

## УТИЛИЗАЦИЯ ОПАСНЫХ ШЛАМОВ ЛИТИФИКАЦИЕЙ ОПОКАМИ

Вурдова Н.Г., Куликова Е.Ю.

НИТУ «МИСиС»,  
Москва, Ленинский проспект, 4,  
e-mail: nadya\_vurdova@mail.ru, fragranet@mail.ru

**Аннотация.** В современных технологиях водоочистки сорбционные методы играют ключевую роль, позволяя удалять токсичные компоненты из сточных вод. Наиболее часто используемым адсорбентом является активированный уголь, однако его высокая стоимость и сложность утилизации ограничивают применение в процессах с большой водоемкостью. Природные дисперсные кремнеземы, такие как опока, представляют собой эффективную и экологически безопасную альтернативу. Настоящая статья посвящена изучению безопасного способа утилизации отработанного адсорбента на основе кремнезема методом литификации. Приводятся результаты анализа химического состава отработанных материалов, механизма капсулирования токсичных компонентов и их последующего использования в качестве вторичного материального ресурса (ВМР). Для повышения эффективности опоки как сорбента или компонента в процессах утилизации отходов, можно использовать различные добавки. Эти добавки улучшают сорбционные, механические и химические свойства материала. Рассматриваются международные подходы к решению данной задачи. Приводятся сравнительные данные с другими способами утилизации.

**Предмет исследования:** методы утилизации отработанных адсорбентов после очистки сточных вод. Исследование направлено на разработку экологически безопасного способа утилизации отработанного адсорбента на основе дисперсных кремнезёмов отечественных месторождений, с акцентом на использование метода литификации для нейтрализации токсичных компонентов и получения вторичных материальных ресурсов.

**Материалы и методы.** Исследования проводились с опоками, Каменноржского месторождения, Астраханской области. Применялись как аналитические, так и расчетные методы, основанные на использовании формул процессов реагентного капсулирования. Расчетным методом определен класс опасности литифицированных образцов.

**Результаты.** Установлено, что дисперсные кремнеземы, в том числе опоки, широко применяются в качестве сорбционного материала для извлечения ионов тяжелых металлов, нефтепродуктов и других опасных экотоксикантов. Для повышения эффективности используются различные добавки, в частности, оксиды и гидроксиды щелочных и щелочноземельных металлов. Определен химический состав отработанного адсорбента и подобрана оптимальная рецептура компонентов смеси для снижения класса опасности отхода.

**Выводы.** Метод литификации позволяет эффективно утилизировать отработанный адсорбент, инкапсулируя токсичные компоненты в стабильных карбонатных и силикатных оболочках. Литифицированный материал может быть использован в строительной отрасли, для отсыпки дорог, котлованов, что снижает экологическую нагрузку и соответствует принципам устойчивого развития.

**Ключевые слова:** дисперсные кремнеземы, опока, сорбционная очистка сточных вод, утилизация адсорбента, литификация, сточные воды, вторичный материальный ресурс.

## ВВЕДЕНИЕ

Вода - ключевой ресурс для всех отраслей промышленности и сельского хозяйства. Однако загрязнение водоемов сточными водами, содержащими нефтепродукты, тяжелые металлы и органические токсиканты, остается одной из наиболее серьезных экологических проблем XXI века. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), более 80% сточных вод в развивающихся странах сбрасываются в окружающую среду без очистки. Из доклада Минприроды «О состоянии и об охране окружающей среды РФ в 2022 году» следует, что основное потребление воды и ее загрязнение связаны с энергетикой и сельским хозяйством. Однако добыча полезных ископаемых (кроме нефти и газа) и металлургическая отрасли являются следующим крупнейшим как потребителем, так и наиболее сильным загрязнителем водных ресурсов: более 2 900 млн.м<sup>3</sup> в год забирается из различных источников (без учета шахтно-рудничных вод), а сбрасывается в поверхностные водоемы более 1 900

млн.м<sup>3</sup> стоков и половина из них без очистки. Поэтому вопросы рационального использования водных ресурсов весьма актуальны для предприятий отрасли.

Одним из наиболее эффективных способов очистки воды является сорбционный метод с использованием природных и искусственных адсорбентов. Наиболее распространенным материалом считается активированный уголь, обладающий высокой сорбционной способностью [1,2]. Однако его применение ограничивается высокой стоимостью и сложностью регенерации. В последние годы значительное внимание уделяется альтернативным природным адсорбентам, таким как дисперсные кремнеземы. Эти материалы отличаются доступностью, низкой стоимостью и достаточно высокой сорбционной емкостью, что делает их привлекательными для очистки сточных вод в больших объемах, о чем сообщается в работах как отечественных [3-5], так и зарубежных авторов [6-8]. Кроме того, опоки используются при литификации опасных шламов, содержащих тяжелые металлы и нефтепродукты.

Целью данной статьи является разработка экологически безопасного способа утилизации отработанного адсорбента на основе дисперсных кремнеземов отечественных месторождений, с акцентом на использование метода литификации для нейтрализации токсичных компонентов и получения вторичных материальных ресурсов.

Постановка задачи исследования. Для повышения эффективности опоки как сорбента или компонента в процессах утилизации отходов, можно использовать различные добавки. Эти добавки улучшают сорбционные, механические и химические свойства материала. Однако выбор добавок как правило, зависит от состава обрабатываемых отходов и конечных целей, например, минимизация класса опасности или подготовка к повторному использованию в качестве вторичного материального ресурса (ВМР) [19, 20].

### АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Из проведенного сравнительного анализа международного опыта следует, что литификации опасных отходов с использованием извести и дисперсных кремнеземов (опоки, диатомитов, трепела) является достаточно распространенной практикой. В частности, в странах ЕС метод литификации часто применяется для нейтрализации отходов горнодобывающей отрасли. Например, в [9] подробно ознакомиться с исследованиями, проведенные Институтом устойчивых технологий (Германия), которые подтверждают эффективность этого подхода для инкапсуляции тяжелых металлов и других опасных ингредиентов.

Авторами [10] получены удовлетворительные результаты по литификации промышленных шламов, содержащих ионы тяжелых металлов:  $Pb^{2+}$  - 120 мг/кг,  $Zn^{2+}$  - 95 мг/кг,  $Cr^{3+}$  - 85 мг/кг, нефтепродукты - 40 000 мг/кг, влажностью 35%. Использовалась смесь опоки и оксида кальция (CaO) в соотношении 1:0,8. Добавлялось 20% воды для гашения извести. После литификации

проводилась сушка при температуре 60 °С для стабилизации капсул. После обработки отходы классифицированы как неопасные (класс опасности V по международной классификации ЕС, Директива 2008/98/ЕС.); концентрация тяжелых металлов в водных вытяжках снизилась до <0,1 мг/л.

В исследовании [11] путем литификации нефтесодержащих шламов получен ВМР для изготовления бетонных блоков. В составе отхода присутствовали: полярные углеводороды - 150 000 мг/кг, тяжелые металлы:  $Ni^{2+}$  - 45 мг/кг,  $Cd^{2+}$  - 28 мг/кг,  $Cu^{2+}$  - 38 мг/кг; большое количество сульфидов и сернистых соединений - 12000 мг/кг. Смесь опоки и кальция (1:1) применялась для стабилизации шлама. Образцы смешивались с водой и подвергались механическому перемешиванию для увеличения контакта. Через 48 часов реакция завершалась, и образцы сушились на воздухе. После обработки отходы были отнесены к IV классу опасности. Уровень вымываемости тяжелых металлов снизился на 95%, углеводородов - на 98%.

При литификации золы уноса (состав отхода: тяжелые металлы:  $Hg^{2+}$  - 12 мг/кг,  $As^{3+}$  - 30 мг/кг,  $Pb^{2+}$  - 50 мг/кг; кремнезема 40% состава золы; остаточная сера: 15%) авторами [12] получен ВМР, который применили в дорожном строительстве. В составе золы уже присутствовал кремнезем, что позволило минимизировать добавление опоки. Соотношение опока : оксид кальция составляло 0,5:1. В смесь добавлялось до 25% воды, после окончания реакции осуществлялась сушка при 80 °С для достижения полной стабилизации. Класс опасности отходов снизился с III до IV. Концентрация ртути ( $Hg^{2+}$ ) в вытяжке уменьшилась до 0,05 мг/л, что соответствует стандартам Китая (GB/T 5085.3-2007).

В исследованиях [13, 14] получены данные по применению дисперсных кремнеземов для обезвреживания шламов от процессов обогащения руд. В таблицах 1 и 2 представлены отдельные результаты.

**Таблица 1.** Обезвреживание шламов обогащения руд

**Table 1.** Decontamination of ore dressing sludge

Параметр	До обработки	После обработки (опока)	Снижение (%)
Ионы свинца ( $Pb^{2+}$ ), мг/л	15,2	0,8	94,7
Ионы цинка ( $Zn^{2+}$ ), мг/л	42,5	3,1	92,7
Ионы меди ( $Cu^{2+}$ ), мг/л	12,3	0,9	92,7
Общая токсичность ( $LK_{50}$ )*, %	45	5	88,9

\* $LK_{50}$  – летальная концентрация 50% для водных организмов.

**Таблица 2.** Обработка хвостов обогащения

**Table 2.** Treatment of tailings

Параметр	До обработки	После обработки (опока)	Снижение (%)
Ионы кадмия ( $Cd^{2+}$ ), мг/л	8,6	0,4	95,3
Ионы мышьяка ( $As^{3+}$ ), мг/л	11,5	0,7	93,9
Токсичные органические соединения, мг/л	25,3	1,2	95,3
Остаточные ценные металлы (Au), мг/л	0,9	0,3	66,7

Представленные примеры, основанные на зарубежных сорбентах, демонстрируют гибкость применения опоки для литификации отходов, где состав исходных материалов и методы обработки определяют конечный класс опасности и возможное повторное использование.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Опока, используемая в данном исследовании, представляет собой природный материал, состоящий более чем на 80% из кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ). Каменноюрская опока (Астраханская область, Россия) была выбрана в качестве основного объекта исследования благодаря высоким адсорбционным и фильтрующим свойствам [15].

Основные физико-химические характеристики исследуемого материала: удельная поверхность - 91,41-158,66  $\text{м}^2/\text{г}$ ; суммарный объем пор - 1,31  $\text{см}^3/\text{г}$ ; средний диаметр пор - 9,5 нм.

Метод очистки сточных вод. Для очистки сточных вод использовалась адсорбционная технология, основанная на пропускании воды через фильтрующую загрузку из опоки. Эксперименты проводились на реальных образцах сточных вод, содержащих тяжелые металлы (Zn, Cu, Cr) и нефтепродукты.

Утилизация отработанного адсорбента. Для утилизации отработанной опоки применялся метод литификации [16,17]. Основная цель - инкапсулировать токсичные вещества, предотвращая их вымывание в окружающую среду, и подготовить материал для повторного использования. Процесс включал следующие этапы: 1) добавление оксида кальция ( $\text{CaO}$ ) и воды; 2) проведение экзотермической реакции с образованием гидроксида кальция ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ); 3) инкапсуляция токсичных компонентов в карбонатных и силикатных оболочках.

Для повышения эффективности опоки как сорбента или компонента в процессах утилизации отходов, можно использовать различные добавки. Эти добавки улучшают сорбционные, механические и химические свойства материала. Наиболее распространенными являются:

Щелочные добавки, кроме негашеной извести это могут быть гидроксид натрия ( $\text{NaOH}$ ) или калия (KOH). Добавление этих компонентов повышает скорость литификации за счет более интенсивных экзотермических реакций; увеличивает инкапсуляцию ионов тяжелых металлов, образуя нерастворимые гидроксиды и карбонаты; снижает подвижность металлов в литифицированных отходах.

Органические полимеры: полиакриламид, катионные полиэлектролиты, полиэтиленгликоль. Внесение компонентов увеличивает механическую прочность капсул, формируемых в процессе литификации; снижает вероятность вымывания токсичных веществ в окружающую среду;

улучшают адгезию между частицами опоки и капсулирующим материалом.

Внесение гидрофобизирующих добавок, таких как технические жиры, воски, парафины, снижают водопроницаемость литифицированного материала, увеличивают устойчивость капсул в условиях высокой влажности.

Зола и отходы ТЭЦ при составлении литифицирующих смесей увеличивают механическую прочность конечного продукта; способствуют упрочнению капсул за счет взаимодействия кремнезема с щелочами и образования силикатов кальция; снижают стоимость обработки, так как эти добавки часто являются отходами.

Поверхностно-активные вещества (ПАВ), неионогенные или катионные ПАВ, такие как Triton X-100, аммониевые соли при внесении в смесь улучшают взаимодействие опоки с органическими загрязнителями, особенно с углеводородами; повышают степень адсорбции сложных органических соединений, таких как ПАВ и масла.

Добавки минеральных модификаторов: бентонитов, цеолитов, глины повышают сорбционную способность благодаря своей пористой структуре; обеспечивают дополнительную устойчивость к вымыванию токсичных компонентов.

Практическая комбинация тех или иных добавок позволяет добиться максимальной эффективности. Например, сочетание  $\text{CaO}$  и золы улучшает прочностные характеристики капсулированных металлов, а добавление наноматериалов и ПАВ повышает сорбционную способность опоки к органическим загрязнителям [18].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

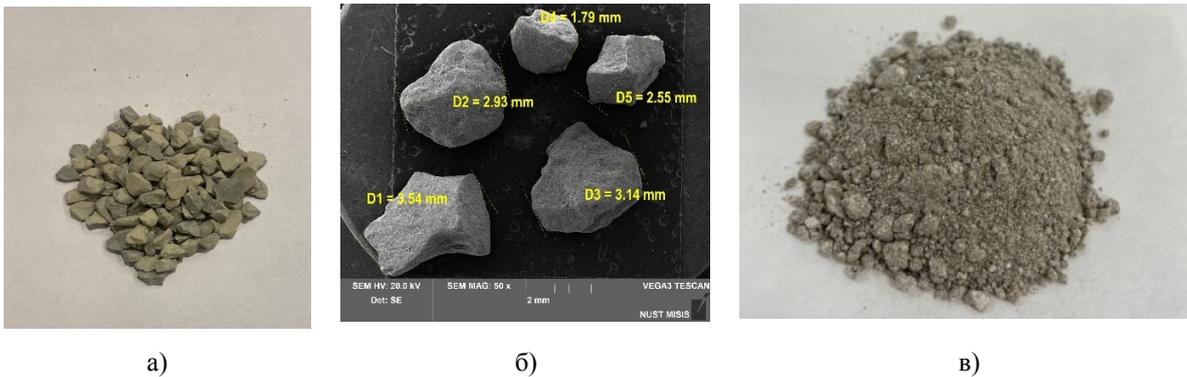
*Сорбционная емкость опоки.* Эксперименты показали, что опока эффективно удаляет из сточных вод тяжелые металлы и нефтепродукты. Максимальная сорбционная емкость для меди ( $\text{Cu}^{2+}$ ) составила 30  $\text{мг}/\text{г}$ , для цинка ( $\text{Zn}^{2+}$ ) - 35  $\text{мг}/\text{г}$ . Эффективность удаления нефтепродуктов из сточных вод достигала 97%, что сопоставимо с характеристиками активированного угля.

*Химический состав отработанного адсорбента.* Химический анализ показал наличие в отработанной опоке тяжелых металлов и углеводов. Основные результаты приведены в таблице 3.

*Процесс литификации.* В ходе процесса литификации образовывались стабильные капсулы из карбоната и силиката кальция. Эксперименты показали, что оптимальное соотношение оксида кальция и опоки составляет 1:1, 0,9:1. Образцы с этим соотношением демонстрировали наилучшую механическую прочность и минимальную вымываемость загрязнителей. На рис.1. представлена фотография литифицированного образца, который представляет собой рассыпчатую, порошкообразную, сухую смесь.

**Таблица 3.** Химический состав отработанного адсорбента  
**Table 3.** Chemical composition of spent adsorbent

Компонент	Содержание, мг/кг
SiO <sub>2</sub>	781 100
CaO	35 600
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33 612
Zn <sup>2+</sup>	109
Cr <sup>3+</sup>	102
Cu <sup>2+</sup>	61
Нефтепродукты	57 230



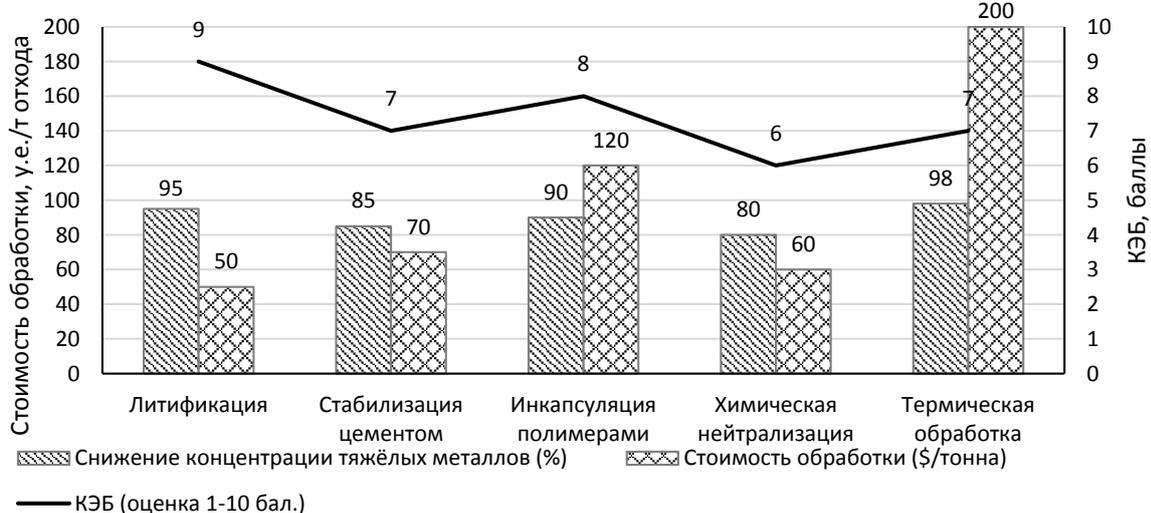
**Рис.1.** Адсорбент для очистки сточных вод: а) исходный материал; б) его микрофотография; в) литифицированный образец отработанного адсорбента

**Fig.1.** Adsorbent for wastewater treatment: a) initial material; b) its microphotography; c) lithified sample of spent adsorbent

**Экологическая безопасность.** Для оценки экологической безопасности литифицированных образцов проводились тесты на вымываемость. Концентрации тяжелых металлов и углеводов в водных вытяжках находились значительно ниже предельно допустимых значений, установленных ГОСТ 30772-2001. Расчет класса опасности, выполненный согласно методике для оценки «Критериев отнесения опасных отходов к классам опасности для окружающей природной среды» показал, что отработанный адсорбент относится к III опасности, а после проведенной литификации стал IV класса, его показатель степени опасности  $K_i = 41,9$ .

Эти данные подчеркивают эффективность опки в снижении концентрации тяжелых металлов и органических загрязнителей, что делает шламы менее опасными для окружающей среды и пригодными для дальнейшего использования.

Кроме метода литификации возможны другие способы обезвреживания промышленных отходов [21-24]. На рис.2 представлен анализ известных способов по таким показателям, как стоимость обработки, эффективность извлечения пиллюантов, а также авторская экспертная оценка по коэффициенту экологической безопасности, КЭБ, учитывающему совокупность факторов (затраты электроэнергии, воды, реагентов, возможность повторного использования в качестве ВМР).



**Рис.2.** Сравнение методов обезвреживания промышленных отходов, содержащих тяжелые металлы  
**Fig.2.** Comparison of methods for neutralization of industrial waste containing heavy metals

Из данных рис.2 можно отметить достаточно высокую эффективность применения опоки в процессах литификации (до 95% по ионам тяжелых металлов), а стоимость обработки является самой низкой из анализируемых методов. При этом полученный в нашем исследовании класс опасности обработанного образца позволяет рекомендовать полученный материал, как технический грунт для на месте образования отхода, например, на руднике, вместо вывоза на полигон для промышленных отходов.

## ВЫВОДЫ

Дисперсные кремнеземы, такие как опока, являются экономически выгодными и экологически безопасными адсорбентами для очистки сточных вод в больших объемах.

Метод литификации позволяет эффективно утилизировать отработанный адсорбент, инкапсулируя токсичные компоненты в стабильных карбонатных и силикатных оболочках. Литифицированный материал может быть использован в строительной отрасли, для отсыпки дорог, котлованов, что снижает экологическую нагрузку и соответствует принципам устойчивого развития.

Международный опыт подтверждает высокую применимость технологии для решения задач водоочистки и утилизации отходов.

В дальнейшем планируется изучение модифицированных добавок, таких как гидрофобизаторы и активированные кремнеземы, для повышения стабильности и функциональности литифицированных продуктов. Также актуально проведение технико-экономического анализа для масштабирования технологии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Когановский, А. М., Клименко Н. А., Левченко Т. М., Рода И. Г. Адсорбция органических веществ из воды. Л.: Химия, 1990. 256 с.
2. Amari A, Noreen A, Osman H, Sammen S S, Al-Ansari N and Salman HM (2023). Investigation of the viable role of oil sludge-derived activated carbon for oily wastewater remediation. *Front. Environ. Sci.* 11:1138308. doi: 10.3389/fenvs.2023.1138308.
3. A. K. Strelkov, P. G. Bykova, M. A. Gridneva. Filtration materials of natural origin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. V. 962. №. 2. P. 022-038.
4. Климов Е. С., Бузаева М. С. Природные сорбенты и комплексоны в очистке сточных вод. Ульяновск: УлГТУ, 2011. 201 с.
5. Убаскина Ю. А., Коростелева Ю. А. Исследование возможности практического применения диатомита для очистки сточных вод // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №7. С.92-96. DOI: 10.12737/article\_5940f0199950b7.10091901.
6. Mullick A, Neogi S. Ultrasound assisted synthesis of Mg-Mn-Zr impregnated activated carbon

for effective fluoride adsorption from water. // *Ultrasonics - Sonochemistry*. 2019;50:126-137. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.09.010.

7. Pytka-Woszczyło A, Różańska-Boczula M, Gizińska-Górna M, Marzec M, Listosz A, Józwiakowski K. Efficiency of Filters Filled with Rockfos for Phosphorus Removal from Domestic Sewage. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2022;16(4):176-188. doi:10.12913/22998624/152527.

8. Shrestha, R.; Ban, S.; Devkota, S.; Sharma, S.; Joshi, R.; Tiwari, A.P.; Hak, Y.K.; Joshi, M. K. Technological trends in heavy metals removal from industrial wastewater. *J. Environ. Chem. Eng.* 2021, 9, 105688.

9. Boelsing, F. Remediation of toxic waste sites – DCR technology in the field of immobilization and fixation of hazardous compounds. Hannover, Germany: Ministry of Economics, Technology and Traffic, Federal Republic of Germany.1988.

10. Shiqing Gu, Xiaonan Kang, Lan Wang, Eric Lichtfouse, Chuanyi Wang. Clay mineral adsorbents for heavy metal removal from wastewater: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 2019, 17 (2), pp.629-654. 10.1007/s10311-018-0813-9. hal-02142607.

11. Tran Huyen Vu, Nadarajah Gowripala. Mechanisms of Heavy Metal Immobilisation using Geopolymerisation Techniques. // *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2018, Volume 16, Issue 3, pp. 124-135. <https://doi.org/10.3151/jact.16.124>,

12. Katri Piekari, Hoang Nguyen, Katja Kilpimaa, Mirja Illikaine., Ladle slag-based binder for the solidification/stabilization of heavy-metal-rich industrial waste // *Journal of Environmental Management*, V. 367, 2024,121956, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121956>.

13. D. Boriskov., S. Efremova, N. Komarova, E. I. Tikhomirova, A. Bodrov. (2021). Applicability of the modified diatomite for treatment of wastewater containing heavy metals. *E3S Web Conf.*, 247 (2021) 01052. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124701052>

14. ElSayed, E. E. (2018). Natural diatomite as an effective adsorbent for heavy metals in water and wastewater treatment (a batch study). // *Water Science*, 32(1), pp. 32–43. <https://doi.org/10.1016/j.wsj.2018.02.001>.

15. Вурдова Н. Г. Исследование применения дисперсных кремнеземов для сорбционной очистки сточных вод // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. -2024. №2(95). -С.126-133.

16. El-Eswed, B. I., Yousef, R. I., Alshaaer, M., Hamadneh, I., Al-Gharabli, S. I., Khalili, F., (2015). Stabilization/solidification of heavy metals in kaolin/zeolite based geopolymers. *International Journal of Mineral Processing*, 137, 34-42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2015.03.002>.

17. Рудник М. И., Гаврилов Ю. Л., Резанова Е. Е. Технологии и оборудование ТЭК: Технологически-аппаратурные условия создания и применения комплексной переработки опасных отходов с использованием технологии «DCR процесс» // Экологический вестник России. 2012. №2. С. 36-43.
18. Шпинькова М. С., Мещеряков С. В. Реагентное капсулирование нефтяных отходов с применением конечных продуктов технологии в качестве товарной продукции // Экология и промышленность России. 2013. № 12. С. 20–23.
19. Bayar, S., Talinli, İ. Solidification/stabilization of hazardous waste sludge obtained from a chemical industry. *Clean Techn Environ Policy* 15, 157–165 (2013). <https://doi.org/10.1007/s10098-012-0494-1>
20. Falayi, T. Sustainable solidification of ferrochrome slag through geopolymerisation: a look at the effect of curing time, type of activator and liquid solid ratio. // *Sustain Environ. Res*/ 29, 21 (2019). <https://doi.org/10.1186/s42834-019-0022-7>.
21. Boelsing, F. Remediation of toxic waste sites – DCR technology in the field of immobilization and fixation of hazardous compounds. Hannover, Germany: Ministry of Economics, Technology and Traffic, Federal Republic of Germany.1988.
22. Shiqing Gu, Xiaonan Kang, Lan Wang, Eric Lichtfouse, Chuanyi Wang. Clay mineral adsorbents for heavy metal removal from wastewater // *Environmental Chemistry Letters*, 2019, 17 (2), pp.629-654. [10.1007/s10311-018-0813-9](https://doi.org/10.1007/s10311-018-0813-9). hal-02142607.
23. Tran Huyen Vu, Nadarajah Gowripalan, Mechanisms of Heavy Metal Immobilization using Geopolymerisation Techniques. // *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2018, Volume 16, Issue 3, pp 124-135. <https://doi.org/10.3151/jact.16.124/>
24. Bin Guo, Bo Liu, Jian Yang, Shengen Zhang, The mechanisms of heavy metal immobilization by cementitious material treatments and thermal treatments. // *Journal of Environmental Management*, V. 193, 2017, pp 410-422, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.026>.
5. Ubaskina Yu. A., Korosteleva Yu. A. Study of the possibility of practical application of diatomite for wastewater treatment // *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017. №7. С.92-96. DOI: [10.12737/article\\_5940f0199950b7.10091901](https://doi.org/10.12737/article_5940f0199950b7.10091901).
6. Mullick A, Neogi S. Ultrasound assisted synthesis of Mg-Mn-Zr impregnated activated carbon for effective fluoride adsorption from water. // *Ultrasonics - Sonochemistry*. 2019;50:126-137. DOI: [10.1016/j.ultsonch.2018.09.010](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.09.010).
7. Pytka-Woszczyło A, Różańska-Boczula M, Gizińska-Górna M, Marzec M, Listosz A, Józwiakowski K. Efficiency of Filters Filled with Rockfos for Phosphorus Removal from Domestic Sewage. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2022;16(4):176-188. doi:[10.12913/22998624/152527](https://doi.org/10.12913/22998624/152527).
8. Shrestha, R.; Ban, S.; Devkota, S.; Sharma, S.; Joshi, R.; Tiwari, A.P.; Hak, Y.K.; Joshi, M. K. Technological trends in heavy metals removal from industrial wastewater. *J. Environ. Chem. Eng.* 2021, 9, 105688.
9. Boelsing, F. Remediation of toxic waste sites – DCR technology in the field of immobilization and fixation of hazardous compounds. Hannover, Germany: Ministry of Economics, Technology and Traffic, Federal Republic of Germany.1988.
10. Shiqing Gu, Xiaonan Kang, Lan Wang, Eric Lichtfouse, Chuanyi Wang. Clay mineral adsorbents for heavy metal removal from wastewater: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 2019, 17 (2), pp.629-654. [10.1007/s10311-018-0813-9](https://doi.org/10.1007/s10311-018-0813-9). hal-02142607.
11. Tran Huyen Vu, Nadarajah Gowripala. Mechanisms of Heavy Metal Immobilisation using Geopolymerisation Techniques. // *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2018, Volume 16, Issue 3, pp. 124-135. <https://doi.org/10.3151/jact.16.124>,
12. Katri Piekari, Hoang Nguyen, Katja Kilpimaa, Mirja Illikaine., Ladle slag-based binder for the solidification/stabilization of heavy-metal-rich industrial waste // *Journal of Environmental Management*, V. 367, 2024,121956, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121956>.
13. D. Boriskov., S. Efremova, N. Komarova, E. I. Tikhomirova, A. Bodrov. (2021). Applicability of the modified diatomite for treatment of wastewater containing heavy metals. *E3S Web Conf.*, 247 (2021) 01052. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124701052>
14. ElSayed, E. E. (2018). Natural diatomite as an effective adsorbent for heavy metals in water and wastewater treatment (a batch study) // *Water Science*, 32(1), pp. 32–43. <https://doi.org/10.1016/j.wsj.2018.02.001>.
15. Vurdova N. G. Research of dispersed silica application for sorption treatment of wastewater // *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. -2024. №2(95). -P.126-133.

## REFERENCES

16. El-Eswed, B. I., Yousef, R. I., Alshaaer, M., Hamadneh, I., Al-Gharabli, S. I., Khalili, F., (2015). Stabilization/solidification of heavy metals in kaolin/zeolite based geopolymers. *International Journal of Mineral Processing*, 137, 34-42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2015.03.002>.
17. Rudnik M. I., Gavrilov Y. L., Rezanova E. E. Technologies and equipment of fuel and energy complex: Technological and hardware conditions for the creation and application of complex processing of hazardous waste using the technology "DCR process" // *Ecological Bulletin of Russia*. -2012. №2. - p. 36-43.
18. Shpinkova M. S., Meshcheryakov S. V. Reagent encapsulation of oil wastes with the use of end products of the technology as a marketable product reagent encapsulation of oil wastes with application of end products of the technology as marketable products // *Ecology and Industry of Russia*. - 2013. № 12. -p. 20-23.
19. Bayar, S., Talinli, İ. Solidification/stabilization of hazardous waste sludge obtained from a chemical industry. *Clean Techn Environ Policy* 15, 157–165 (2013). <https://doi.org/10.1007/s10098-012-0494-1>
20. Falayi, T. Sustainable solidification of ferrochrome slag through geopolymerisation: a look at the effect of curing time, type of activator and liquid solid ratio. // *Sustain Environ. Res* 29, 21 (2019). <https://doi.org/10.1186/s42834-019-0022-7>.
21. Boelsing, F. Remediation of toxic waste sites – DCR technology in the field of immobilization and fixation of hazardous compounds. Hannover, Germany: Ministry of Economics, Technology and Traffic, Federal Republic of Germany.1988.
22. Shiqing Gu, Xiaonan Kang, Lan Wang, Eric Lichtfouse, Chuanyi Wang. Clay mineral adsorbents for heavy metal removal from wastewater // *Environmental Chemistry Letters*, 2019, 17 (2), pp.629-654. [10.1007/s10311-018-0813-9](https://doi.org/10.1007/s10311-018-0813-9). hal-02142607.
23. Tran Huyen Vu, Nadarajah Gowripalan, Mechanisms of Heavy Metal Immobilization using Geopolymerisation Techniques. // *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2018, Volume 16, Issue 3, pp 124-135. <https://doi.org/10.3151/jact.16.124>,
24. Bin Guo, Bo Liu, Jian Yang, Shengen Zhang, The mechanisms of heavy metal immobilization by cementitious material treatments and thermal treatments. // *Journal of Environmental Management*, V. 193, 2017, pp 410-422, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.026>.

## DISPOSAL OF HAZARDOUS SLUDGE BY LITHIFICATION WITH OPOKA

Vurdova N.G., Kulikova E.Yu.

National University of Science and Technology «MISiS»,  
Moscow, Russia, Leninski av.,4  
e-mail: [nadya\\_vurdova@mail.ru](mailto:nadya_vurdova@mail.ru), [fragranet@mail.ru](mailto:fragranet@mail.ru)

**Annotation.** In modern water treatment technologies, sorption methods play a key role in removing toxic components from wastewater. The most commonly used adsorbent is activated carbon, but its high cost and difficulty of disposal limit its use in water-intensive processes. Natural dispersed silica, such as opoka, provides an efficient and environmentally friendly alternative. The present paper is devoted to the study of a safe method of utilization of spent silica-based adsorbent by lithification method. The results of the analysis of the chemical composition of spent materials, the mechanism of encapsulation of toxic components and their subsequent use as a secondary material resource (SMR) are given. Various additives can be used to improve the effectiveness of opoka as a sorbent or component in waste management processes. These additives improve the sorption, mechanical and chemical properties of the material. International approaches to this task are reviewed. Comparative data with other disposal methods are given.

**Subject:** methods of utilization of spent adsorbents after wastewater treatment. The research is aimed at developing an environmentally safe method of utilization of spent adsorbent based on dispersed silica from domestic deposits, with an emphasis on the use of lithification method to neutralize toxic components and obtain secondary material resources.

**Materials and methods.** Both analytical and calculated methods based on the use of heat transfer processes were used.

**Results.** It has been established that dispersed silica, including opoks, are widely used as sorption materials for the extraction of heavy metal ions, oil products and other dangerous ecotoxicants. Various additives, in particular, oxides and hydroxides of alkali and alkaline-earth metals are used to increase efficiency. The chemical composition of spent adsorbent was determined and the optimal formulation of mixture components was selected to reduce the hazard class of the waste.

**Conclusions.** Lithification method allows efficient utilization of spent adsorbent, encapsulating toxic components in stable carbonate and silicate shells. The lithified material can be used in the construction industry, for backfilling roads, excavations, which reduces the environmental load and complies with the principles of sustainable development.

**Key words:** dispersed silica, opoka, sorption wastewater treatment, adsorbent utilization, lithification, wastewater, secondary material resource.