

АКТИВАЦИЯ, РЕГЕНЕРАЦИЯ И ПЕРЕРАБОТКА ОТРАБОТАННЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

В. А. Иодис✉

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук (НИГТЦ ДВО РАН), г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

✉ iodisva@mail.ru

Аннотация: Приведен анализ исследований по активации, регенерации и переработке отработанных катализаторов с использованием ультразвукового воздействия. Исследование показало, что ультразвуковая обработка отработанных катализаторов действительно позволяет проводить их активацию и регенерацию посредством удаления поверхностных отложений, пленок и диспергации частиц катализаторов. Сравнение способов, использующих ультразвук, с традиционными способами очистки катализаторов показало существенное сокращение продолжительности процессов, рост степени очистки, рентабельность восстановления. Эффекты использования ультразвука – кавитация, радиационное давление, акустические потоки с частотами 20–22, 30, 35, 37, 80 кГц, интенсивностями до 10 Вт/см² в процессе кислотного, бактериально-химического выщелачивания отработанных катализаторов, благодаря разрушению оксидных пленок и загрязнений, удалению поверхностных отложений, интенсификации диффузии выщелачивающего раствора в микротрещины, существенно ускоряют процесс – до 30 %, увеличивает процент извлечения целевых металлов – до 99,9 %.

Ключевые слова: ультразвуковое воздействие, активация, регенерация, переработка, бактериально-химическое выщелачивание, интенсивность излучения, кавитация

Благодарности, признательность, финансирование: Исследования выполнялись в рамках базового бюджетного финансирования НИГТЦ ДВО РАН Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (тема FWMR-2024-0003).

Для цитирования: Иодис В. А. Активация, регенерация и переработка отработанных катализаторов с использованием ультразвукового воздействия. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(3):61-65. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-61-65>.

ACTIVATION, REGENERATION AND RECYCLING OF SPENT CATALYST USING ULTRASONIC IMPACT

V. A. Iodis✉

*Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation*

✉ iodisva@mail.ru

Abstract: The paper analyzes studies on the activation, regeneration and recycling of spent catalysts using ultrasound exposure. The study showed that ultrasonic treatment (22–44 kHz, up to 13 W/cm², up to 2 kW) of spent catalysts really allows for their activation and regeneration, by removing surface deposits, films, and dispersing catalyst particles. Comparison of methods using ultrasound with traditional methods of catalyst cleaning showed a significant reduction in process duration, an increase in the degree of cleaning, and the cost-effectiveness of recovery. The effects of using ultrasound - cavitation, radiation pressure, acoustic flows with frequencies of 20–22, 30, 35, 37, 80 kHz, intensities up to 10 W/cm² in the process of acid, bacterial-chemical leaching of spent catalysts, due to the destruction of oxide films and contaminants, removal of surface deposits, intensification of diffusion of the leaching solution into microcracks, significantly accelerates the process – up to 30 %, increases the percentage of extraction of target metals – up to 99.9 %.

Keywords: ultrasonic action, activation, regeneration, processing, bacterial-chemical leaching, radiation intensity, cavitation

Acknowledgments, funding, financial Support: The research is carried out within the framework of the basic budget financing of RGC FEB RAS the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic FWMR-2024-0003).

For citation: Iodis VA. Activation, regeneration and recycling of spent catalyst using ultrasonic impact. *Mine Surveying and Sub-surface Use*. 2025;25(3):61-65. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-61-65>.

Введение

Одной из сложных проблем в охране окружающей среды является недостаточное вовлечение в оборот отходов производства, что приводит к потерям значительного количества вторичных ресурсов, которые при необходимости переработки могут вторично использоваться.

Катализаторы много лет используются в автомобильной, химической, нефтехимической и пищевой промышленности. В процессе использования катализаторы загрязняются, снижается площадь их рабочей поверхности, на частицах катализаторов образуются поверхностные отложения, и возникает необходимость в их замене и утилизации. Однако отработанные катализаторы являются источником значительного количества твердых и опасных отходов. В связи с увеличением затрат на их утилизацию, ростом стоимости материалов на их производство и экологическими проблемами возникает острая необходимость в разработке технологий активации, регенерации, переработки отработанных катализаторов.

В последние два десятилетия все большее внимание уделяется процессу регенерации, переработки отработанных катализаторов с использованием ультразвукового воздействия. Это связано с кавитационным и механическим воздействием ультразвука, способствующим снижению продолжительности процессов регенерации, переработки, уменьшению количества используемых реагентов, росту извлечения целевых металлов при переработке. Ультразвуковые эффекты приводят к разрушению оксидных пленок и загрязнений, удалению поверхностных отложений, эффекты ускоряют массоперенос, тем самым повышая эффективность процесса, его рентабельность [1–4].

Цель работы: анализ исследований по активации, регенерации и переработке отработанных катализаторов с использованием ультразвукового воздействия.

Методы работы

Обзор и анализ проведенных исследований по активации, регенерации и переработке отработанных катализаторов с использованием ультразвука, сравнение традиционных способов очистки катализаторов со способами, использующими ультразвуковую обработку.

Результаты

Активация и регенерация

Из-за нерентабельности активации, очистки и регенерации отработанных катализаторов традиционными методами их утилизируют. Однако использование ультразвуковой обработки ускоряет и удешевляет этот процесс. Это подтверждается исследованиями [5], где для повышения активности катализатора проведена его предварительная обработка ультразвуком частотой 22 000 Гц в течение 60 с, при температуре 25 °С и соотношении вода/катализатор – 1/1,5, которая повысила эффективность катализаторов марок НТК-10[ФХМ(М)] Ф и НКО 2-3 к84, содержащие оксиды Al, Ca, Cu, Ni, не изменяя их структурные характеристики.

Ультразвуковая обработка позволила повысить актив-

ность цеолитного катализатора ZSM-5 с введенным композитом $\text{Rh}/(\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_8\text{N}_2)_n$ вследствие диспергирования частиц Rh и его более тонкодисперсного распределения по поверхности ZSM-5 [6]. Ультразвуковое воздействие позволило регенерировать палладиевый катализатор для гидрирования ацетиленового спирта [7].

Обработка катализатора проводилась в растворе $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ при частотах колебаний 15, 22 кГц, интенсивностях от 0,1 до 1 Вт/см² и продолжительностью от 3 до 5 минут. Авторы изобретения указывают, что при снижении интенсивности обработки не достигался эффект регенерации, а при возрастании интенсивности происходила диспергация катализатора и, как следствие, снижение его активности. Регенерация катализатора наступала вследствие очистки его поверхности, восстановления на поверхности соотношения палладий – цинк. При регенерации автомобильных катализаторов используется и ультразвуковое перемешивание с частотами 22 и 44 кГц, интенсифицирующее восстановление платиноидов Pt и Rh [8].

Воздействие ультразвукового излучения при удалении меркаптановой серы в процессе каталитического окисления меркаптанов в смеси $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$, C_9H_{20} , $\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_5\text{O}_8$ и $\text{NaC}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4$ с катализатором Al_2O_3 позволило полностью ее удалить. Обработку осуществляли в реакционной камере, где при помощи магнитострикционного преобразователя возбуждали колебания 25 000 Гц интенсивностью 13 Вт/см², амплитудой 10 мкм, продолжительностью 300 с. Мощность генератора колебаний была 2 кВт [9]. Авторы объясняют эффект тем, что при частоте, близкой к резонансным частотам атомов серы, и энергии, превышающей энергию связей атомов в молекулах сернистых соединений, ультразвуковое воздействие очищает углеводородные фракции от серных примесей. Ультразвуковая чистка (регенерация) никелевого катализатора от масла в ультразвуковой ванне мощностью 80 Вт, частотой 40 000 Гц, при температуре процесса ультразвукового воздействия 80 °С, продолжительностью 180 минут позволила снизить длительность процесса в сравнении с традиционным методом – обработкой катализатора NaOH или Na_2CO_3 , увеличить удаление масла с 94,8 до 97,7 % [10, 11].

Описание процесса регенерации отработанного цеолитного катализатора FCC без разрушения микроструктуры и основы цеолита приведено в [12]. Процесс состоял из погружения катализатора в H_2SO_4 , выщелачивания в $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$ и H_2SO_4 при ультразвуковом воздействии 1 800 с, температуре процесса 70 °С и мощности колебаний 250 Вт. По окончании процесса регенерации был получен катализатор с полностью восстановленной микроструктурой. Эксперимент показал, что использование ультразвука позволяет в четыре раза ускорить процесс регенерации, однако увеличение мощности до 500 Вт приводит к разрушению структуры частиц катализатора.

Ультразвуковая обработка отработанных катализаторов позволяет проводить их активацию и регенерацию посредством удаления поверхностных отложений, пленок и диспергации частиц катализаторов.

Переработка

Выщелачивание Ni

Сокращение продолжительности процесса кислотного выщелачивания с 9 часов до 50 минут отработанного катализатора, содержащего 16 % оксида никеля, 78 % оксида алюминия, 5–6 % оксида кальция, 0,1 % кремния, удалось достичь авторам [13] при использовании ультразвукового воздействия. Отработанный катализатор измельчали и просеивали (размер частиц – 1–2 мм), далее к 5 г катализатора добавляли HNO_3 при концентрации 10–80 % по объему, перемешивали и смесь направляли в ультразвуковой реактор, где проводилась ультразвуковая обработка с частотой 30 000 Гц. Процесс проводился при температуре 30–90 °С. Кавитация, радиационное давление и акустические потоки позволяли очистить поверхность катализатора от нитрата никеля, проникать раствору в имеющиеся щели и трещины.

Ультразвуковая обработка позволила не только снизить время протекания процесса, но и увеличить извлечение целевого металла с 93 % при обычном кислотном выщелачивании до 95 %. Высокий процент извлечения никеля (≈ 99 %) был достигнут при переработке с использованием ультразвука отработанных катализаторов гидрообработки, содержащем 3,73 % по массе никеля, 1,26 % молибдена, 5,03 % ванадия, 23,64 % алюминия [14].

Разработанная технология переработки включала вакуумный пиролиз и выщелачивание серной кислотой в течение 20 минут, при температуре 45 °С с ультразвуковым воздействием мощностью 60 Вт, интенсивностью излучения 8 Вт/см². Радиационное давление и акустические потоки почти полностью удаляли масляные загрязнения с поверхностей измельченного катализатора. Существенное снижение времени протекания процесса, на 2 ч, наблюдалось при ультразвуковом выщелачивании HNO_3 (массовая концентрация – 65 %) отработанных катализаторов, содержащих 65 % никеля по массе с размером частиц 500 мкм [15]. Авторы объясняют рост кинетики процесса аналогично [13] – кавитацией и возникновением акустических потоков, способных увеличить диффузию выщелачивающего раствора в микротрещины. Ультразвуковая обработка проводилась при частоте 35 кГц, мощности 200–800 Вт, объемной интенсивности от 0,0225 до 0,0825 Вт/см³, температуре 70 °С. Извлечение никеля составило 70 %.

Выщелачивание V и Mo

Известен способ серноокислотной переработки катализаторов, содержащих ванадий [16], в котором отработанный катализатор измельчался (размер частиц – 20 мкм) и выщелачивался серной кислотой при Т:Ж = 1:5 в ультразвуковом поле (20 кГц, 630 Вт, 5 минут). Извлечение составило 98 % при снижении продолжительности и энергоемкости (в 2,5 раза) процесса, что, как отмечают авторы, связано с образованием мелкодисперсных частиц (0,05–0,250 мкм), диспергации под действием ультразвуковой обработки.

В ряде экспериментов исследования [17] кислотного выщелачивания H_2SO_4 катализаторов при температуре 60 °С, мощности ультразвука 360 Вт за 6 часов удалось достичь растворения наибольшей части ванадия – 95 %. Ультразвуковая обработка с выходной мощностью 200, 600 Вт отработанных катализаторов HDS (размер частиц – 2–8 мм) в процессе выщелачивания гидроксидом натрия

(20 г/л) – при температуре 80 °С, карбонатом натрия – при температуре 55 °С позволила извлечь 66 % молибдена за 10 минут обработки и 94,3 % этого металла за 2 часа обработки [18, 19]. Почти полностью (99,9 %) извлечь молибден из обожженного и измельченного отработанного катализатора марки АКМ1 получилось исследователям [20]. Процесс кислотного выщелачивания 2М раствором карбоната натрия включал две ступени продолжительностью от 15 до 30 минут при отношении твердого к жидкому 1:2,5, температуре 80 °С.

Как показал эксперимент, ультразвуковое воздействие после обжига катализатора с частотой 22 000 Гц, интенсивностью 10 Вт/см², мощностью 3 кВт может снизить общую продолжительность процесса на 20 минут, а при прочих равных условиях увеличить процент извлечения на 10 %.

Выщелачивание Al и La

Ультразвуковое воздействие с частотой 37 кГц и продолжительностью 40 минут в процессе выщелачивания (10,3 % по массе воды и 12,6 % FeSO_4) отработанных автомобильных катализаторов также показало рост извлечения алюминия на 12,2 % – с 69,5 до 81,7 % – в течение 4 часов при температуре 70 °С [21]. Почти полного извлечения лантана (97,1 %) удалось достичь авторам [22] при выщелачивании соляной кислотой катализатора высокотемпературной переработки нефти и ее фракций в ультразвуковой среде в течение 1 часа с мощностью 200 Вт при температуре 60 °С.

В сравнении с традиционным кислотным выщелачиванием благодаря кавитационным эффектам использование ультразвука увеличивает процент извлечения в 1,39 раза.

Бактериально-химическое выщелачивание

В бактериально-химических процессах оксидные пленки, поверхностные отложения на поверхности, например сульфидов, блокируют процессы их окисления. При этом процессы бактериального окисления активно происходят только на ограниченных участках открытой ювенильной поверхности частиц с некомпенсированными поверхностными дефектами кристаллических решеток, являющихся донорами электронов. Следовательно, разрушение пленок, отложений с минеральных частиц, агрегатов обеспечит активацию и повышение кинетики процесса бактериально-химического выщелачивания [1].

Анализ литературных источников показал, что данных экспериментов по бактериально-химическому выщелачиванию отработанных катализаторов с приведением параметров ультразвукового воздействия – малое количество. Биовыщелачивание измельченного отработанного катализатора HDS до размера частиц 75–100 мкм проводили при непрерывной и периодической обработке ультразвуком бактериальной суспензии с инокулятом грамотрицательных палочковидных бактерий *Escherichia coli* [23]. Обработка имела интенсивность излучения 0,15–2,2 Вт/см², частоты – 37 кГц и 80 кГц, мощности 130 и 100 Вт, продолжительность – 30 минут. Концентрация бактерий в начале эксперимента достигала $4\text{--}5 \times 10^9$ КОЕ/мл. Периодичность ультразвуковой обработки составляла двое суток.

Как показал эксперимент, использование периодического ультразвукового воздействия на бактерии позволило увеличить извлечение молибдена на 8 % – с 46 до 54 %. Кавитационное, механическое воздействие ультразвука в процессе переработки катализаторов в сравнении со стандартными

способами переработки существенно ускоряет процесс, увеличивает процент извлечения металлов.

Заключение

1. Ультразвуковая обработка (22–44 кГц, до 13 Вт/см²) отработанных катализаторов действительно позволяет проводить их активацию и регенерацию посредством удаления оксидных пленок, поверхностных отложений и измельчения частиц катализаторов.

2. Сравнение традиционных способов очистки катализаторов со способами, использующими ультразвук, показало существенное сокращение продолжительности процессов

при использовании УЗИ, рост степени очистки и рентабельность восстановления катализаторов.

3. Эффекты использования ультразвука – кавитация, радиационное давление, акустические потоки с частотами 20–80 кГц, интенсивностями до 10 Вт/см² в процессе кислотного, бактериально-химического выщелачивания отработанных катализаторов благодаря разрушению пленок и загрязнений, удалению поверхностных отложений, интенсификации диффузии выщелачивающего раствора в микротрещины до 30 % ускоряет процесс и увеличивает процент извлечения целевых металлов (до 99,9 %).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Трухин ЮП, Иодис ВА, Хайнасова ТС. СВЧ и УЗИ активация кинетики бактериально-химических процессов выщелачивания кобальт-медно-никелевых руд месторождения Шануч. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2021;11(19):113–23. [Trukhin YP, Iodis VA, Khainasova TS. Microwave and ultrasound activation of kinetics of bacterial-chemical processes of leaching of cobalt-copper-nickel ores of the Shanuch deposit. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2021;11(19):113–23 (In Russ.)]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_19_113
2. Iodis VA, Koydan IA. Investigation of oxide films removal process from the ore pulp particle surface during its ultrasonic treatment. *Non-Ferrous Metals*. 2024;1:8–12. DOI: 10.17580/nfm.2024.01.02
3. Иодис ВА. Использование ультразвукового воздействия для процесса бактериально-химического выщелачивания. *Недропользование XXI век*. 2024;3–4(104):114–8. [Iodis VA. Using ultrasonic influence for the process bacterial-chemical leaching. *Subsoil use XXI century*. 2024;3–4(104):114–8 (In Russ.)].
4. Блайда ИА, Васильева ТВ, Семенов КИ. Влияние ультразвука на процессы биовыщелачивания металлов и десульфуризации углей. *Микробиология и биотехнология*. 2017;4:6–20. [Blayda IA, Vasyleva TV, Semenov KI. Impact of ultrasound on coal desulfurization and process of bioleaching of metals. *Microbiology and biotechnology*. 2017;4:6–20 (In Russ.)]. DOI: 10.18524/2307-4663.2017.4(40).119111
5. Кузмина РИ, Кожихина АВ, Голосман ЕЗ и др. Ультразвуковое воздействие на цементсодержащие катализаторы очистки газов от оксидов азота и углерода (II). *Химия и химическая технология*. 2008;51(7):106–8. [Kuzmina RI, Kozhakhina AV, Golosman EZ, et al. Ultrasonic action on cement-containing catalysts for gas purification from nitrogen and carbon (II) oxides. *Chemistry and chemical technology*. 2008;51(7):106–8 (In Russ.)].
6. Батова ТИ, Обухова ТК, Колесниченко НВ и др. Влияние ультразвуковой обработки на физико-химические и каталитические свойства катализатора Rh*хитозан/НЦВМ в конверсии диметилового эфира в низшие олефины. *Нефтехимия*. 2019;59(5):569–74. [Batova TI, Obukhova TK, Kolesnichenko NV, et al. Effect of ultrasonic treatment on the physicochemical and catalytic properties of Rh*chitosan/NCVM catalyst in the conversion of dimethyl ether to lower olefins. *Neftekhimiya*. 2019;59(5):569–74. (In Russ.)]. DOI: 10.1134/S0028242119050034.
7. Патент RU № 2080921, 10.06.1997. Способ регенерации палладиевого катализатора гидрирования / Сульман ЭМ, Сульман МГ, Матвеева ВГ [и др.]. [Patent RU № 2080921, 10.06.1997. Process for regeneration of hydrogenation of palladium catalyst / Sul'man EhM, Sul'man MG, Matveeva VG et al. (In Russ.)].
8. Патент RU № 2464088, 20.10.2012. Способ регенерации автомобильных катализаторов. Бюллетень 29 / Миргород ЮА, Емельянов СГ, Борщ НА [Patent RU № 2464088, 20.10.2012. Method of automotive catalyst. Bull. 29 / Mirgorod JuA, Emel'janov SG, Borshch NA (In Russ.)].
9. Муллакаев МС, Асылбаев ДФ, Оганян ГБ и др. Ультразвуковая интенсификация процесса каталитического окисления меркаптанов. *Нефтепереработка и нефтехимия*. 2010;9:39–41. [Mullakaev MS, Asylbaev DF, Oganyan GB, et al. Ultrasonic intensification of the process of catalytic oxidation of mercaptans. *Oil refining and petrochemicals*. 2010;9:39–41 (In Russ.)].
10. Аллоберганова АМ, Юнусов ОК, Ачилова СС и др. Интенсификация процесса обезжиривания отработанного никелевого катализатора гидрогенизации жиров. *Химическая технология*. 2023;12(117):48–52. [Alloberganova AM, Yunusov OK, Achilova SS, et al. Hydrogenation of vegetable oils using effectively regenerated catalyst. *Chemical technology*. 2023;12(117):48–52 (In Russ.)]. DOI: 10.32743/UniTech.2023.117.12.16552.
11. Аллоберганова АМ, Юнусов ОК, Ачилова СС и др. Гидрирование растительных масел с эффективным использованием регенерированного катализатора. *Химическая технология*. 2023;12(117):53–6. [Alloberganova AM, Yunusov OK, Achilova SS, et al. Intensification of the fat recovering process of spent nickel fat hydrogenation catalyst. *Chemical technology*. 2023;12(117):53–6 (In Russ.)]. DOI: 10.32743/UniTech.2023.117.12.16507.
12. Wang T, Le T, Ravindra AV, et al. Enhanced regeneration of spent FCC catalyst by using oxalic acid-sulfuric acid mixture under ultrasonic irradiation. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;15:7085–99. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.11.126.
13. Oza R, Shah N, Patel S. Recovery of nickel from spent catalysts using ultrasonication-assisted leaching. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2011;86(10):1276–81. DOI: 10.1002/jctb.2649.
14. Feng CL, Zhang C, Yuan SH, et al. Sustainable recovery of surface-deposited oils and valuable metals from uncrushed spent hydroprocessing catalysts. *Journal of Cleaner Production*. 2022;338:130564. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130564.
15. Lim MSW, Yang TCK, Yap YH, et al. Intensification and optimisation of nickel recovery from spent hydrogenation catalysts via ultrasound-augmented hydrometallurgy. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021;9:105771. DOI: 10.1016/j.jece.2021.105771.
16. Патент BY № 17007, 30.04.2013. Способ переработки отработанных ванадиевых катализаторов сернокислотного производства / Орехова СЕ, Крышилович ЕВ, Курило ИИ. [Patent BY № 17007, 30.04.2013. Method for processing spent vanadium catalysts from sulfuric acid production / Orekhova SE, Kryshilovich EV, Kurilo II. (In Russ.)].
17. Marafi M, Stanislaus A. Waste catalyst utilization: Extraction of valuable metals from spent hydroprocessing catalysts by ultrasonic-assisted leaching with acids. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2011;50(16):9495–501. DOI: 10.1021/ie200789u.
18. Pinto ISS, Soares HMVM. Selective leaching of molybdenum from spent hydrosulphurisation catalysts using ultrasound and microwave methods. *Hydrometallurgy*. 2012;129:19–25. DOI: 10.1016/j.hydromet.2012.08.008.

19. Wang L, Chao L, Qu WW, et al. Ultrasound-assisted Oil removal of gamma-Al₂O₃-based spent hydrosulfurization catalyst and Microwave roasting recovery of metal Mo. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018;49:24-32. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.05.023.
20. Краснобабцев МА, Гавриченко НВ, Бояринцев АВ и др. Карбонатное выщелачивание молибдена из отработанного катализатора гидроочистки. *Успехи в химии и химической технологии*. 2018;XXXII(9):51-3. [Krasnobabcev MA, Gavrichenko NV, Boyarintsev AV, et al. Carbonate leaching of molybdenum from spent hydrotreatment catalyst. *Advances in chemistry and chemical technology*. 2018;XXXII(9):51-3 (In Russ.)]
21. Hosseinzadeh F, Rastegar SO, Ashengroph M, et al. Ultrasound-assisted Fenton-like reagent to leach precious metals from spent automotive catalysts: process optimization and kinetic modeling. *The International Journal of Environmental Science and Technology*. 2021;18(11):3449-58. DOI: 10.1007/s13762-021-03324-z.
22. Sadeghi SM, Jesus J, Pinto E, et al. A simple, efficient and selective process for recycling La (and Al) from fluid cracking catalysts using an environmentally friendly strategy. *Minerals Engineering*. 2020;156:106375. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106375.
23. Vyas S, Ting Y. Effect of ultrasound on bioleaching of hydrosulphurization spent catalyst. *Environmental Technology & Innovation*. 2019;14:100310. DOI: 10.1016/j.eti.2019.01.004.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Валентин Алексеевич Иодис –

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник.
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Научно-исследовательский геотехнологический центр
Дальневосточного отделения Российской академии наук
(НИИГТЦ ДВО РАН), 683002, г. Петропавловск-Камчатский,
Российская Федерация, e-mail: iodisva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8002-0658>

Информация о статье

Поступила в редакцию: 30.04.2025.

Поступила после рецензирования: 05.06.2025.

Принята к публикации: 17.06.2025.

Article info

Received: 30.04.2025.

Revised: 05.06.2025.

Accepted: 17.06.2025.

ABOUT THE AUTHOR

Valentin A. Iodis –

Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Research
Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian
Academy of Sciences, 683002, Petropavlovsk-Kamchatsky,
Russian Federation, e-mail: iodisva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8002-0658>