических процессов, поэтому нанокатализаторы и зависящая инженерия материалов представляет значительный интерес для зеленой химии и чистой энергии. В дополнение к размеру частиц, наноструктурированные катализаторы чрезвычайно разнообразны по форме и/или морфологии, чувствительны, а их каталитическая активность во многом зависит от их формы и морфологии. Кроме того, нанокатализатор обладает колоссальной площадью поверхности, отличным потенциалом рециркуляции и эффективными характеристиками восстановления.

Сообщается [13-15], что наноматериалы, особенно наночастицы металлов, обладают уникальными каталитическими свойствами и широко используются при получении нанокатализаторов; эти нанокатализаторы используются во многих химических реакциях для увеличения скорости реакции и эффективности продукта. С производством нанокатализаторов в промышленных масштабах можно ожидать больших изменений в отраслях промышленности страны, особенно в нефтяной, нефтехимической и фармацевтической. Каталитические свойства наноматериалов рассматриваются с новой точки зрения. Сначала исследуются причины каталитических свойств наноматериалов, а затем объясняется влияние таких факторов, как размер наночастиц, форма наночастиц, распределение и подготовка подложки наночастиц на их каталитические свойства.

Показано [16], что гетерогенные нанокатализаторы на основе углеродного носителя использовались для нескольких органических реакций, таких как гидрирование, окисление, восстановление и конденсация, благодаря их превосходным физико-химическим свойствам. В этой работе авторы представляют всесторонний обзор различных материалов на основе углерода, которые использовались в качестве носителей катализатора, обсуждая синтетические стратегии и их применение для различных органических превращений. Углеродсодержащие материалы, благодаря их широкой доступности и низкой стоимости, ис-

пользовались для различных применений, включая гетерогенный катализ. Различные углеродистые материалы использовались в качестве подложек для переходных металлов или других материалов. Эти вспомогательные материалы продемонстрировали свой потенциал для разработки экологичных и устойчивых подходов к гетерогенному катализу.

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 со-катализатора для ряда металлоксидных катализаторов и показана их роль в процессе приготовления катализатора, а также выявлен механизм протекания реакций на полученном наноразмерном катализаторе [17-20]. Изучено влияние нанокатализатора на протекание реакции конверсии некоторых спиртов в соответствующие углеводороды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Didler A. Introduction: Nanoparticles in Catalysis // *Chem. Rev.* 2020. Vol. 120. N 2. Pp. 461-463.
2. Kavita R. A Study on Nano Catalysis and Its Applications// *Journal of Advances and Scholarly Researchers in Allied Education.* 2018. Vol. 14. N 2. Pp. 1440-1445.
3. Kavita R. A Study on Nano Catalysis and Its Applications // *Journal of Advances and Scholarly Researchers in Allied Education.* 2017. Vol. 13. N 1. Pp. 1066-1071.
4. Masood Z., Ikhlaiq A., Akram A., Qazi Y. Application of Nanocatalysts in Advanced Oxidation Processes for Wastewater Purification: Challenges and Future Prospects // *Catalysis.* 2022. Vol. 12. N 7. Pp. 741-747.
5. Arpita R., Elzaki A., Tirth V., Osman H. Biological Synthesis of Nanocatalysts and Their Applications // *Catalysts.* 2021. Vol. 11. N 12. Pp. 1494-1499.
6. Chadha U., Selvaraj S., Ashokan H., Hartiharan S. Complex Nanomaterials in Catalysis for Chemically Significant Applications: From Synthesis and Hydrocarbon Processing to Renewable Energy Applications // *Advances in Materials Science and Engineering.* 2022. N 2. Pp. 141-149.
7. Yang F., Deng D., Pan X., Qiang F. Understanding nano effects in catalysis // *National Science Review.* 2015. Vol. 2, N 2. Pp. 183–201.
8. Sharma N., Oihia H., Bharadwaj A., Pathak D. Preparation and catalytic applications of nanomaterials: a review // *RSC Advances.* 2015. Vol. 5. N 66. Pp. 53381-53402.
9. Singh A., Chaudhary A. Nano Catalysts: A Newfangled Gem in the Catalytic World // *Recent Advances in Petrochemical Sciences.* 2017. Vol. 3. N 5. Pp. 1-4.
10. Kharisov B.I., Kharissova O.V., Ortiz-Mendez U. Catalysis: Nanocatalysts—Preparation, Characterization, and Their Application in Oil and Gas Processes // in Book *CRC Concise Encyclopedia of Nanotechnology.* 2016. 80 p.
11. Narkirwicz U. Nano-catalysts – research-technology-industrial application // in Book *Nanoscience and Nanotechnology.* 2018. 152 p.
12. Veeranna R., Shivamurthy P., Chandrashekaraiiah M., Kundachira N., Madanahalli S.

- Metal nanoparticles as emerging catalysts: A mini review // International Journal of Nano Dimens. 2021. Vol. 12. N 2. Pp. 90-97.
13. Kianfar E. Catalytic properties of nanomaterials and factors affecting it // in Book Importance and Applications of Nanotechnology. 2020. Pp. 22-25.
 14. Zhou B., Scott H., Raja R., Somorjai G. Nanotechnology in Catalysis Part 3. 2007. 187 p.
 15. Shachbazian-Yassar R. Better together: Scientists discover far-reaching applications of nanoparticles made of multiple elements // uic Today. 2021. N 2. Pp. 37-42.
 16. Bahuguna A., Kumar A., Krishnan Y. Carbon-Support-Based Heterogeneous Nanocatalysts: Synthesis and Applications in Organic Reactions // Asian Journal of Organic Chemistry. 2019. Vol. 8. N 8. Pp. 1263-1305.
 17. Алиева Н.М., Тагиева Ш.Ф., Исмаилов Э.Г., Гасымова 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 Международная Мамедалиевская Конференция по Нефтехимии. Баку. 2016. 72 с.
 18. Алиева Н.М., Исмаилов Э.Г., Юсифов Ю.Г., Акперли Г.Н. Исследование конверсии адсорбированного на Fe-Zr/ γ -Al₂O₃ этанола сочетанием методов ТГ/ДСК и ГХ. / XVI Симпозиум «Современная Химическая Физика». Туансе-2014. С. 150-151.
 19. Алиева Н.М., Маммадов Э.Э., Аббасов Я.А., Зарбалиев Р.З., Исмаилов Э.Г. Исследование конверсии этанола в углеводороды на Zr-Fe/ γ -Al₂O₃ катализаторах методом in situ EMR/GC-MS / II Российский Конгресс по Катализу. Самара – 2014. 52 с.
 20. 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.

REFERENCES

1. Didler A. Introduction: Nanoparticles in Catalysis // Chem. Rev. 2020. Vol. 120. N 2. Pp. 461-463.
2. Kavita R. A Study on Nano Catalysis and Its Applications// Journal of Advances and Scholarly Researchers in Allied Education. 2018. Vol. 14. N 2. Pp. 1440-1445.
3. Kavita R. A Study on Nano Catalysis and Its Applications // Journal of Advances and Scholarly Researchers in Allied Education. 2017. Vol. 13. N 1. Pp. 1066-1071.
4. Masood Z., Ikhlaq A., Akram A., Qazi Y. Application of Nanocatalysts in Advanced Oxidation Processes for Wastewater Purification: Challenges and Future Prospects // Catalysis. 2022. Vol. 12. N 7. Pp. 741-747.
5. Arpita R., Elzaki A., Tirth V., Osman H. Biological Synthesis of Nanocatalysts and Their Applications // Catalysts. 2021. Vol. 11. N 12. Pp. 1494-1499.
6. Chadha U., Selvaraj S., Ashokan H., Hartiharan S. Complex Nanomaterials in Catalysis for Chemically Significant Applications: From Synthesis and Hydrocarbon Processing to Renewable Energy Applications // Advances in Materials Science and Engineering. 2022. N 2. Pp. 141-149.

7. Yang F., Deng D., Pan X., Qiang F. Understanding nano effects in catalysis // National Science Review. 2015. Vol. 2, N 2. Pp. 183-201.
8. Sharma N., Oiha H., Bharadwaj A., Pathak D. Preparation and catalytic applications of nanomaterials: a review // RSC Advances. 2015. Vol. 5. N 66. Pp. 53381-53402.
9. Singh A., Chaudhary A. Nano Catalysts: A Newfangled Gem in the Catalytic World // Recent Advances in Petrochemical Sciences. 2017. Vol. 3. N 5. Pp. 1-4.
10. Kharisov B.I., Kharissova O.V., Ortiz-Mendez U. Catalysis: Nanocatalysts—Preparation, Characterization, and Their Application in Oil and Gas Processes // in Book CRC Concise Encyclopedia of Nanotechnology. 2016. 80 p.
11. Narkirwicz U. Nano-catalysts – research-technology-industrial application // in Book Nanoscience and Nanotechnology. 2018. 152 p.
12. Veeranna R., Shivamurthy P., Chandrashekaraiyah M., Kundachira N., Madanahalli S. Metal nanoparticles as emerging catalysts: A mini review // International Journal of Nano Dimens. 2021. Vol. 12. N 2. Pp. 90-97.
13. Kianfar E. Catalytic properties of nanomaterials and factors affecting it // in Book Importance and Applications of Nanotechnology. 2020. Pp. 22-25.
14. Zhou B., Scott H., Raja R., Somorjai G. Nanotechnology in Catalysis Part 3. 2007. 187 p.
15. Shachbazian-Yassar R. Better together: Scientists discover far-reaching applications of nanoparticles made of multiple elements // uic Today. 2021. N 2. Pp. 37-42.
16. Bahuguna A., Kumar A., Krishnan Y. Carbon-Support-Based Heterogeneous Nanocatalysts: Synthesis and Applications in Organic Reactions // Asian Journal of Organic Chemistry. 2019. Vol. 8. N 8. Pp. 1263-1305.
17. Aliyeva N.M., Tagieva Sh.F., Ismailov E.G., Gasimova L.H. The influence of Cl⁻, SO₄²⁻ ions on the concentration of electron-acceptor, electron-donor centers and the catalytic activity of Zr/Al oxide contact in the conversion of ethanol to carbon-hydrogen / IX Baku International Mammadaliev Conference on Petrochemistry. Baku. 2016. 72 p.
18. Alieva N.M., Ismailov E.G., Yusifov Yu.G., Akperli G.N. Investigation of the conversion of ethanol adsorbed on Fe-Zr/ γ -Al₂O₃ by a combination of TG/DSC and GC methods. / XVI Symposium "Modern Chemical Physics". Tuapse-2014. Pp. 150-151.
19. Aliyeva N.M., Mammadov E.E., Abbasov Ya.A., Zarbaliyev R.Z., Ismailov E.G. Investigation of ethanol conversion to hydrocarbons on Zr-Fe/ γ -Al₂O₃ catalysts by in situ EMR/GC-MS/ II Russian Congress on Catalysis. Samara – 2014. 52 p.
20. Alieva N.M., Tagieva Sh.F., Mammadov E.E., Gasimova F.I., Ismailov E.G. Interaction of adsorbed n- and isopropyl alcohols with Zr/Si oxide catalyst according to the molecular composition of gas-phase and elemental, phase composition of solid reaction products in the mode of thermal desorption // Butlerovskie messages. 2016. Vol.46. No. 4. Pp. 23-28.