



КАТАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ БЕНЗОЛЬНОГО РЯДА

Лейла Вугар кызы Сулейманова^{1*} , Турана Аллаз кызы Бабаева² ,

Эльмир Магсад оглы Бабаев^{1,3} , Ариф Джаваншир оглы Эфенди³

¹Азербайджанский Государственный Университет Нефти И Промышленности

²Бакинский Государственный Университет

³Институт катализа и неорганической химии имени академика М.Нагиева

*leylslmnva14@gmail.com

В настоящее время применение катализаторов, которые являются одним из самых эффективных методов нейтрализации отходящих газов, считается наиболее перспективным методом снижения выбросов. Учитывая серьезные проблемы, вызванные бензолом и его производными, были разработаны различные методы дезактивации. Каталитическое окисление является одним из перспективных методов и эффективных технологий разложения бензола и его производных. Этот метод позволяет окислять их до широко используемых веществ и CO_x. Для этой цели были синтезированы катализаторы Mo+VPO /SiO₂, VMoO/SiO₂, Sb+VPO /Al₂O₃, VMoO/Al₂O₃ и в их присутствии получена конверсия 78-91%. Определена зависимость каталитической активности синтезированных катализаторов от температуры, времени контакта и мольного соотношения компонентов катализатора.

Ключевые слова: толуол, этилбензол, ксилол, бензол, каталитическое окисление, катализатор, ванадия, фосфор

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, химическая промышленность занимает особое место как один из основных видов экономической деятельности нашего века и, скорее всего, сохранит свои позиции на века вперед. Тем не менее, эту отрасль обвиняют в производстве экологически вредных веществ и загрязнении природы, к которым относятся истощение и разрушение озонового слоя, кислотные дожди и различные виды загрязнений. Именно поэтому основное внимание уделяется устранению и сокращению вредных веществ, которые вызывают перечисленное и могут представлять угрозу для природы в целом. БТЭК (бензол, толуол, этилбензол и ксилолы) - загрязнители относятся к числу опасных для природы веществ из-за их канцерогенности, токсичности, устойчивости в природе, кроме этого они создают риск долгосрочного загрязнения большинства природных источников особенно почвы и грунтовых вод, а также являются легковоспламеняющимися и представляют опасность образования взрывоопасных смесей. Кроме того, считается, что эти вещества вызывают выбросы летучих органических соединений и, хотя БТЭК широко используются в повседневных продуктах и производстве, эти соединения могут создавать серьезные риски для организмов, особенно для здоровья человека, а также для окружающей среды из-за их способности загрязнять грунтовые воды, а также нейротоксичности и карциногенности. [1, 2]. Бензол, классифицированный как известный канцероген для человека, представляет риск развития рака даже при низких уровнях воздействия [3, 4]. Для восстановления загрязнения БТЭК и предотвращения вредного воздействия этих загрязнителей необходимы эффективные и долговременные решения, которые необходимы для здоровья человека и целостности окружающей среды. Для смягчения воздействия на окружающую среду загрязнения БТЭК в результате утечек нефти крайне важно применять эффективные стратегии локализации и восстановления [5, 6]. Эти меры включают в себя сокращение использования автомобилей, работающих на бензине, техническое обслуживание и мониторинг транспортных средств и промышленных объектов, максимальное использование растительности для биологического контроля, контроль за использованием химических материалов, вызывающих загрязнение, и принятие мер по их нейтрализации. Каталитическая конверсия представляет собой замечательный подход к решению этой важной экологической проблемы с помощью



различных методов, которые обеспечивают эффективную, значительную и экологичную рекультивацию соединений БТЭК. Для достижения этих и других целей необходимо глубокое понимание механизма и методологии удаления БТЭК и обеспечение оптимальной работы каталитических систем. Традиционные методы деградации БТЭК, такие как извлечение паров из почвы, системы контроля загрязнения воздуха, насосно-очистные системы, имеют ряд ограничений с точки зрения экологической устойчивости, циркулярной экономики и эффективности. В последнее время каталитическая конверсия ЛОС используется для рекультивации БТЭК в качестве перспективной альтернативы благодаря своим преимуществам, которые делают ее уникальной и отличной от традиционных методов. Катализ создает прочную среду для преобразования опасных загрязнителей БТЭК в менее вредные соединения или даже инертные продукты.

Все это позволяет снизить вредное воздействие данных веществ и уменьшить риск для организма человека [7]. В сырой нефти они являются соединениями природного происхождения. С этими соединениями можно столкнуться и в других природных сооружениях, например, в газовых выбросах, вызванных лесными пожарами и извержениями вулканов. Бензол можно обнаружить в морской воде в районах, где ведется добыча природного газа и нефти [8].

Эти летучие органические соединения (ЛОС) образуются как из антропогенных, так и из природных источников, а также выхлопных газов самолетов причем значительный вклад вносят нефтяная промышленность, автомобильные выхлопы, промышленные процессы.

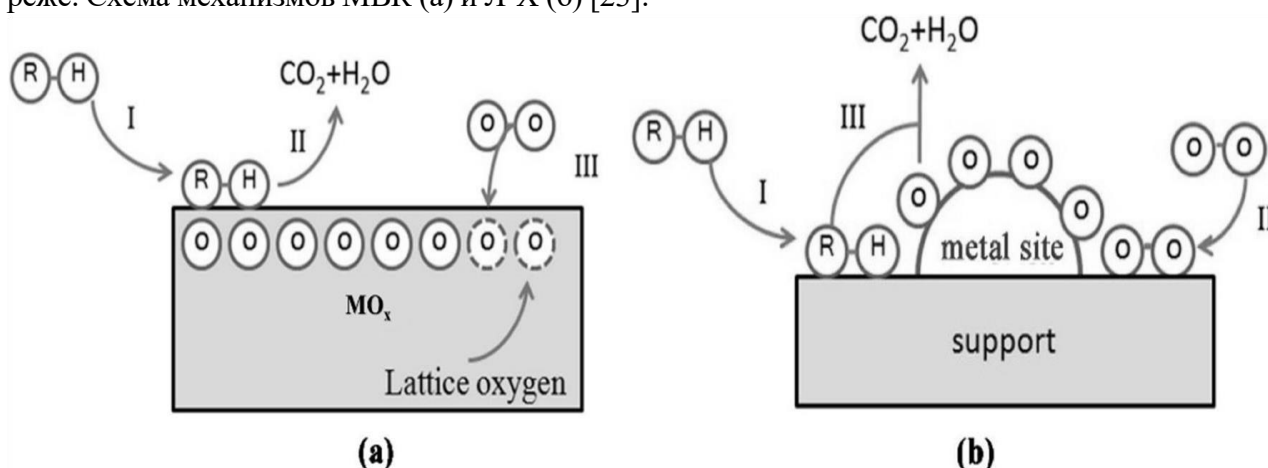
Эти химические вещества образуются и используются при переработке нефти и угля, а также при производстве промежуточных химических продуктов и различных потребительских товаров, включая краски, лаки, разбавители, резиновые изделия, клеи, чернила, косметику и фармацевтические препараты [1, 7, 10, 11]. Большинство выбросов БТЭК попадает непосредственно в атмосферу. Эти соединения также могут загрязнять воду в результате промышленных сбросов и загрязнения воздуха, но их присутствие в воде в основном связано с разливами бензина и нефтепродуктов или близостью к месторождениям нефти и природного газа. При попадании в питьевую воду соединения БТЭК могут быть эффективно удалены с помощью фильтрации активированным углем [11, 12]. Они демонстрируют пространственные и временные колебания, зависящие от таких факторов, как расстояние от источников, температура и погодные условия.

Различные исследовательские группы использовали оксиды переходных металлов, драгоценные металлы и их комбинации для удаления летучих органических соединений. Процесс каталитического окисления ЛОС включает в себя разрыв молекулярных связей или перестройку молекул, что приводит к образованию промежуточных и конечных продуктов. Физические методы удаления ЛОС, такие как адсорбция и конденсация, эффективны лишь временно из-за своей ограниченной способности, в то время как химические реакции предлагают постоянное решение для удаления ЛОС. Каталитическое окисление считается более жизнеспособным и эффективным способом удаления летучих органических соединений как с точки зрения стоимости, так и эффективности. Для этой цели были изучены как благородные, так и переходные металлы. В многочисленных исследованиях изучалось окисление ЛОС с помощью оксидов металлов (MO_x , где $M = 3d$ переходные металлы). Кроме того, включение благородных металлов в оксиды переходных металлов повышает каталитическую активность для разложения ЛОС за счет улучшения переноса электронов. Эффективность разложения, однако, зависит от таких факторов, как состав и соотношение благородных и переходных металлов, методов приготовления, тип опор, кислотности, влажности и физических свойств материалов [13-17].

Как и в случае с большинством органических веществ, при окислении БТЭК образуются CO_2 и H_2O . Тем не менее, проблемы с полной конверсией при низких температурах все еще актуальны. Существующие методы, такие как каталитическое восстановление аммиаком, требуют более высоких температур, но при этом демонстрируют более низкую эффективность. Чтобы избавиться от этих сложностей, необходимо разработать катализаторы, которые можно было бы использовать при более низких температурах и с большей эффективностью [18].

Эффективность каталитического окисления толуола зависит от множества факторов, включая условия реакции и характеристики катализаторов. Ключевое влияние на активность катализатора оказывают морфология и структура, методы приготовления, кристалличность, восстановимость поверхности, площадь поверхности, активные участки и стабильность. Сочетание этих факторов необходимо для создания высокоактивного катализатора, способного эффективно разлагать толуол [18-21].

Для окисления толуола используются различные катализаторы, каждый из которых обладает уникальной структурой и составом, что может влиять на образование промежуточных видов и, как следствие, влиять на механизмы реакции [22]. В целом, предложенные механизмы реакции каталитической деградации толуола делятся на две основные категории: модель Марс-ван Кревелена (МВК) и модель Ленгмюра-Хиншельвуда (Л-Х), хотя последняя встречается реже. Схема механизмов МВК (а) и Л-Х (б) [23].



В модели Ленгмюра-Хиншельвуда (Л-Н) реакция разворачивается на поверхности катализатора. Сначала БТЭК и кислород прилипают к поверхности катализатора, а затем происходят последующие окислительно-восстановительные процессы. В этом механизме решающее значение имеет как адсорбция БТЭК, так и присутствие кислорода на поверхности, поскольку реакция протекает между этими двумя типами адсорбированных молекул. Поэтому составы различных катализаторов могут приводить к различным механизмам и кинетике реакции.

Целью данного исследования является изучение передовых катализаторов и методов, необходимых для каталитической конверсии загрязняющих веществ БТЭК. Изучение подходящих условий, катализаторов и факторов, влияющих на долговечность и селективность, помогает получить полное представление о механизме процесса. Анализ всех этих данных сыграет важную роль в разработке более эффективных, устойчивых и экологически безопасных методов очистки БТЭК.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для нейтрализации компонентов фракции ВТЕК использовалась каталитическая лабораторная установка проточного типа, представленная на рис. 1. Экспериментальная установка, используемая в процессе нейтрализации, условно разделена на три части:

1) подготовительная часть; 2) каталитическая часть; 3) аналитическая часть.

В первой части производится очистка и подача сжатого воздуха (СВ)–1, молекулярного кислорода (О₂)–2 и азота (N₂) –3, которые будут использоваться в процессе. Сжатый воздух используется в качестве окислителя и газа-носителя, азот- в качестве разбавителя и газа-носителя, а молекулярный кислород - и в качестве окислителя, и в качестве газа-носителя.

Необходимый поток газа подается из баллонов (1, 2, 3) и регулируется с помощью двухступенчатого регулятора (4). Точная регулировка потоков газа осуществляется с помощью расходомера (5) и трехходовых регулируемых клапанов (6). Подача ВТЕК осуществлялась через

микрожидкостной дозатор (7) с электронным управлением, а для прохождения реакционной смеси из смесителя (8) в реакционную камеру использовался сжатый воздух.

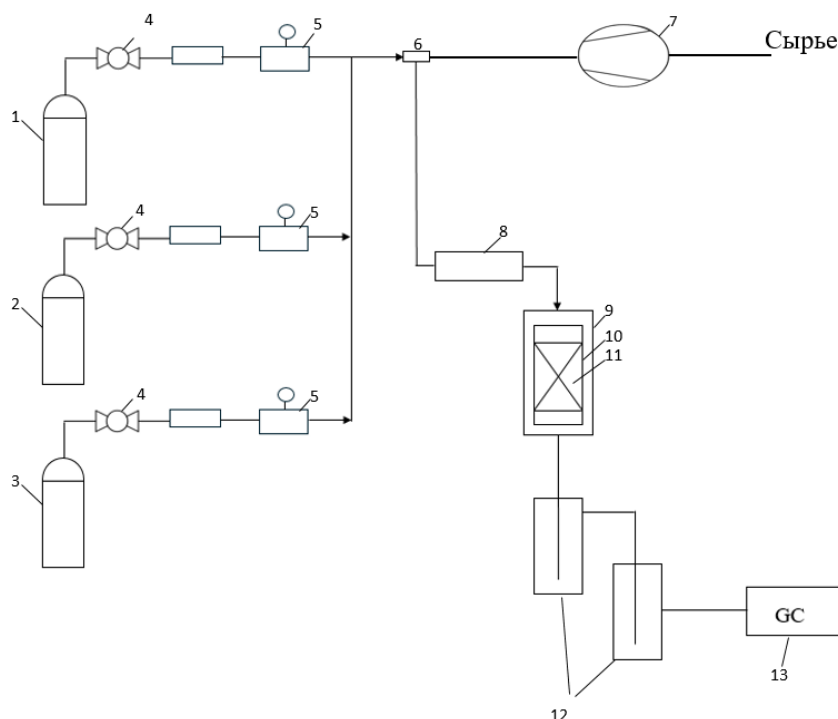


Рис. 1. Эскизная модель собранной пилотной установки для обезвреживания Компонентов фракции ВТЕК:

1. Воздушный баллон, 2. Кислородный баллон, 3. Азотный баллон, 4. Двухкамерный редуктор, 5. Расходомер, 6. Трехвыводной кран 7. Микро-дозатор, 8. Смеситель-испаритель, 9. Термостат, 10. Реактор, 11. Катализатор, 12. Ловушки, 13. Газовый хроматограф

Температура испарителя (8), зоны реакции и реакционной среды измерялись с помощью термопары и осуществлялись с помощью электронного регулятора. Вместе со сжатым воздухом пары толуола поступали на слой катализатора из одного рукава реактора (10). Температура слоя катализатора измерялась с помощью термопары, помещенной в середину реактора, и фиксировалась на потенциометре. Первичное сырье из испарителя поступает в реактор со слоем катализатора (11) внутри термостатического шкафа (9). Ловушки (12) использовались для охлаждения и сбора продуктов реакции.

Аналитическая секция состояла из хроматографа Agilent 7820A (13) с теплоносителем и ионизированным детектором, подключенным непосредственно к каталитическому переходу. Смесь продуктов реакции в газовой фазе растворяются в растворителе и направляются в хроматограф.

В основном изучена активность полученных каталитических систем, используя проточная экспериментальная установка. В качестве реактора (10) использовали цилиндрическое кварцевое стекло ($d=6-10$ мм). В реактор засыпается 1.0 г катализатора размером 0.3-0.5 мм.

Первоначально был синтезирован основной ванадий-фосфорный катализатор. Поэтому в трехгорлую колбу, оснащенную мешалкой и рефлюкс-конденсатором, добавляют 250 мл воды и около 100 г 86%-ной карбофосфорной кислоты. При постоянном перемешивании в колбу добавляют 20 г кислоты. В горячий раствор небольшими порциями всыпаем 30 г V_2O_5 и продолжаем перемешивать до прекращения выделения CO_2 . После этого добавляем еще 100 г воды и 10 г щавелевой кислоты. Затем происходит осаждение на поверхности SiO_2 и Al_2O_3 , которым предварительно придали вытянутую или сферическую форму, так, чтобы объем и поверхность носителей были полностью покрыты раствором. Следует отметить, что используемая нами поверхность SiO_2 , Al_2O_3 составляет 70-200 cm^2/g . Затем



активную массу, нанесенную на поверхность носителя, выдерживают в течение 3-4 часов. После этого ее сушат в сушильном шкафу при температуре 110-150°C в течение 1-2 часов. Поскольку количество воды в нем постепенно уменьшается, цвет катализатора меняется с зелено-голубого на серый и остается в смешанной части окраски. Полученную каталитическую систему подвергают термообработке при температуре 250-300°C в течение 4-5 часов, затем при температуре 400-450°C в течение 3-4 часов. После охлаждения катализатор дробят, просеивают и разделяют на кусочки необходимого размера[24].

На основании кристаллической структуры синтезированных каталитических систем, определенной на аппарате рентгенофазового анализа D2 фирмы Bruker (Германия), предложены фазовый и количественный анализ, а также характеристики фаз (параметры сепарации, размер кристаллов, напряжение решетки). Нами был определен фазовый состав методом рентгенофазового анализа с CuK_2 . В рентгенофазовом спектре, полученном при $\lambda_{\text{Cu}} = 1,542 \text{ \AA}$, видно, что в основном присутствуют фазы, принадлежащие к $\text{V}(\text{PO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{V}(\text{H}_2\text{PO}_3)$, $\text{V}(\text{PO}_4)$.

В новом синтезированном образце катализатора были определены удельные параметры $\text{V}(\text{PO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в соотношении $\text{V}:\text{P}=1:1$. В активированном образце этого катализатора (вновь синтезированный образец при высокой температуре 773 К и в условиях реакционной среды) происходит очень мало изменений, частично образуется новая фаза. В частично дезактивированном образце данного катализатора существенных изменений не наблюдалось.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Окисление ВТЕК (нашем случае бензол, толуол и ксилол) изучалось в реакторе проточного типа с кипящим слоем при атмосферном давлении и температуре 350-500°C. Объемное соотношение ВТЕК и кислорода составляло 1:10-1:20. Каталитические реакции проводились при космических скоростях 2500-10000 ч^{-1} . Анализ малеинового ангидрида, и другие продукты реакции, проводили на газовом хроматографе Agilent GC 7820A.

Процессы окисления ароматических, алкилароматических углеводородов протекают в основном в присутствии V, Mo, Sb, P и других оксидов. Первоначально было предложено получить ряд оксидных каталитических систем и было выделено 16 более активных и селективных катализаторов, активность которых определяли по процессу окисления БТК. Было изучено, влияние времени контакта и температуры на конверсию БТК в присутствии выбранных активных катализаторов (рис. 2, 3).

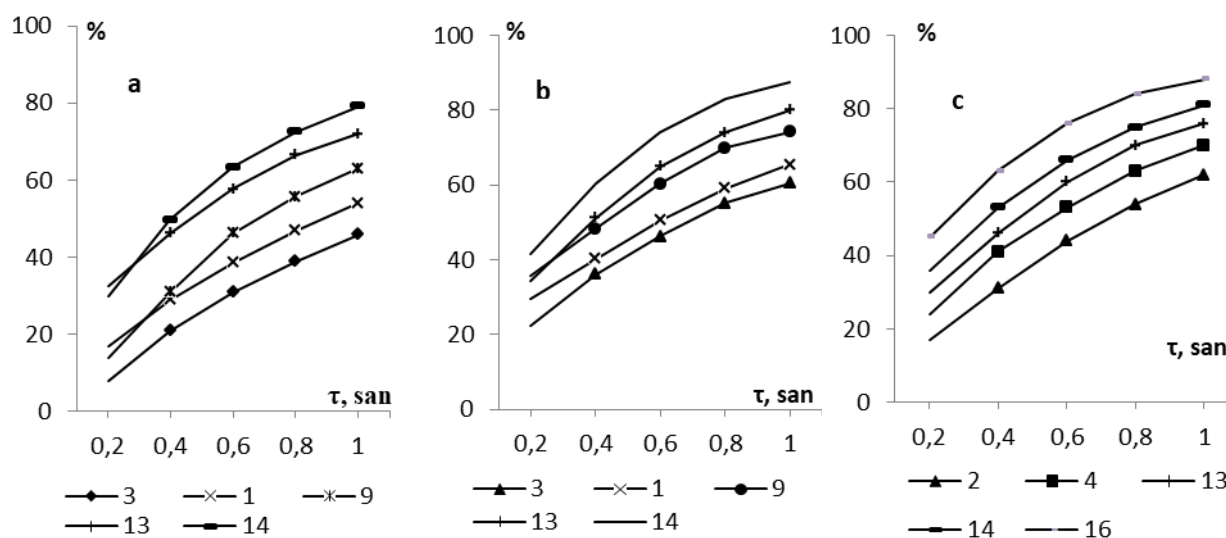


Рис. 2. а) толуол, б) бензол, с) ксилол Влияние времени контакта на активность катализаторов в реакции окисления.

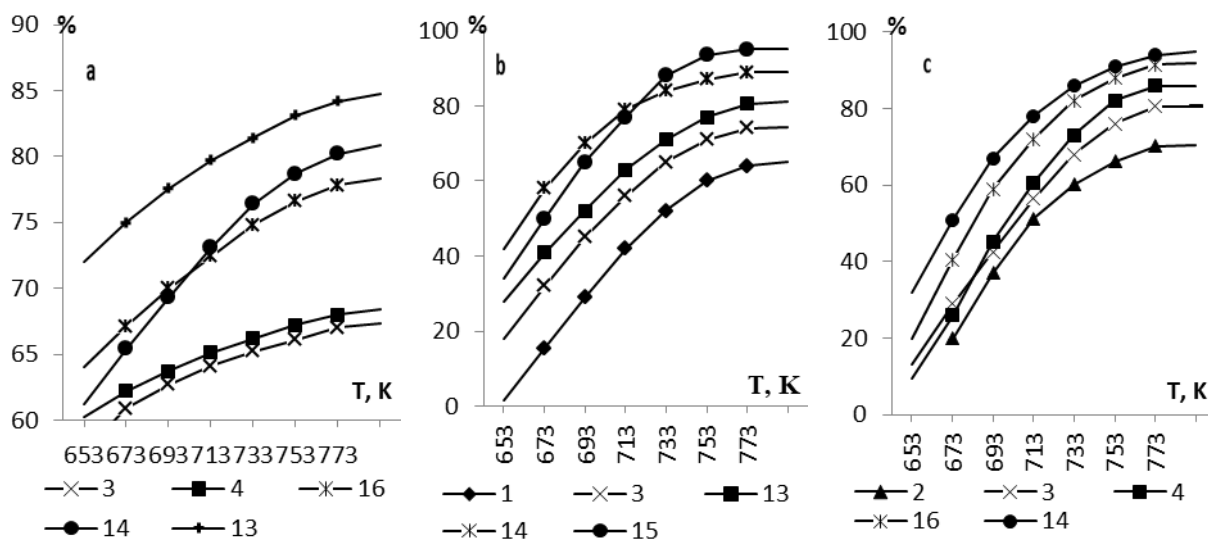


Рис. 3. а) толуол, б) бензол, в) ксилол Влияние температуры на активность катализаторов в реакции окисления.

VPO/ Al_2O_3 , 2. VPO/ TiO_2 , 3.VPO/ SiO_2 , 4.VMoO, 9. VSbO, 13. VPO+Sb / SiO_2 , 14. V-P-O/ SiO_2 +Mo 15.VSbO/ SiO_2 , 16. VMoO/ SiO_2

Установлено, что системы VPO, модифицированные молибденом и сурьмой и нанесенные на кремний показывают более высокую конверсию по БТК (>80%). Таким образом, с ростом температуры увеличивается и конверсия БТК и это продолжается примерно до 430 °С. За оптимальное время контакта принято 1 секунда. Далее было определено влияние соотношения V:Mo и V:Sb на конверсию бензола и толуола. Полученные результаты указаны на рисунке 4. Как видно из рисунков, при соотношении V:Mo равном 1:3 конверсия бензола и выход ангидрида доходят до своего максимального значения. А для реакции превращения толуола, оптимальным соотношением V:Sb является 1:2.

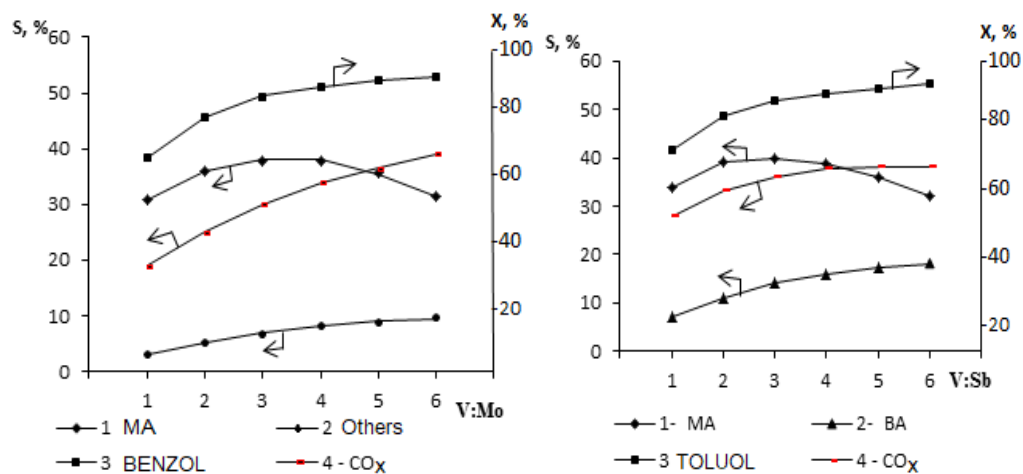


Рис. 4. Влияние соотношения V:Mo и V:Sb на процесс превращения толуола и бензола



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезированы каталитические системы, не содержащие оксиды благородных металлов, и показана возможность полного обезвреживания фракции БТК в выхлопных газах. Для окисления фракции БТК выбраны и синтезированы оксидные каталитические системы, а также определена их активность на носителях SiO_2 и Al_2O_3 . Каталитические системы V-P-O/ SiO_2 +Mo, V-Mo-O/ SiO_2 , V-P-O/ Al_2O_3 +Sb, V-Mo-O/ Al_2O_3 проявляют высокую активность и селективность в процессах газофазного окисления фракции БТК с увеличением конверсии до 75-90%. Показано, что модифицирование этих каталитических систем оксидами Mo, Sb не приводит к образованию новых активных фаз, но позволяет увеличить активность кислорода на их поверхности. Установлено, что при соотношении V:Mo и V:Sb соответственно равном 1:3 и 1:2 является оптимальным для конверсии БТК. Добавление Sb в катализатор приводит к увеличению его срока службы и долговечности.

ЛИТЕРАТУРЕ

1. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) / Toxicological profile for Toluene, – 2000.
2. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) / Toxicological profile for BTEX, – 2007.
3. Hoque, R.R. Spatial and temporal variation of BTEX in the urban atmosphere of Delhi, India / R.R. Hoque, P.S. Khillare, T. Agarwal [et al.] // "Science of the Total Environment," – 2008, 392 (1), – p. 30-40.
4. Miller, L. Multi-season, multi-year concentrations and correlations amongst the BTEX group of VOCs in an urbanized industrial city / L.Miller, X.Xu, A.Grgicak-Mannion [et al.] // "Atmospheric Environment", – 2012, 61, – p. 305-315
5. Liu, Y. Source profiles of volatile organic compounds (VOCs) measured in China / Y.Liu, M.Shao, L.Fu [et al.] // Atmospheric Environment, – 2008, 25 (42), – p. 6247-6260.
6. Liu, Y. Distributions and conducted source apportionment of ambient volatile organic compounds in Beijing city, China / Y.Liu, M.Shao, J.Zhang [et al.] // "Journal of Environmental Science and Health", – 2005, 40 (10), – p. 1843-1860.
7. The National Toxicology Program (NTP). "Report on Carcinogens," Eleventh Edition, by the U.S. Department of Health and Human Services, – 2005.
8. The International Programme on Chemical Safety (IPCS). Several environmental health criteria documents on benzene, ethylbenzene, xylenes, and BTEX in drinking water, providing background information for the development of guidelines for drinking-water quality, – 1993.
9. International Programme on Chemical Safety (IPCS). Ethylbenzene. Environmental Health Criteria 194. World Health Organization, – 1996.
10. International Programme on Chemical Safety (IPCS). Xylenes. Environmental Health Criteria 190. World Health Organization, – 1997.
11. International Programme on Chemical Safety (IPCS). Benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes (BTEX) in drinking water: Background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality, – 2000.
12. Radic, N., Grbic, B., and Terlecki-Baricevic, A. Kinetics of deep oxidation of n-hexane and toluene over $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ catalysts // "Applied Catalysis B", – 2004, 3 (50), – p. 153-159
13. Efendi, A.C. Current state of catalytic oxidation of alkylaromatic chlorohydrocarbons and its development prospects / A.C. Efendi, E.M. Babayev, F.A. Yunisova [et al.] // Azərbaycan Kimya Jurnalı, – 2016, 2, – p. 6-20.
14. Huang, H., Xu, Y., Feng, Q., and Leung, D.Y.C. A review article on low-temperature catalytic oxidation of volatile organic compounds // "Catalysis Science & Technology," – 2015, 5, – p. 2649-2669.
15. Li, W.B., Wang, J.X., & Gong, H. Catalytic combustion of VOCs on non-noble metal catalysts // "Catalysis Today," – 2009, 148 (1), – p. 81-87
16. Liotta, L.F. Catalytic oxidation of volatile organic compounds on supported noble metals // "Applied Catalysis B," – 2010, 100 (3), – p. 403-412
17. Reed, C., Xi, Y., and Oyama, S.T. A kinetic study of acetone oxidation using ozone on a silica-supported manganese oxide catalyst // Journal of Catalysis, – 2005, 2 (235), – p. 378-392.
18. Murindababisha, D. A comprehensive review on recent advancements in the catalytic oxidation of toluene // Environmental Science and Pollution Research, – 2021.



19. Liu, K. Significant BTEX pollution in a rural area of the North China Plain during the winter season / K.Liu, C.Zhang, Y.Cheng [et al.] // Journal of Environmental Sciences, – 2015, 30, – p. 186-190.
20. Irada G. Melikova. Catalysts and kinetic regularities of oxidation processes of chlorotoluenes / G. Irada Melikova, J. Arif Efendi, F. Natavan Aykan [et al.] // Eurasian Journal of Chemistry, – 2023, 4 (28), – p. 130-140.
21. Debrecker, Stoyanova M, Gaigneaux. Thermal Spreading as an alternative for the wet impregnation // The Journal of Physical Chemistry, – 2010, 114 (43), – p. 18664-18674.
22. Elmir Babayev. Toluol və onun xlorlu törəmələrinin heterogen katalitik oksidləşməsi (monography), Bakı, M.: Elm, - 2024, - s. 172 (In Azerbaijani).
23. Guo, M. Manganese- based multi oxide derived from spent ternary lithium ions batteries as high efficient catalyst for VOCs oxidation / M. Guo, L. Liu, H. Zhang [et al.] // Journal of Hazardous Materials, – 2019, 380, – p. 120905.
24. Babayev, E.M. Selective gas phase oxidation of monochlorotoluenes over modified oxovanadium systems supported on Al₂O₃ and SiO₂ / E.M. Babayev, A.J. Efendi, F.M. Nasiri [et al.] // Journal of the Turkish Chemical Society Section A: Chemistry, - 2016, 3 (3), - p. 597-606.

BENZOL SERİYASI TULLANTILARIN ZƏRƏRSİZLƏŞDİRİLMƏSİ ÜÇÜN KATALİTİK HƏLL

**L.V. Süleymanova, T.Ə. Babayeva,
E.M. Babayev, A.C. Əfəndi**

Hazırda işlənmiş qazların zərərsizləşdirilməsinin ən effektiv üsullarından biri olan katalizatorların istifadəsi emissiyaların azaldılmasının ən perspektivli üsulu hesab olunur. Benzol və onun törəmələrinin yaratdığı ciddi problemlər nəzərə alınaraq müxtəlif zərərsizləşdirmə üsulları işlənib hazırlanmışdır. Katalitik oksidləşmə benzol və onun törəmələrinin parçalanması üçün effektiv texnologiyalardan biridir. Bu üsul onların geniş istifadə olunan maddələrə və CO_x-ə qədər oksidləşməsinə imkan verir. Bu məqsədlə Mo+VPO/SiO₂, VMoO/SiO₂, Sb+VPO/Al₂O₃, VMoO/Al₂O₃ katalizatorları sintez edilmiş və onların iştirakı ilə 78-91% benzol çirkləndiricilərinin çevrilməsi mümkün olmuşdur. Sintez edilmiş katalizatorların katalitik aktivliyinin temperatur, kontakt müddəti və katalizatorun komponentlərinin mol nisbətindən asılılığı müəyyən edilmişdir.

Açar sözlər: toluol, etilbenzol, ksilen, benzol, katalitik oksidləşmə, katalizator, vanadium, fosfor

CATALYTIC SOLUTION FOR THE NEUTRALIZATION OF BENZENE SERIES POLLUTANTS

**L.V. Suleymanova, T.A. Babayeva,
E.M. Babayev, A.J. Afandi**

Currently, the use of catalysts, which are one of the most effective methods of utilization for waste gases, is considered to be the most promising method of emission reduction. Considering the serious problems caused by benzene and its derivatives, various deactivation methods have been developed. Catalytic oxidation is one of the promising methods and effective technologies for the decomposition of benzene and its derivatives. This method can oxidize them to commonly used substances and CO_x. For this purpose, Mo+VPO /SiO₂, VMoO/SiO₂, Sb+VPO /Al₂O₃, VMoO/Al₂O₃ catalysts were synthesized and 78-91% conversion was obtained in their presence. The dependence of the catalytic activity of the synthesized catalysts on temperature, contact time, and molar ratio of the catalyst components was determined.

Keywords: toluene, ethylbenzene, xylene, benzene, catalytic oxidation, catalyst, vanadium, phosphorus