

ОКИСЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ПРИСУТСТВИИ ХРОМОВЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ

© Джафарова Нахида Али гызы

Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности, кандидат химических наук, старший преподаватель кафедры «Химия и технология неорганических веществ», jafarova-naxida@rambler.ru, Баку

Аннотация. Реакция окисления является одной из основных реакций как неорганической, так и органической химии. В окислительных процессах большое значение имеет фактор катализатора, а именно, его природа, количество и фазовое состояние. В представленной работе нами рассмотрены реакции окисления органических субстратов, осуществленные в присутствии хромовых катализаторов. Показаны основные факторы, оказывающие влияние на выход и селективность образующихся продуктов.

Ключевые слова: окисление, катализаторы, хромсодержащие соединения, выход продукта, селективность.

OXIDATION OF ORGANIC COMPOUNDS IN THE PRESENCE OF CHROMIUM CATALYSTS

© Jafarova Nahida Ali

Azerbaijan State University of Oil and Industry, candidate of chemical sciences, senior lecturer at the Department of «Chemistry and technology of inorganic compounds», jafarova-naxida@rambler.ru

Abstract. The oxidation reaction is one of the basic reactions of both inorganic and organic chemistry. In oxidation processes, the catalyst factor is of great importance, namely its nature, quantity and phase state. In the presented work, we examined the oxidation reactions of organic substrates carried out in the presence of chromium catalysts. The main factors influencing the yield and selectivity of the resulting products are shown.

Key words: oxidation, catalysts, chromium-containing compounds, product yield, selectivity.

Хромсодержащие катализаторы весьма часто используются в реакциях окисления органических соединений. В этом направлении особенно широкое применение находят оксиды хрома, хромиты и хроматы, а также наноразмерные комплексы хрома. В этой работе нами рассмотрены наиболее основные хромовые катализаторы, используемые в процессах окисления. Так, в работе [1] методом простой мокрой пропитки синтезированы высокодисперсные мезопористые наносферные катализаторы МСМ-41 на носителе из оксида хрома. Данная работа посвящена систематическому исследованию по выявлению активных центров Cr в нанесенных на оксид хрома наносферных катализаторах МСМ-41 для

селективного окисления циклогексана в циклогексанон. Чтобы исследовать природу активных частиц, авторы синтезировали катализаторы с концентрацией Cr 0,5–10 wt % и охарактеризовали их с помощью XRD, UV/Vis спектроскопии, рамановской спектроскопии, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, расширенного рентгеновского абсорбционного анализа тонкой структуры, X Анализ структуры вблизи края поглощения - лучей, анализ сорбции N₂, ИК-Фурье-спектроскопия, ЯМР-спектроскопия ²⁹Si, SEM и TEM. Жидкофазное окисление циклогексана в циклогексанон (селективность 99 %) проводили в мягких условиях реакции, и результаты ясно показывают, что катализатор, загруженный 5 мас.% Cr, был оптимальным для реакции. Исходный состав изолированных частиц Cr³⁺ в катализаторе является основным фактором, влияющим на повышение активности окисления циклогексана.

В работе [2] описано восстановление биосорбционных носителей как альтернативный источник безвредного производства гетерогенных катализаторов реакций окисления в мягких условиях. Cr-содержащий цеолит FAU, в натрии форме (NaY) и протонной форме (HY), был извлечен из исследований биосорбции и повторно использован в качестве носителя для приготовления гетерогенных катализаторов методом гибких лигандов с использованием 1,3-дифенилтриазина и его производных. Результаты показали, что лиганд играет важную роль в координации Cr внутри цеолита. Катализаторы показали хорошую активность при окислении циклогексанола, достигая максимума конверсии 63,5%. Была проведена оценка выщелачивания Cr, и было обнаружено, что опоры Cr-FAU потеряли часть Cr в реакционную среду, тогда как иммобилизация Cr-комплексов снижает упомянутое выщелачивание. Для окисления циклогексана максимальная конверсия 72,9% была достигнута с использованием катализатора - цеолита HY.

В работе [3] показаны основные принципы и представлены идеи, изложенные в научно-технической литературе, о механизме взаимодействия СВЧ-излучения с твердофазными материалами, которые были положены в основу создания новых перспективных, энергоэффективных и экологически безопасных технологий получения гетерогенных катализаторов для реакций, протекавших под воздействием электромагнитного излучения СВЧ. Результаты авторских исследований подтверждают возможность практического использования предложенного метода гидротермального окисления промышленных низкодисперсных алюминиевых порошков с наличием объемной фазы Al(OH)₃·nH₂O, с дальнейшей термообработкой в СВЧ-поле для получения броневого Al/Al₂O₃ состава, эффективно потребляющего энергию микроволнового излучения. Благодаря текстурированным характеристикам и термопреобразующей способности синтезированные компоненты могут быть использованы в качестве потенциальных универсальных подшипников катализаторов реакций, стимулируемых электромагнитным излучением сверхвысокочастотной частоты (2,45 ГГц). Наиболее эффективным комплексным катализатором оказался состав Cu-Cr-Co/Al₂O₃/Al.

Изучено окисление изопропанола в жидкой фазе при атмосферном давлении и низкой температуре в присутствии оксидов переходных металлов (Cr₂O₃ и Fe₂O₃), полученных методом осаждения [4]. Эти твердые вещества, охарактеризованные структурным анализом (FTIR и XRD) и текстурным анализом (BET), привели к результатам, соответствующим тем, о которых сообщается в литературе. Оксид хрома имеет гораздо более развитую текстуру: удельная поверхность и объем пор в 5 раз больше, чем у оксида железа. Оба твердых вещества проявляют хорошую удельную активность и приводят к образо-

ванию ацетона и диоксида углерода как единственных продуктов окисления изопропанола. Однако оксид хрома более активен. Начальная каталитическая активность последнего колеблется в пределах от $4,87 \cdot 10^{-6}$ до $5,79 \cdot 10^{-6}$ моль/г·с в интервале температур от 40 до 80°C. Кинетические исследования показывают, что реакция протекает по последовательной схеме: изопропанол \rightarrow ацетон \rightarrow CO₂ с участием окислительно-восстановительного механизма. Низкое значение кажущейся энергии активации ($E_a(\text{Cr}_2\text{O}_3) = 2,87$ кДж/моль $<$ $E_a(\text{Fe}_2\text{O}_3) = 5,37$ кДж/моль) оправдывает относительно более высокую активность, наблюдаемую для оксида хрома.

В работе [5] циклогексен окисляли оксидом хрома (VI) (CrO₃) в чистой уксусной кислоте. Продукты окисления анализировали с помощью простого качественного анализа, ИК-спектроскопии и газовой хроматографии-масс-спектрометрии (ГХ/МС). Кинетические исследования были проведены для определения порядка реакции, константы скорости и энергии активации относительно окислителя с использованием метода аппроксимации псевдопорядка. Влияние Cu²⁺, Co²⁺ и Fe²⁺ в качестве катализаторов также было исследовано. Качественный анализ продукции выявил присутствие спиртов и кетонов, тогда как ГХ/МС показывает наличие циклогексанола (2,46%), циклогексанона (5,05%), 2-циклогексен-1-она (59,37%), моноацетат 1,2-циклогександиола (9,88%), 2-гидроксициклогексанона (1,75%) и би-2-циклогексен-1-ила (5,16%). В результате реакции было показано, что порядок соответствует 2-му порядку по CrO₃ с энергией активации 45,32 кДж/моль, в то время как Co²⁺ и Fe²⁺ проявляли некоторую каталитическую активность в реакции.

Прямое окисление бензола до фенола в жидкой фазе в среде метанола, ацетона, уксусной кислоты и ацетонитрила в качестве растворителя над хромовым катализатором, нанесенным на высокоупорядоченный нанопористый кремнезем (Cr-LUS-1) было изучено в работе [6]. Наилучшие результаты получены с растворителем метанолом с выходом 20% и селективностью 90%. Cr-LUS-1 охарактеризован методами PCA, изотермами адсорбции-десорбции азота и видимым спектрофотометром.

Синтез мезопористого Cr-ALPO проводили в гидротермальных условиях. Характеристика катализатора проведена с помощью низкоугловой рентгенографии, адсорбции N₂, УФ-VISDRS, ЭПР и термического анализа [7]. Каталитическая активность

была испытана на частичное окисление толуола молекулярным кислородом в паровой фазе. Было обнаружено, что Cr-ALPO действует как кислота и окислительно-восстановительный катализатор.

Гидротермальным методом синтезированы и использованы в каталитическом окислении CO нанокристаллические смешанные оксидные катализаторы Cu-Cr с различным мольным соотношением Cu/Cr [8]. Физико-химические свойства этих катализаторов были охарактеризованы методами порошковой рентгеновской дифракции (XRD), адсорбции N₂ (BET), температурно-программируемого восстановления (TPR), сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии (SEM и TEM). Также для лучшего сравнения катализаторов скорость реакции и значения TOF рассчитывались при двух разных температурах. Результаты показали, что порошки в основном состоят из макропор с широким распределением пор по размерам. Результаты каталитического исследования показали, что активность образца с мольным соотношением Cu/Cr, равного 2, была значительно выше, чем у остальных образцов, за счет образования структуры шпинели CuCr₂O₄, которая была более активной, чем фазы CuO и Cr₂O₃, в реакции окисления CO.

Применение хромовых катализаторов в реакциях окисления органических субстратов также сообщалось в работах [9-12].

Изучено окисление циклогексена оксидом хрома (VI) в водных и уксусных средах. Продукты реакции анализировали классическим методом, ИК- и ГХ/МС-анализом [13]. Основными продуктами реакции окисления в среде уксусной кислоты являются циклогексанол, циклогексанон, циклогекс-2-ен-1-он, циклогексан-1,2-диол, моноацетат и би-2-циклогексен-1-ил. Однако реакции между циклогексеном и оксидом хрома (VI) не наблюдалось в водной среде. На основании результатов был предложен механизм реакций окисления, включающий диссоциацию уксусной кислоты с образованием ацетат-аниона, который атакует оксид хрома (VI) с образованием ацетохромата-иона. Последний затем атакует циклогексен с образованием промежуточного ацетохромата циклогексенильного иона, который подвергается сдвигу и перегруппировке электронов с образованием циклогексанона и оксида хрома (IV), тем самым регенерируя кислоту. Предложенный механизм предполагает, что уксусная кислота служит как гомогенным катализатором, так и средой для реакции.

В работе [14] хромоксидные катализаторы синтезировали гидротермальным методом с использованием ЦТАБ в качестве ПАВ и $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ в качестве осадителя. Физико-химические свойства этих катализаторов были охарактеризованы методами рентгеновской дифракции (XRD), инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FT-IR), рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS) и просвечивающего электронного микроскопа (TEM). Также были исследованы характеристики каталитического удаления NO для различных концентраций NO при комнатной температуре. Показано, что в условиях объемной скорости 60 000 мл/(г·ч) и концентрации NO 1×10^{-6} образец Cr-100 продемонстрировал наилучшие каталитические характеристики, которые сохранялись в течение 120 часов при степени удаления не более 90%. Такие превосходные каталитические характеристики можно объяснить соотношением поверхностных ионов $\text{Cr}^{6+}/\text{Cr}^{3+}$. ИК-Фурье-анализ показал, что дезактивация катализатора произошла из-за того, что активные центры оксида хрома были заняты нитратами, что согласуется с результатами РФЭС. Кроме того, испытания активности в различных условиях показали, что низкая концентрация NO может замедлить скорость накопления нитратов и продлить срок службы катализатора.

Сообщается [15], что хотя существуют различные окислители, известные своей универсальностью и эффективностью, в области органической синтетической химии продолжается постоянный поиск новых окислителей. За последние несколько лет была проделана большая работа по использованию окислителей на основе хрома (VI), что привело к разработке множества реагентов. В этой работе обобщены различные типы комплексов хрома и их синтетическое применение в органической химии в качестве новых окислительных систем.

Двойные гидроксиды Cu,Cr-, Zn,Cr- и Cu,Al были синтезированы методом соосаждения и охарактеризованы элементным анализом, PXRD, SEM/EDS и BET [16]. Показано, что смешанные оксидные материалы, полученные при прокаливании при 873 К, проявляют очень высокую каталитическую активность в отношении сжигания толуола и этанола. Лучший образец получается из предшественника Cu,Cr-LDH с соотношением Cu:Cr 2:1, и состоит из оксида меди и хромита меди. Этот катализатор дал 50% конверсию толуола и этанола при температурах на 45 и 15 К ниже эталонных соответствующих коммерческих катализаторов. Каталитические испытания с механической смесью CuO и CuCr_2O_4

демонстрируют, что использование предшественника катализатора необходимо для достижения оптимальных результатов. Показана важность одновременного присутствия как Cu, так и Cr, влияние соотношения Cu:Cr на каталитическую активность, обсуждается роль межфазных границ в смешанной оксидной системе CuO-CuCr₂O₄.

Последние результаты исследований в области применения хромовых катализаторов в реакциях окисления органических субстратов отмечались в работах [17-36].

В наших исследованиях хромсодержащие катализаторы были использованы в реакциях окисления циклических кетонов в соответствующие лактоны. Показано, что эти катализаторы обладают высокой активностью и селективностью в данной реакции, которая в научной литературе известна как реакция Байера-Виллигера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Betsy, K. Selective Oxidation of Cyclohexane to Cyclohexanone Using Chromium Oxide Supported Mesoporous MCM-41 Nanospheres: Probing the Nature of Catalytically Active Chromium Sites / K. Betsy, Ch. Nayak, A. Lazar, A. Dibyendu // *ChemCatChem*. - 2018. - Vol. 10. - N 15. - Pp. 3291-3298

2. Figueiredo, H. Oxidation of cyclohexanol and cyclohexene with triazenido complexes of chromium immobilized in biosorption FAU supports / H. Figueiredo, I. Kuzniarska-Biemacka, B. Silva, A.M. Fonceka // *Chemical Engineering Journal*. - 2014. - Vol. 247. - pp. 134-141

3. Muradova, P.A. Synthesis and Investigation of the Activity of Cu-Cr-Co/Al₂O₃/Al-Catalysts in the Microwave Radiation-Stimulated Reaction Joint Deep Oxidation of Hydrocarbons and Carbon Monoxide / P.A. Muradova, Y.N. Litvishkov // *Modern Research in Catalysis*. - 2016. - Vol. 15. - N 1. - Pp. 336-341

4. Dehmani, Y. Total Oxidation of Isopropanol in the Liquid Phase, under Atmospheric Pressure and Low Temperature, on Transition Metal Oxides Catalysts Cr₂O₃ and Fe₂O₃ / Y. Dehmani, S. Abouarnadasse // *Journal of Chemistry*. - 2020. - N 2. - Pp. 31-45

5. Faruq, U.Z. Kinetic Studies of Catalytic Oxidation of Cyclohexene Using Chromium VI Oxide in Acetic Acid Medium / U.Z. Faruq, A.A. Zuru, E.O. Odebunmi, S.M. Dangoggo // *Nigerian Journal of Basic and Applied Sciences*. - 2010. - Vol. 18. - N 1. - Pp. 141-146

6. Gholami, J. Direct Oxidation of Benzene to Phenol in Liquid Phase over Nanoporous Silica of Chromium-LUS-1 / J. Gholami, A. Badiei, A. Abbasi, M. Manteghian // *Iranica Journal of Energy and Environment*. - 2013. - Vol. 4. - N 1. - pp. 24-27

7. Subrahmanyam, Ch. Partial oxidation of toluene by O₂ over mesoporous Cr-AlPO / Ch. Subrahmayam, B. Louis, F. Rainone, B. Viswanathan // *Catalysis Communications*. - 2002. - N 3. - pp. 45-50

8. Mobini, S. Synthesis and characterization of nanocrystalline copper-chromium catalyst and its application in the oxidation of carbon monoxide / S. Mobini, F. Meshkani, M. Rezaei // *Process Safety and Environmental Protection*. - 2017. - Vol. 107. - pp. 181-189

9. Feenan, J. Chromium Catalysts for Oxidizing Automotive Exhaust / J. Feenan, R.B. Anderson, H.W Swan, E. Hofer // *Journal of the Air Pollution Control Association*. - 1964. - Vol. 14. - N 4. Pp. 113-117

10. Christensen, J.M. Importance of the oxygen bond strength for catalytic activity in soot oxidation / J.M. Christensen, J-D. Grunwaldt, A.D. Jensen // *Applied Catalysis and Environmental*. - 2018. - Vol. 188. - pp. 235-244

11. Xue, T. Zeolite-Based Materials for the Catalytic Oxidation of VOCs: A Mini Review / T. Xue, L. Yang // *Front. Chem.* – 2021. – Vol. 9. – pp. 132-139
12. Burchell, T. Isolation of Single-Component Trimerization and Polymerization Chromium Catalysts: The Role of the Metal Oxidation State / T. Burchell // *Angewandte Chemie International Edition.* – 2008. – N 3. – pp. 275-279
13. Faruq, U. Mechanism for partial oxidation of cyclohexene by chromium (VI) oxide in acetic acid / U. Faruq, A. Zuru, E. Odeunmi, S.M. Dangoggo // *Global Journal of the Pure and Applied Sciences.* – 2017. – Vol. 17. – N 1. – pp. 117-121
14. Mei-Jian, W. Hydrothermal Fabrication and Catalytic Performance of Chromium Oxide for Low-concentration NO Oxidation at Ambient Temperature / W. Mei-Jian, G-Y. Zhen, Y. Jing, Z-K. Feng // *Journal of Inorganic Materials.* – 2016. – Vol. 31. – N 11. – pp. 1191-1197
15. Katre, S.D. Applications of Chromium(VI) Complexes as Oxidants in Organic Synthesis: A Brief Review / S.D. Katre // *Der Pharma Chemica.* – 2018. – Vol. 10. – N 2. – pp. 411-423
16. Bahranowski, K. LDH-derived catalysts for oxidation of volatile organic complete compounds / K. Bahranowski, E. Bielaixiska, R. Janik, T. Machej // *Clay Minerals.* – 1999. – Vol. 34. – Pp. 67-77
17. Pat. 5635438. US. 1994. Chromium catalyst and catalytic oxidation process / Cowfer J.A., Young J.H. /
18. Pat. 63493B1. BG. 1994. Chromium catalyst and catalytic oxidation process / Cowfer J.A., Young J.H. /
19. Muzart, J. Chromium-catalyzed oxidations in organic synthesis / J. Muzart // *Chem. Rev.* - 1992. - Vol. 92. - N 1. - Pp. 113-140
20. Alexzman, Z.A. Chromium oxide silica catalyst: Synthesis and characterization / Z.A. Alexzman, N.H. Anuar, N. Slamun, S.N. Yusoff // *Materials Today. Proceedings.* - 2022. - Vol. 57. - N 3. - Pp. 1301-1305
21. Dey, S. Supported and un-supported zinc and chromium oxide catalysts for lower temperature CO oxidation: A review / S. Dey, V. Praveen Kumar // *Environmental Challenges.* - 2021. - Vol. 3. - Pp. 100061-100064
22. Chagas, P. Use of an Environmental Pollutant From Hexavalent Chromium Removal as a Green Catalyst in The Fenton Process / P. Chagas, A. Caetano, A. Tireli, P. Cesar // *Scientific Reports.* - 2019. - Vol. 9. - Pp. 2379-2384
23. Yue, H. Synthesis, characterization of Cr-HMS and the application in catalytic oxidation / H. Yue, W. Hua, Y. Tang, Z. Gao // *Chemical Journal of Chinese.* - 2000. - Vol. 21. - N 7. - Pp. 1101-1104
24. Kim, D.C. Application of spinel-type cobalt chromite as a novel catalyst for combustion of chlorinated organic pollutants / D.C. Kim, C.S. Ihm // *Environ. Sci. Technol.* - 2001. - Vol. 35. - N 1. - Pp. 222-226
25. Zhang, B. Atomically dispersed chromium coordinated with hydroxyl clusters enabling efficient hydrogen oxidation on ruthenium / B. Zhang, z. Baohua, Z. Guoqiang, J. Wang // *Nat. Commun.* - 2022. - Vol. 13. - Pp. 5894-5899
26. Bumaidad, A. Non-noble, efficient catalyst of unsupported α -Cr₂O₃ nanoparticles for low temperature CO oxidation / A. Bu,aidad, Sh. Al-Ghareeb, M. Madkour, F. Sagheer // *Scientific Reports.* - 2017. - Vol. 7. - Pp. 3298-3302
27. Mardwita, M. Effects of Cobalt and Chromium Loadings to The Catalytic Activities

- of Supported Metal Catalysts in Methane Oxidation / M. Mardwita, E.S. Yusmartini, N. Wisudawati // *Bull. Chem. React. Eng. Catal.* - 2020. - Vol. 15. - N 1. - Pp. 17-23
28. Baker, L.M. Oxidation of olefins by supported chromium oxide / L.M. Baker, W.L. Carrick // *J. Org. Chem.* 1968. - Vol. 33. - N 2. - Pp. 616-618
29. Abdel-Rahman, L. Catalytic Potential of Mononuclear Cr(III)-Imine Complexes for Selective Oxidation of Benzyl Alcohol by Aqueous H₂O₂ / L. Abdel-Rahman, M. Shaker, A. Abu-Dief, A.H. Abdel-Magwoud // *Journal of Transition Metal Complexes.* - 2019. - N 2. - Pp. 236077-236091
30. Oudghiri-Hassani, H. Synthesis, Characterization and Application of Chromium Molybdate for Oxidation of Methylene Blue Dye / H. Oudghiri-Hassani // *Journal of Materials and Environmental Sciences.* - 2018. - Vol. 9. - N 3. - Pp. 1051-1057
31. Pan, D. Facile synthesis of highly ordered mesoporous chromium–alumina catalysts with improved catalytic activity and stability / D. Pan, M. Guo, M. He, S. Chen // *Journal of Materials Research.* - 2014. - Vol. 29. - N 6. - Pp. 811-819
32. Asma, A. Low-Temperature Catalytic CO Oxidation Over Non-Noble, Efficient Chromia in Reduced Graphene Oxide and Graphene Oxide Nanocomposites / A. Asma, M. Madkour, F. Sangheer // *Catalysts.* - 2020. - Vol. 10. - N 1. - Pp. 105-114
33. Prasad, R. Applications and Preparation Methods of Copper Chromite Catalysts: A Review / R. Prasad, P. Singh // *Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis.* - 2011. - Vol. 6. - N 2. - Pp. 63-113
34. Zhao, Ch. Chromium-doped transition metal oxyhydroxide catalysts for electrochemical water oxidation / Ch. Zhao // *Master Thesis.* - 2020. - UNSW Faculty. - 128 p.
35. Inami, S.H. Oxidation of ammonia catalyzed by mixed oxides of copper and chromium / S.H. Inami // *Stanford Research Institute.* - California. - 1969. - 16 p.
36. Peng, H. Direct advanced oxidation process for chromium (III) with sulfate free radicals / H. Peng, J. Guo, L. Zuohuz, T. Changyuan // *SN Applied Sciences.* - 2019. - Vol. 1. - N 14. - Pp. 2126-2134

REFERENCES

1. Betsy, K. Selective Oxidation of Cyclohexane to Cyclohexanone Using Chromium Oxide Supported Mesoporous MCM-41 Nanospheres: Probing the Nature of Catalytically Active Chromium Sites / K. Betsy, Ch. Nayak, A. Lazar, A. Dibyendu // *ChemCatChem.* - 2018. - Vol. 10. - N 15. - Pp. 3291-3298
2. Figueiredo, H. Oxidation of cyclohexanol and cyclohexene with triazenido complexes of chromium immobilized in biosorption FAU supports / H. Figueiredo, I. Kuzniarska-Biemacka, B. Silva, A.M. Fonceka // *Chemical Engineering Journal.* - 2014. - Vol. 247. - pp. 134-141
3. Muradova, P.A. Synthesis and Investigation of the Activity of Cu-Cr-Co/Al₂O₃/Al Catalysts in the Microwave Radiation-Stimulated Reaction Joint Deep Oxidation of Hydrocarbons and Carbon Monoxide / P.A. Muradova, Y.N. Litvishkov // *Modern Research in Catalysis.* - 2016. - Vol. 15. - N 1. - Pp. 336-341
4. Dehmani, Y. Total Oxidation of Isopropanol in the Liquid Phase, under Atmospheric Pressure and Low Temperature, on Transition Metal Oxides Catalysts Cr₂O₃ and Fe₂O₃ / Y. Dehmani, S. Abouarnadasse // *Journal of Chemistry.* - 2020. - N 2. - Pp. 31-45
5. Faruq, U.Z. Kinetic Studies of Catalytic Oxidation of Cyclohexene Using Chromium

VI Oxide in Acetic Acid Medium / U.Z. Faruq, A.A. Zuru, E.O. Odebunmi, S.M. Dangoggo // Nigerian Journal of Basic and Applied Sciences. - 2010. - Vol. 18. - N 1. - Pp. 141-146

6.Gholami, J. Direct Oxidation of Benzene to Phenol in Liquid Phase over Nanoporous Silica of Chromium-LUS-1 / J. Gholami, A. Badii, A. Abbasi, M. Manteghian // Iranica Journal of Energy and Environment. - 2013. - Vol. 4. - N 1. - pp. 24-27

7.Subrahmanyam, Ch. Partial oxidation of toluene by O₂ over mesoporous Cr–AlPO / Ch. Subrahmayam, B. Louis, F. Rainone, B. Viswanathan // Catalysis Communications. - 2002. - N 3. - pp. 45-50

8.Mobini, S. Synthesis and characterization of nanocrystalline copper–chromium catalyst and its application in the oxidation of carbon monoxide / S. Mobini, F. Meshkani, M. Rezaei // Process Safety and Environmental Protection. - 2017. - Vol. 107. - pp. 181-189

9.Feenan, J. Chromium Catalysts for Oxidizing Automotive Exhaust / J. Feenan, R.B. Anderson, H.W Swan, E. Hofer // Journal of the Air Pollution Control Association. - 1964. - Vol. 14. - N 4. Pp. 113-117

10.Christensen, J.M. Importance of the oxygen bond strength for catalytic activity in soot oxidation / J.M. Christensen, J-D. Grunwaldt, A.D. Jensen // Applied Catalysis and Environmental. - 2018. - Vol. 188. - pp. 235-244

11.Xue, T. Zeolite-Based Materials for the Catalytic Oxidation of VOCs: A Mini Review / T. Xue, L. Yang // Front. Chem. - 2021. - Vol. 9. - pp. 132-139

12.Burchell, T. Isolation of Single-Component Trimerization and Polymerization Chromium Catalysts: The Role of the Metal Oxidation State / T. Burchell // Angewandte Chemie International Edition. - 2008. - N 3. - pp. 275-279

13.Faruq, U. Mechanism for partial oxidation of cyclohexene by chromium (VI) oxide in acetic acid / U. Faruq, A. Zuru, E. Odebunmi, S.M. Dangoggo // Global Journal of the Pure and Applied Sciences. - 2017. - Vol. 17. - N 1. - pp. 117-121

14.Mei-Jian, W. Hydrothermal Fabrication and Catalytic Performance of Chromium Oxide for Low-concentration NO Oxidation at Ambient Temperature / W. Mei-Jian, G-Y. Zhen, Y. Jing, Z-K. Feng // Journal of Inorganic Materials. - 2016. - Vol. 31. - N 11. - pp. 1191-1197

15.Katre, S.D. Applications of Chromium(VI) Complexes as Oxidants in Organic Synthesis: A Brief Review / S.D. Katre // Der Pharma Chemica. - 2018. - Vol. 10. - N 2. - pp. 411-423

16.Bahranowski, K. LDH-derived catalysts for oxidation of volatile organic complete compounds / K. Bahranowski, E. Bielaixiska, R. Janik, T. Machej // Clay Minerals. - 1999. - Vol. 34. - Pp. 67-77

17.Pat. 5635438. US. 1994. Chromium catalyst and catalytic oxidation process / Cowfer J.A., Young J.H. /

18.Pat. 63493B1. BG. 1994. Chromium catalyst and catalytic oxidation process / Cowfer J.A., Young J.H. /

19.Muzart, J. Chromium-catalyzed oxidations in organic synthesis / J. Muzart // Chem. Rev. - 1992. - Vol. 92. - N 1. - Pp. 113-140

20.Alexzman, Z.A. Chromium oxide silica catalyst: Synthesis and characterization / Z.A. Alexzman, N.H. Annuar, N. Slamun, S.N. Yusoff // Materials Today. Proceedings. - 2022. - Vol. 57. - N 3. - Pp. 1301-1305

21.Dey, S. Supported and un-supported zinc and chromium oxide catalysts for lower temperature CO oxidation: A review / S. Dey, V. Praveen Kumar // Environmental Challenges. -

2021. - Vol. 3. - Pp. 100061-100064

22.Chagas, P. Use of an Environmental Pollutant From Hexavalent Chromium Removal as a Green Catalyst in The Fenton Process / P. Chagas, A. Caetano, A. Tireli, P. Cesar // Scientific Reports. - 2019. - Vol. 9. - Pp. 2379-2384

23.Yue, H. Synthesis, characterization of Cr-HMS and the application in catalytic oxidation / H. Yue, W. Hua, Y. Tang, Z. Gao // Chemical Journal of Chinese. - 2000. - Vol. 21. - N 7. - Pp. 1101-1104

24.Kim, D.C. Application of spinel-type cobalt chromite as a novel catalyst for combustion of chlorinated organic pollutants / D.C. Kim, C.S. Ihm // Environ. Sci. Technol. - 2001. - Vol. 35. - N 1. - Pp. 222-226

25.Zhang, B. Atomically dispersed chromium coordinated with hydroxyl clusters enabling efficient hydrogen oxidation on ruthenium / B. Zhang, z. Baohua, Z. Guoqiang, J. Wang // Nat. Commun. - 2022. - Vol. 13. - Pp. 5894-5899

26.Bumaidad, A. Non-noble, efficient catalyst of unsupported α -Cr₂O₃ nanoparticles for low temperature CO oxidation / A. Bu,aidad, Sh. Al-Ghareeb, M. Madkour, F. Sagheer // Scientific Reports. - 2017. - Vol. 7. - Pp. 3298-3302

27.Mardwita, M. Effects of Cobalt and Chromium Loadings to The Catalytic Activities of Supported Metal Catalysts in Methane Oxidation / M. Mardwita, E.S. Yusmartini, N. Wisudawati // Bull. Chem. React. Eng. Catal. - 2020. - Vol. 15. - N 1. - Pp. 17-23

28.Baker, L.M. Oxidation of olefins by supported chromium oxide / L.M. Baker, W.L. Carrick // J. Org. Chem. 1968. - Vol. 33. - N 2. - Pp. 616-618

29.Abdel-Rahman, L. Catalytic Potential of Mononuclear Cr(III)-Imine Complexes for Selective Oxidation of Benzyl Alcohol by Aqueous H₂O₂ / L. Abdel-Rahman, M. Shaker, A. Abu-Dief, A.H. Abdel-Magwoud // Journal of Transition Metal Complexes. - 2019. - N 2. - Pp. 236077-236091

30.Oudghiri-Hassani, H. Synthesis, Characterization and Application of Chromium Molybdate for Oxidation of Methylene Blue Dye / H. Oudghiri-Hassani // Journal of Materials and Environmental Sciences. - 2018. - Vol. 9. - N 3. - Pp. 1051-1057

31.Pan, D. Facile synthesis of highly ordered mesoporous chromium–alumina catalysts with improved catalytic activity and stability / D. Pan, M. Guo, M. He, S. Chen// Journal of Materials Research. - 2014. - Vol. 29. - N 6. - Pp. 811-819

32.Asma, A. Low-Temperature Catalytic CO Oxidation Over Non-Noble, Efficient Chromia in Reduced Graphene Oxide and Graphene Oxide Nanocomposites / A. Asma, M. Madkour, F. Sangheer // Catalysts. - 2020. - Vol. 10. - N 1. - Pp. 105-114

33.Prasad, R. Applications and Preparation Methods of Copper Chromite Catalysts: A Review / R. Prasad, P. Singh // Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis. - 2011. - Vol. 6. - N 2. - Pp. 63-113

34.Zhao, Ch. Chromium-doped transition metal oxyhydroxide catalysts for electrochemical water oxidation / Ch. Zhao // Master Thesis. - 2020. - UNSW Faculty. - 128 p.

35.Inami, S.H. Oxidation of ammonia catalyzed by mixed oxides of copper and chromium / S.H. Inami // Stanford Research Institute. - California. - 1969. - 16 p.

36.Peng, H. Direct advanced oxidation process for chromium (III) with sulfate free radicals / H. Peng, J. Guo, L. Zuohuz, T. Changyuan // SN Applied Sciences. - 2019. - Vol. 1. - N 14. - Pp. 2126-2134