

УДК 544.576, 544.47

DOI: 10.15372/ChUR2024556

EDN: UHQJCK

Ультразвук в катализе

А. З. АЛИЕВА, У. А. КЕРИМОВА, С. Г. ЮНУСОВ, А. А. АЛИЕВА, С. М. АЛЕСКЕРОВА, Ф. Ф. ТАГИЕВ

*Институт нефтехимических процессов им. Ю. Г. Мамедалиева,
Баку, Азербайджан*

E-mail: aygundcs@yahoo.com

(Поступила 30.01.2023; после доработки 19.11.2023; принята к печати 22.12.2023)

Аннотация

Обобщены результаты работ по использованию ультразвука при синтезе и обработке катализаторов. Продемонстрировано, что ультразвуковым воздействием можно регулировать текстурные и структурные характеристики катализаторов путем изменения времени воздействия, мощности и амплитуды ультразвукового излучения. Отмечено, что оптимизация условий ультразвуковой обработки катализаторов обеспечивает улучшение их физико-химических свойств. Это позволяет достигать более высоких значений конверсии реагентов и селективности образования целевых продуктов в различных химических реакциях. Рассмотрены примеры применения ультразвука с точки зрения следования принципам “зеленой химии”. Показано, что использование ультразвука в органическом синтезе способствует улучшению показателей химического процесса, а также сокращению времени его проведения.

Ключевые слова: ультразвуковая обработка, ультразвуковая кавитация, ультразвук в катализе, ультразвуковой синтез катализатора, катализ

Прогресс промышленных технологий – залог успешного решения практических вопросов обеспечения человеческих потребностей. Это достигается применением инновационных и научных подходов. Продукты нефтехимического синтеза имеют широкий спектр использования, однако для увеличения объема их производства нужны новые способы. Один из путей реализации поставленных задач заключается в использовании физических методов в обработке и переработке веществ и материалов, позволяющих улучшить качественные и количественные параметры технологического режима промышленных процессов.

Существует множество способов обработки катализаторов для повышения их эффективности: ультрафиолетовое [1] и инфракрасное облучение [2], нагрев волнами радиочастотного диапазона [3], воздействие магнитным полем [4] и ультразвуком [5]. Еще в конце XIX века российский физик П. Н. Лебедев провел первые работы

по изучению ультразвука [5] и дал толчок для интенсификации исследований в этой области.

Ультразвуком называют упругие колебания и волны, частоты которых более 20 кГц. При обработке ультразвуком происходит разрушение коллоидных частиц на микрометровом уровне, способствующее ускорению химических реакций благодаря эффекту акустической кавитации. При интенсивности ультразвука более 10^5 Вт/м² образованная в жидкой среде кинетическая энергия захлопывающихся пузырьков, сконцентрированная в ничтожно малом объеме, трансформируется частично в силовой импульс и частично в тепловую энергию, за счет чего и происходит нагрев испытуемого субстрата. В жидких средах при воздействии ультразвуковых колебаний возникают также электрокинетические явления, обусловленные направленным движением заряженных частиц и оказывающие влияние на процессы диффузии. Возникающая звуковая

волна может распространяться во всех трех фазах. В результате происходит деформационное смещение частиц вещества или распределение одних молекул в межпространственной системе других [6].

С применением ультразвуковых технологий открывается путь к созданию новых веществ и материалов за счет изменения их свойств (например, наноразмерности частиц, распределения твердых веществ в жидкой среде, диффузии жидких фаз и т. п.) [5].

В работе [7] путем ультразвуковой обработки проведен синтез катализатора TiO_2 , допированного азотом, нанесенного на магнитно-отделяемые частицы $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}$. Приготовление материалов осуществляли при варьировании мощности ультразвука от 80 до 120 Вт и продолжительности времени воздействия от 15 до 75 мин. Определен оптимальный режим обработки: мощность 80 Вт, время 30 мин. В результате был получен минимальный размер частиц – 31.22 мкм. Для сравнения: при традиционном методе синтеза размер частиц катализатора составлял 806.4 мкм, что указывает на агломерацию частиц в отсутствие ультразвуковой обработки. Оба типа катализатора были испытаны в реакции каталитического обессеривания тиюфена. Установлено, что активность синтезированного с применением ультразвука катализатора выше, что объясняется уменьшением размера частиц и достижением гомогенности системы. В целом данная работа демонстрирует преимущества ультразвука для улучшения характеристик катализаторов, а также успешное применение полученных с помощью ультразвука катализаторов при сероочистке.

Авторы [8] представили сравнительные характеристики катализаторов TiO_2 , допированных Fe(III) , синтезированных двумя различными способами – ультразвуковым и золь-гель методом. Исследование катализаторов было выполнено с использованием большого ряда физико-химических методов. Установлено превосходство катализатора, синтезированного ультразвуковым методом, по следующим параметрам: удельная поверхность достигала $49 \text{ м}^2/\text{г}$, а размер частиц – 99 нм. Результаты измерения ширины запрещенной зоны методом UV-VIS-спектроскопии показали ее уменьшение с 3.2 до 2.9 эВ. Для проверки активности катализаторов были проведены фотокалитические эксперименты, подтвердившие превосходство синтезированного при помощи ультразвука катализатора TiO_2 , допированного железом, который обеспечивает бо-

лее высокую степень разложения красителя Acid Blue 80 (38 %) в сравнении с катализатором, синтезированным традиционным способом (31 %). Таким образом, ультразвуковая обработка катализатора улучшает его активность в процессе разложения красителя Acid Blue 80.

Авторами [9] синтезирован ультразвуковым методом и охарактеризован физико-химическими методами наноразмерный фотокализатор Pt-оксид графена (OG)- TiO_2 . Для оценки каталитической эффективности наночастиц Pt-OG- TiO_2 было проведено фотокалитическое и сонофотокалитическое разложение анионного поверхностно-активного вещества додецилбензолсульфоната (ДБС) в водном растворе. Установлено, что катализатор Pt-OG- TiO_2 способствовал разложению ДБС с большей скоростью, чем катализатор P-25 (TiO_2). Также катализатор Pt-OG- TiO_2 продемонстрировал значительную степень разложения ДБС под воздействием видимого света. Кислотность исходного раствора оказывала влияние на скорость фотокалитического окисления ДБС, тогда как при сонохимическом или сонофотокалитическом окислении ДБС такого влияния не наблюдалось.

С помощью ультразвуковой и плазменной обработки получены новые катализаторы – фосфорно-вольфрамовые гетерополикислоты (PW_{12}), нанесенные на оксид алюминия. Катализаторы охарактеризованы различными спектроскопическими методами, а их каталитические свойства оценены в процессе катионной полимеризации тетрагидрофурана. Результаты исследований показали, что плазменная обработка заметно повышает кислотность поверхности приготовленного катализатора, в то время как ультразвуковая обработка способствует равномерному распределению PW_{12} на поверхности носителя и высвобождению большего числа активных центров для кислотной каталитической реакции. Активность синтезированного катализатора (69.7 %) превосходит активность катализатора, полученного традиционным методом (57.5 %) [10].

Описан ультразвуковой синтез новых пирозолов с использованием Ni-Mg-Fe слоистых двойных гидроксидов (СДГ) в качестве катализатора реакции 1,3-диполярного циклоприсоединения. Установлено, что предложенный способ позволяет достигнуть высоких выходов, короткого времени реакции и получить экологически чистый растворитель. Поскольку при 6-кратном повторном использовании катализатора его активность практически не меняется, можно рассматривать указанный процесс как экологически чистый.

Наименьший размер частиц катализатора Ni-Mg-Fe СДГ равен 29 нм [11].

Авторы [12], используя методы механического воздействия (истирание в шаровой и планетарной мельницах) и ультразвуковой обработки цеолита в воде, синтезировали наночастицы из промышленного образца цеолита типа MFI. Методами ИК-спектроскопии диффузного отражения, рентгенофазового анализа, ЯМР-спектроскопии твердого тела и хроматографического анализа определено, что истирание цеолита приводит к частичному разрушению его структуры и появлению дефектов в кристаллическом каркасе, а при ультразвуковом воздействии в водной среде кристаллическая решетка цеолита полностью сохраняется. Под действием ультразвука разрушаются агломераты MFI и формируются наночастицы размером до 40–50 нм. При диспергировании наночастиц цеолита в высококипящих жидкостях – силиконовом или углеводородном масле (Syltherm 800 или Dowtherm RP соответственно) – получены ультрадисперсные суспензии, устойчивость которых зависит от типа дисперсионной среды. Наноразмерные суспензии цеолита в Dowtherm RP более устойчивы, чем в Syltherm 800: без перемешивания они сохраняются как минимум в течение трех недель (при отстаивании в условиях комнатной температуры).

Методом ультразвуковой обработки в щелочной среде синтезирована серия мезопористых цеолитов ZSM-5 и исследована их активность в процессе каталитического крекинга легкой нефти. Цеолит ZSM-5 синтезирован из золы рисовой шелухи без использования какой-либо органической матрицы, физико-химическими методами исследованы его свойства. Обнаружено, что энергия ультразвука способствует созданию иерархической структуры ZSM-5 при обработке щелочью. Согласно результатам рентгенофазового анализа структура цеолита сохранилась после 20-минутной ультразвуковой обработки в щелочной среде. Однако продолжительная десиликация приводит к разрушению структуры цеолита MFI, а с увеличением времени обработки щелочью на поверхности цеолита появляется шероховатость. Синтезированный ZSM-5 представляет собой гексагональную структуру с высокоупорядоченной морфологией. Результаты испытаний каталитической активности катализатора показали, что энергия ультразвука оказывает существенное влияние на активность ZSM-5 [13].

В работе [14] для реакции восстановления кислорода был синтезирован наноразмерный металлический катализатор, содержащий гемин, нанесенный на технический углерод (сажу). Катализатор подвергали термо- и ультразвуковой обработке для увеличения площади поверхности (БЭТ) и повышения числа доступных активных центров. Катализатор охарактеризован физико-химическими методами анализа. Показано, что его каталитическая активность в реакции восстановления кислорода существенно повышается за счет уменьшения размера частиц и увеличения площади поверхности.

Авторами [15] были приготовлены два типа катализаторов – прокаленный Fe/Co/Al-Mt(C) и обработанный ультразвуком Fe/Co/Al-Mt(U) – традиционным методом ионного обмена и в сочетании с ультразвуком, где железо выступало активным компонентом, а монтмориллонит (Mt) использовался в качестве носителя. Физико-химические свойства и структура поверхности образцов (Fe/Co/Al-Mt) были исследованы методами ИК-спектроскопии, рентгеновской дифракции, UV-VIS-спектроскопии, сканирующей электронной микроскопии. Эффективность приготовленных катализаторов была испытана в процессе очистки сточных вод. Установлено, что по сравнению с Fe/Co/Al-Mt(C) удельная поверхность Fe/Co/Al-Mt(U) увеличилась на 16.2 %, диаметр пор увеличился на 10.2 %, а активный компонент диспергирован более равномерно. Полученный с использованием ультразвука катализатор Fe/Co/Al-Mt(U) продемонстрировал более высокую стабильность и меньшую потерю активного компонента: после четырех испытаний активность катализатора все еще превышала 70 %, а элюирование ионов железа активного компонента составляло всего 0.59 мг/л.

В работе [16] синтезированы катализаторы из твердых промышленных отходов (шлак установки десульфурации) для реакции карбоксиметилирования. Исходный шлаковый материал, содержащий CaCO_3 , Ca(OH)_2 , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 и TiO_2 , обрабатывали различными реагентами, варьируя параметры синтеза. Для усиления растворения шлака и кристаллизации новых фаз был применен метод ультразвуковой обработки. Физико-химические свойства исходных материалов и синтезированных катализаторов оценивались несколькими аналитическими методами. Ультразвуковая обработка промышленного шлака, обладающего малой удельной поверхностью

(6 м²/г) и слабой кристаллической структурой, привела к образованию высококристаллического катализатора с площадью поверхности до 49 м²/г. Каталитическая активность полученного катализатора была изучена при синтезе сложных эфиров карбоновой кислоты карбоксиметилированием коричневого спирта диметилкарбонатом при 150 °С, где он продемонстрировал высокую селективность в отношении целевого продукта (около 84 %). Таким образом, ультразвуковая обработка оказала положительное влияние на каталитическую активность полученного катализатора.

Авторы [17] синтезировали наночастицы сульфида меди(I) (Cu₂S) путем термического разложения диэтилдитиокарбаматного комплекса меди(II) при 220 °С. Анализ синтезированного продукта был проведен различными спектроскопическими и физическими методами, что подтвердило получение чистого Cu₂S, состоящего из наночастиц размером около 50 нм. Для разложения красителя метиленового синего на наночастицах Cu₂S был разработан усовершенствованный процесс окисления (окислитель H₂O₂) с применением ультразвука. Установлено, что параметры процесса с применением ультразвука улучшаются по сравнению с катализом без него. Показано, что синергизм между катализатором Cu₂S и ультразвуковыми волнами зависит от дозировки катализатора и концентрации H₂O₂.

В [18] проведена оценка влияния ультразвука на дисперсные характеристики гидроксида магния. Определено, что на размер частиц оказывает влияние концентрация исходных реагентов, длительность и интенсивность ультразвукового воздействия. Источником ультразвука был аппарат "ИЛ 100-6" с рабочей частотой 22 кГц и с задаваемой амплитудой колебания 0–80 мкм. В результате исследований размеров частиц установлено, что при увеличении объема обрабатываемой среды эффективность ультразвука уменьшается. Это, возможно, связано с мощностью аппарата, а также с ударными волнами, которые должны разрушать агрегаты частиц, но из-за большого объема среды этого не наблюдается. Таким образом, результат исследований показал не менее важную роль мощности ультразвука.

Авторами [19] исследованы кинетики сульфокисления фенола в присутствии закрепленных на полимерную матрицу (полиакриловая кислота, ПАК) комплексов кобальта, никеля и железа в ультразвуковом поле в частотном интервале 0–200 кГц интенсивностью 5 Вт/см³.

Оптимизированы условия ультразвукового воздействия. Показано, что ультразвук в исследуемом диапазоне вызывает повышение окислительно-восстановительного потенциала системы МХ–ПАК–С₆Н₅ОН–Н₂O (МХ = соли Co²⁺, Ni²⁺, Fe²⁺) до 200–400 мВт, способствует образованию биядерных комплексов кобальта и никеля при более низких концентрациях соли в растворе, приводит к повышению констант комплексообразования кобальта, никеля и железа. Установлено, что ультразвук влияет на природу промежуточных комплексов и, как следствие, на их активность в процессе сульфокисления.

Авторы [20] на примерах показали способность ультразвука улучшать каталитические свойства твердого катализатора. Помимо усиления тепло- и массопереноса, вызванного схлопыванием кавитационных пузырьков, авторы продемонстрировали синергетический эффект между катализом и ультразвуковой обработкой. В частности, физическое и химическое локальное воздействие на каталитическую поверхность при схлопывании кавитационных пузырьков может приводить к окислению ионов металлов, обеспечивать энергией катализатор/реакцию, активировать или создавать каталитические центры *in situ* и даже предотвращать дезактивацию катализатора. Обсуждается влияние ультразвука на структуры твердых катализаторов, которое может положительно или отрицательно отражаться на характеристиках катализаторов.

В работе [21] изучено влияние ультразвуковой обработки на каталитические свойства марганецсодержащего катализатора на основе наноструктурированного углеродного материала, полученного путем жидкофазного окисления нафтен-парафинового концентрата. Определено, что ультразвуковая обработка способствует улучшению каталитических свойств катализатора и ускоряет процесс окисления углеводородов до синтетических нефтяных кислот, а также позволяет его повторное использование в реакции.

В работе [22] проведено окисление *n*-ундекана в присутствии синтезированного катализатора (хромовая соль природной нефтяной кислоты (RCOO)₃Cr), на который воздействовали ультразвуком. Методом динамического рассеяния света определено распределение частиц катализатора в жидкой фазе до и после ультразвуковой обработки в углеводороде. В результате ультразвукового воздействия наблюдается смещение среднего размера частиц катализатора от ~7 до ~15 нм. Обработанная ультразвуком смесь катализатора с углеводородом подвергну-

та жидкофазному аэробному окислению в окислительной установке барботажного типа. Установлено, что ультразвук способствует ускорению процесса образования кислородсодержащих продуктов, сокращая продолжительность реакции в 2 раза. Выход конечных продуктов увеличивается в 12 раз по сравнению с автокатализом и в 2.5 раза по сравнению с катализом без ультразвука.

Авторы [23] применили ультразвуковую обработку в процессе повышения прочности промышленного катализатора крекинга “Люкс”, изучив ее влияние на дисперсность, прочность, гидрофильность и фазовый состав компонентов катализатора крекинга и катализаторной композиции в целом. Композиция промышленно производимого катализатора крекинга состоит из монтмориллонита, продукта термохимической активации глинозема, аморфного алюмосиликата и цеолита Y. Применение ультразвуковой обработки к суспензиям отдельных компонентов катализаторной композиции приводит к увеличению их дисперсности, при этом наблюдается увеличение гидрофильности частиц монтмориллонита, изменение скоростей фазовых переходов гидроксида алюминия, увеличение прочности экструдатов прокаленного монтмориллонита от 200 до 300 кг/см². Ультразвуковая обработка суспензии композиции катализатора крекинга приводит также к увеличению ее дисперсности, тем самым повышая прочность от 80 до 125 кг/см² и насыпную плотность готового катализатора крекинга при сохранении высокой каталитической активности без изменения его состава и без введения дополнительной стадии пептизации, традиционно применяемых для этой цели.

В работе [24] в качестве попытки реализовать идею разработки экологически чистого метода каталитического окисления спиртов в соответствующие альдегиды разработан многофункциональный базовый катализатор на основе декорированных вольфрамом углеродных квантовых точек (Carbon quantum dots, CQDs), A-CQDs/W, и исследована эффективность его соноокисления в присутствии пероксида водорода, используемого в качестве экологически чистого окислителя в водной среде. Показана ключевая роль ультразвуковой обработки в достижении высокого выхода целевого продукта в тестовой реакции окисления бензилового спирта. В результате воздействия акустических волн создаются исключительные температурные условия и условия сжатия, которые обеспечивают высокую

степень взаимодействия реагентов. В результате достигается максимальный выход продуктов за сравнительно короткое время, что, в свою очередь, приводит к уменьшению количества непрореагировавших реагентов и побочных продуктов. При этом полностью отпадает необходимость в использовании токсичных органических растворителей и опасных окислителей, вспомогательных веществ и катализаторов межфазного переноса.

“Зеленая химия” получает все большее распространение благодаря усовершенствованию технологических процессов, которые положительно влияют на окружающую среду. При этом ультразвук является одним из важных методов улучшения органического синтеза с точки зрения “зеленой химии”, поскольку он может способствовать повышению выхода и селективности, а также сокращению времени реакции по сравнению с традиционными методами [25].

В последнее время активно развивается направление биокатализа (ферментативного катализа). Использование ферментов (биологически активных веществ) в качестве катализаторов, ускоряющих процессы синтеза соединений на основе углерода, становится полезной альтернативой традиционным химическим катализаторам, так как биокатализ относится к области “зеленого” производства химических продуктов. Однако процессы ферментативной природы обычно обеспечивают более низкие выходы по сравнению с обычными химическими процессами. Поэтому в последние годы наблюдается широкое применение ультразвука в ферментативных процессах, таких как производство сложных эфиров с желаемыми характеристиками для фармацевтической, косметической и пищевой промышленности, гидролиз и глицеролиз растительных масел, производство биодизеля и т. д. В некоторых исследованиях указывается, что энергия, выделяемая ультразвуком во время явлений кавитации, может быть использована для усиления массопереноса (субстрат/фермент), тем самым повышая скорость образования продуктов, а также способствуя увеличению каталитической активности ферментов. Кроме того, ультразвуковая обработка считается “зеленой” технологией из-за его высокой эффективности, низких требований к инструментам и значительного сокращения времени обработки без добавления дополнительных химических реагентов. В работе [26] обобщены имеющиеся исследования по применению ультразвука в катализиру-

емых ферментами реакциях этерификации, гидролиза, глицеролиза и переэтерификации [26].

В работе [25] представлен всесторонний обзор достижений в области методов органического синтеза, о которых сообщалось за последние десять лет, с акцентом на многокомпонентные реакции с использованием ультразвука в условиях гетерогенного катализа. В частности, представлены фармакологически важные N- и O-гетероциклические соединения, рассмотрены методы их синтеза с использованием “зеленых” растворителей и рециклинга катализаторов. Гетерогенный катализ – один из важных аспектов “устойчивой химии”, главным преимуществом которого является переработка и повторное использование катализаторов. С другой стороны, многокомпонентные реакции обеспечивают синтез структурно разнообразных соединений в одном реакторе без выделения и очистки промежуточных продуктов. Таким образом, комбинация ультразвука с гетерогенным катализом оказалась мощным инструментом для получения соединений с меньшими затратами времени и энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многочисленные исследования последних лет показывают, что ультразвуковая обработка является эффективным методом приготовления, модификации и/или обработки катализаторов с целью улучшения их каталитических свойств. Ультразвуковым воздействием можно регулировать физико-химические и функциональные характеристики катализаторов, варьируя время воздействия, мощность и амплитуду ультразвука. Оптимизация условий ультразвуковой обработки катализаторов обеспечивает улучшение их свойств, в том числе позволяет достигать высоких значений конверсии реагентов и селективности образования целевых продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Wu T.-S., Syu L.-Y., Lin C.-N., Lin B.-H., Liao Y.-H., Weng S.-C., Huang Y.-J., Jeng H.-T., Lu S.-Y., Chang S.-L., Soo Y.-L. Enhancement of catalytic activity by UV-light irradiation in CeO₂ nanocrystals // *Sci. Rep.* 2019. Vol. 9. Art. 8018.
- Mathew S., Kim C. Y., Kim M.-K., Kim K. C., Chung W. S., Cho Y.-R. Effect of infrared oxide catalysts on water splitting for green energy // *ChemElectroChem.* 2021. Vol. 8, No. 15. P. 2944–2949.
- Patil N., Mishra N. K., Saed M. A., Green M. J., Wilhite B. Energy conversion: radio frequency driven heating of catalytic reactors for portable green chemistry // *Adv. Sustainable Syst.* 2020. Vol. 4, No. 11. Art. 2070024.
- Wang F., Guan D., Li Y., Zhong J. Research progress on magnetic catalysts and its application in hydrogen production area // *Energies.* 2022. Vol. 15, No. 15. Art. 5327.
- Хмелев В. Н., Сливин А. Н., Барсуков Р. В., Цыганок С. Н., Шалунов А. В. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности: курс лекций. Бийск: Изд-во Алтайского гос. техн. ун-та им. И. И. Ползунова, 2010. 176 с.
- Ланин В. Физические эффекты ультразвука в жидких средах и их применение в технике // *Технологии в электрон. пром-сти.* 2013. № 2 (62). С. 69–74.
- Dalvi P., Dey A., Gogate P. R. Ultrasound-assisted synthesis of a N-TiO₂/Fe₃O₄@ZnO complex and its catalytic application for desulfurization // *Sustainability.* 2022. Vol. 14, No. 23. Art. 16201.
- Sene R. A., Moradi G. R., Sharifnia S. Sono-dispersion of TiO₂ nanoparticles over clinoptilolite used in photocatalytic hydrogen production: effect of ultrasound irradiation during conventional synthesis methods // *Ultrason. Sonochem.* 2017. Vol. 37. P. 490–501.
- Neppolian B., Bruno A., Bianchi C. L., Ashokkumar M. Graphene oxide based Pt-TiO₂ photocatalyst: ultrasound assisted synthesis, characterization and catalytic efficiency // *Ultrason. Sonochem.* 2012. Vol. 19, No. 1. P. 9–15.
- Li Y., Chu W., Chen M., Hu J. Preparation of the supported heteropolyacids catalyst by ultrasound-plasma treatment // *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.* 2008. Vol. 23, No. 2. P. 234–238.
- Salam M. A., Imdadulhaq E. S., Al-Romaizan A. N., Saleh T. S., Mostafa M. M. M. Ultrasound-assisted 1,3-dipolar cycloadditions reaction utilizing Ni-Mg-Fe LDH: a green and sustainable perspective // *Catalysts.* 2023. Vol. 13, No. 4. Art. 650.
- Колесниченко Н. В., Ежова Н. Н., Яшина О. В. Формирование наночастиц цеолита типа MFI и суспензий на его основе // *Нефтехимия.* 2016. Т. 56, № 6. С. 607–611.
- Khoshbin R., Karimzadeh R. Synthesis of mesoporous ZSM-5 from rice husk ash with ultrasound assisted alkali-treatment method used in catalytic cracking of light naphtha // *Adv. Powder Technol.* 2017. Vol. 28, No. 8. P. 1888–1897.
- Jiang R., Tran D. T., McClure J. P., Chu D. Increasing the electrochemically available active sites for heat-treated hemin catalysts supported on carbon black // *Electrochim. Acta.* 2012. Vol. 75. P. 185–190.
- Li Z., Zhao B., Liu L., He B., Sun Li, Zhang X. Preparation of Fe/Co/Al-Mt catalysts by ultrasound-assisted ion exchange method and its property investigation // *Environ. Chem.* 2020. No. 10. P. 2929–2936.
- Kholkina E., Kumar N., Erdnen K., Peurla M., Palonen H., Salonen J., Lehtonen J., Murzin D. Yu. Ultrasound irradiation as an effective tool in synthesis of the slag-based catalysts for carboxymethylation // *Ultrason. Sonochem.* 2021. Vol. 73. Art. 105503.
- Farhadi S., Siadatnasab F. Copper(I) sulfide (Cu₂S) nanoparticles from Cu(II) diethyldithiocarbamate: synthesis, characterization and its application in ultrasound-assisted catalytic degradation of organic dye pollutants // *Mater. Res. Bull.* 2016. Vol. 83. P. 345–353.
- Лановецкий С. В., Зыков Д. И., Пойлов В. З. Оценка влияния ультразвукового воздействия на дисперсные характеристики гидроксида магния // *Вестн. Пермского нац. исслед. политехн. ун-та. Хим. технология и биотехнология.* 2010. № 11. С. 62–69.
- Шакиева Т. В., Емельянова В. С., Каирбеков Ж. К., Мылтыкбаева Ж. К., Турабекова Ж., Айбулатова Н. В., Оспан Ж. Каталитическое сульфокисление фенола в водных растворах в ультразвуковом поле // *Вестн. Казахского нац. ун-та. Сер. Хим.* 2012. Т. 65, № 1. С. 457–461.

- 20 Amaniampong P. N., Jérôme F. Catalysis under ultrasonic irradiation: a sound synergy // *Curr. Opin. Green Sustainable Chem.* 2020. Vol. 22. P. 7–12.
- 21 Aliyeva A. Z., Ibrahimov H. C., Ismayilov E. G., Amirov F. A., Aliyeva N. M. Effect of ultrasonic treatment of nanostructured Mn-containing catalyst for the oxidation of petroleum hydrocarbons // *Theor. Exp. Chem.* 2019. Vol. 55, No. 4. P. 287–292.
- 22 Karimova U. A. Effect of ultrasound on catalytic activity of chromium salt of petroleum acids in the process of aerobic oxidation of *n*-undecane // *Processes of Petrochemistry and Oil Refining.* 2020. Vol. 21, No. 3. P. 372–377.
- 23 Белая Л. А., Доронин В. П., Сорокина Т. П. Применение ультразвука на разных стадиях приготовления катализатора крекинга // *Катализ в пром-сти.* 2009. № 3. С. 12–13.
- 24 Rezaei A., Mohammadi Y., Ramazani A., Zheng H. Ultrasound-assisted pseudohomogeneous tungstate catalyst for selective oxidation of alcohols to aldehydes // *Sci. Rep.* 2022. Vol. 12. Art. 3367.
- 25 Machado I. V., Dos Santos J. R. N., Januario M. A. P., Corrêa A. G. Greener organic synthetic methods: sonochemistry and heterogeneous catalysis promoted multicomponent reactions // *Ultrason. Sonochem.* 2021. Vol. 78. Art. 105704.
- 26 Lerin L. A., Loss R. A., Remonatto D., Zenevitz M. C., Balen M., Netto V. O., Ninow J. L., Trentin C. M., Oliveira V., De Oliveira D. A review on lipase-catalyzed reactions in ultrasound-assisted systems // *Bioprocess. Biosyst. Eng.* 2014. Vol. 37, No. 12. P. 2381–2394.