

Статья поступила в редакцию: 21.07.2026

Статья принята к публикации: 26.07.2026

Статья опубликована: 07.08.2026

УДК 628.3+661.8+546.81

DOI: 10.32743/UniChem.2026.146.8.23238

Влияние технологических параметров на формирование прочности образцов демеркуризированного ртутьсодержащего угольного отхода катализатора

Хакимов Саид Сувонович

начальник

отдела технологий, инноваций и локализации АО Навоиазот

Республика Узбекистан, г. Навои

Вафоев Мухаммадали Мирзоевич

заместитель председателя правления АО Навоиазот

Республика Узбекистан, г. Навои

E-mail: vafoeyevmukhammadali@gmail.com

Бобокулов Акбар Носирович

доц. Ташкентский химико-технологический институт

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: kafedranmkt@mail.ru

Туракулов Бехзод Бегматович

доц. Ташкентский химико-технологический институт

Республика Узбекистан, г. Ташкент

Эркаев Актам Улашевич

проф.

Ташкентский химико-технологический институт

Республика Узбекистан, г. Ташкент

Каршибоев Музаффар

докторант

Ташкентский химико-технологический институт

Республика Узбекистан, г. Ташкент

Influence of technological parameters on the strength of demercurized ruth-containing coal waste catalysts

Khakimov Said Suvonovich

*Head of the Department of Technology, Innovation and Localization at Navoiyazot JSC
Republic of Uzbekistan, Navoi – 5*

Vafojev Mukhammadali Mirzoyevich

*Deputy Chairman of the Management Board of Navoiyazot JSC
Republic of Uzbekistan, Navoi – 5*

Bobokulov Akbar Nosirovich

*Associate Professor
of the Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent*

Turakulov Behzod Begmatovich

*Associate Professor
of the Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent*

Erkaev Aktam Ulashevich

*professor
of the Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent*

Qarshiboyev Muzaffar

*Doctoral student
of the Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent*

Аннотация

В работе исследована возможность безопасной утилизации демеркуризованного ртутьсодержащего угольного отхода катализатора (HG Catalyst), образующегося при производстве поливинилхлорида. Предварительно установлено, что содержание ртути в исходном отходе составляет 1,5-2,5 % и она находится преимущественно в виде хлорида ртути (II). Изучено влияние технологических параметров выщелачивания на степень извлечения HgCl_2 (HG Catalyst) в раствор и показано, что при измельчении отхода до размера частиц 0,5 и 0,16 мм степень выщелачивания превышает 80 %. Установлено, что после демеркуризации материал приобретает рыхлую структуру и обладает высокой пылеобразующей способностью, что требует его последующей стабилизации. Исследовано влияние состава связующей композиции на прочность сформованных образцов демеркуризованного ртутьсодержащего угольного отхода катализатора (HG Catalyst). В качестве связующих компонентов использовали песок, цемент и поликарбонат. Определены оптимальные соотношения компонентов композиции, обеспечивающие прочность сформованных образцов 0,88-2,45 МПа, достаточную для их безопасного хранения в открытых шламохранилищах и на полигонах техногенных отходов.

Библиографическое описание: Влияние технологических параметров на формирование прочности образцов демеркуризованного ртутьсодержащего угольного отхода катализатора // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. Хакимов С.С. [и др.]. 2026. 8(146). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23238>

Abstract

The work investigated the possibility of safe disposal of demercurized mercury-containing coal waste of the catalyst (HG Catalyst) generated in the production of polyvinyl chloride. It was previously established that the content of mercury in the initial waste is 1.5 – 2.5 % and it is mainly in the form of mercury (II) chloride. The effect of leaching process parameters on the degree of HgCl_2 (HG Catalyst) extraction into the solution was studied and it was shown that when the waste is crushed to a particle size of 0.5 and 0.16 mm, the degree of leaching exceeds 80 %. It was found that after demercurization, the material acquires a loose structure and has a high dust-forming capacity, which requires its subsequent stabilization. The effect of the composition of the binding composition on the strength of the formed demercurized mercury-containing coal waste of the catalyst (HG Catalyst) samples was studied. Sand, cement, and polycarboxylate were used as binding components. The optimal ratios of the composition components that ensure the strength of the molded samples at 0.88 – 2.45 MPa have been determined.

Ключевые слова: ртутьсодержащий угольный отход катализатора, демеркуризация, выщелачивание, хлорид ртути (II), связующая композиция, цемент, песок, поликарбоксилат, прочность, стабилизация отходов, шламохранилище, экологическая безопасность.

Keywords: mercury-containing carbon catalyst waste, demercurization, leaching, mercury (II) chloride, binding composition, cement, sand, polycarboxylate, strength, waste stabilization, sludge storage, environmental safety.

Введение

Ртутьсодержащие отходы химической промышленности относятся к числу наиболее опасных техногенных отходов вследствие высокой токсичности соединений ртути, их способности к миграции в окружающей среде и накоплению в биологических объектах. Одним из таких отходов является ртутьсодержащий угольный отход катализатора, образующийся при производстве поливинилхлорида (ПВХ). Несмотря на проведение процессов демеркуризации, проблема безопасного обращения с данным видом отходов остается актуальной. После извлечения соединений ртути демеркуризованный материал приобретает рыхлую, высокопористую структуру, характеризуется низкой насыпной плотностью и высокой пылеобразующей способностью, что создает риск вторичного загрязнения окружающей среды при его транспортировании и хранении.[1, 7, 9]

Одним из эффективных способов снижения экологической опасности подобных отходов является их стабилизация путем формирования прочных композиционных материалов с использованием минеральных связующих. Такой подход позволяет уменьшить пылеобразование, повысить механическую прочность материала и обеспечить его безопасное длительное хранение в открытых шламохранилищах и на полигонах техногенных отходов. Однако вопросы выбора состава связующей композиции и определения оптимального соотношения компонентов для формирования демеркуризованного ртутьсодержащий угольный отход катализатора, изучены недостаточно.[6, 10]

В связи с этим целью настоящей работы являлось исследование влияния состава связующей композиции и соотношения ее компонентов с демеркуризированным ртутьсодержащим угольным отходом катализатора на прочностные характеристики сформованных образцов. В качестве компонентов связующей композиции использовали песок и цемент, а в качестве структурообразующей добавки - поликарбоксилат. Изучено влияние соотношения демеркуризированного ртутьсодержащего угольного отхода катализатора (HG Catalyst), и связующей композиции, а также содержания отдельных компонентов связующего на прочность получаемых композиционных материалов. На основании полученных результатов определены оптимальные составы композиций, обеспечивающие прочность образцов до 2,45 МПа, достаточную для их безопасного хранения в открытых шламохранилищах техногенных отходов. Ртутьсодержащие отходы химической промышленности относятся к числу наиболее опасных техногенных отходов, поскольку соединения ртути обладают высокой токсичностью, способностью к биоаккумуляции и длительному сохранению в окружающей среде. Особую экологическую опасность представляют отработанные ртутьсодержащие катализаторы производства поливинилхлорида (ПВХ), содержащие хлорид ртути (HgCl_2), который легко переходит в водную среду и может загрязнять почву и атмосферный воздух. В последние годы большое внимание уделяется разработке экологически безопасных технологий демеркуризации подобных отходов. Наиболее эффективными считаются методы кислотного и солевого выщелачивания, позволяющие извлекать более 80–95 % растворимых соединений ртути с последующей химической нейтрализацией и стабилизацией остатка. После удаления ртути остаточный углеродный материал сохраняет высокую дисперсность и низкую механическую прочность, вследствие чего требует дополнительной стабилизации перед длительным хранением или дальнейшей переработкой. [2–5, 8]

Одним из перспективных направлений является технология физико-химической стабилизации демеркуризированных отходов путем их формования с использованием минеральных связующих материалов. Применение цемента, кварцевого песка и современных полимерных добавок позволяет значительно увеличить механическую прочность получаемых композитов, снизить пылеобразование и уменьшить вероятность вторичного загрязнения окружающей среды. Кроме того, процессы цементации обеспечивают дополнительную иммобилизацию остаточных соединений тяжелых металлов за счет образования труднорастворимых минеральных фаз.

По данным многочисленных исследований, существенное влияние на прочность сформованных материалов оказывают соотношение отхода и связующей композиции, гранулометрический состав наполнителей, водоцементное отношение, а также применение суперпластификаторов на основе поликарбоксилатов. Поликарбоксилатные добавки способствуют более равномерному распределению цементных частиц, уменьшению пористости структуры и увеличению плотности цементного камня, что приводит к заметному повышению прочностных характеристик композитов.

Несмотря на большое количество исследований, посвященных обезвреживанию ртутьсодержащих отходов, вопросы выбора оптимального состава связующей композиции для формования демеркуризированных углеродных отходов катализатора производства ПВХ

изучены недостаточно. Поэтому исследование влияния соотношения компонентов связующей композиции и содержания поликарбоксилатной добавки на механическую прочность формованных образцов является актуальной научной и практической задачей.

Материалы исследования

В качестве вяжущего материала использовали портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н (М500), соответствующий требованиям ГОСТ 31108–2020. Цемент характеризуется высокой ранней и конечной прочностью, что обеспечивает эффективную стабилизацию и упрочнение образцов на основе демеркуризированного ртутьсодержащего угольного отхода катализатора.

Основные характеристики цемента: марка – ЦЕМ I 42,5Н (М500); класс прочности – 42,5 МПа; начало схватывания – не менее 60 мин; конец схватывания – не более 10 ч; удельная поверхность – 320–360 м²/кг.

Методы испытаний

Определение прочности при сжатии. Прочность образцов определяли на универсальной испытательной машине в соответствии с требованиями ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Испытания проводили через 7, 14 и 28 суток твердения. За окончательный результат принимали среднее значение по трем параллельным образцам.

Определение плотности. Среднюю плотность определяли по массе и геометрическим размерам образцов согласно ГОСТ 12730.1–2020.

Определение водопоглощения. Водопоглощение определяли методом насыщения водой в соответствии с ГОСТ 12730.3–2020. Образцы выдерживали в воде до достижения постоянной массы, после чего рассчитывали процент водопоглощения.

Результаты и обсуждение

Была разработана технология утилизации ртутьсодержащего угольного отхода катализатора, образующегося при производстве поливинилхлорида (ПВХ). Исследования показали, что содержание ртути в отходах составляет 1,5–2,5 %, при этом она находится преимущественно в виде хлорида ртути (II) (HgCl₂). На первом этапе было исследовано влияние технологических параметров (температуры, продолжительности процесса и размера частиц) на степень выщелачивания HgCl₂ в раствор. Установлено, что при измельчении ртутьсодержащего угольного отхода катализатора, до размера частиц 0,5 и 0,16 мм степень выщелачивания достигает более 80 %.

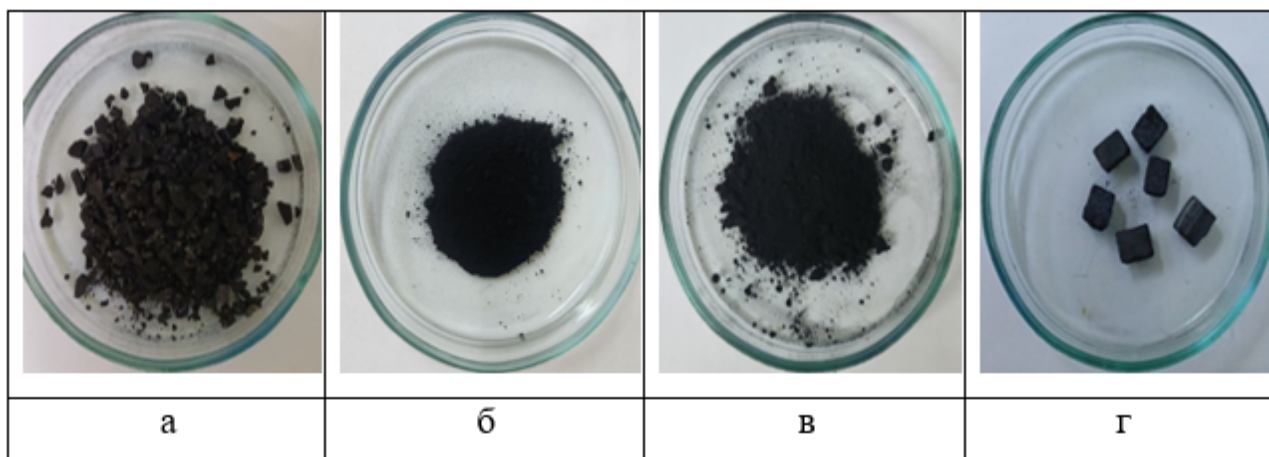


Рисунок 1. Внешний вид образцов ртутьсодержащего угольного отхода катализатора: исходный образец (а); измельчённый РУОК до выщелачивания (б); РУОК после выщелачивания (в); РУОК после формирования с использованием связующей композиции (г)

Как видно из рис. 1, исходный измельчённый катализатор представляет собой лёгкий и хрупкий материал, а после выщелачивания становится ещё более пористым, характеризуясь насыпной плотностью 1,20; 0,89; 0,61 и 0,14 г/см³ соответственно. Установлено, что после выщелачивания и демеркуризации измельчённый РУОК приобретает рыхлую, пушистую структуру и при незначительной скорости воздушного потока легко поднимается в воздух.

Таким образом, несмотря на то что ртуть в данном объекте находится в демеркуризированном состоянии, экологическая опасность отхода сохраняется вследствие его высокой пылеобразующей способности.

Таблица 1.

Насыпной плотность образцов (г/см³)

№	Наименование образцов	Свободная	Уплотненная
1.	Исходный образец катализатора	0,6426	0,7058
2.	Измельчённый до выщелачивания мм:		
	• 1	0,7108	0,9482
3.	После выщелачивания, мм:		
	• 1	0,7196	0,9232
	• 0,5	0,6356	0,8302
	• 0,16	0,5728	0,7172
4	Формованный	-	1,786

В связи с этим в настоящей статье изучено влияние количества и состава связующей композиции (СК) на прочность сформованных образцов демеркуризированного ртутьсодержащего угольного отхода катализатора. В качестве компонентов связующей композиции были выбраны широко распространённые и доступные материалы – песок

и цемент, а в качестве структурообразующей добавки использовали поликарбоксилат. Соотношение компонентов связующей композиции (песок: цемент: поликарбоксилат) варьировали в пределах 1:(1–3):(0–0,5), а соотношение демеркуризированного ртутьсодержащего угольного отхода катализатора.: СК изменяли от 80:20 до 20:80. В табл. 2 и 3 представлены составы исследуемых композиций и результаты определения прочности сформованных образцов.

Таблица 2.

Состав связующей композиции, используемой для формирования демеркуризированного ртутьсодержащего угольного отхода катализатора

№	Соотношение РУОК : СК	Соотношение Песок : цемент в состав СК	Поликарбоксилат %	кг/гранул	Прочность образцов
1	80:20	3:1	0	-	-
2		2:1		-	-
3		1:1		-	-
4		1:2		-	-
5		1:3		-	-
6	50:50	3:1	0,2	1,4	5,64
7		2:1		1,925	7,76
8		1:1		2,87	11,59
9		1:2		4,57	18,44
10		1:3		5,35	21,57
11	80:20	3:1		-	-
12		2:1		-	-
13		1:1		-	-
14		1:2		-	-
15		1:3		-	-
16	50:50	3:1		-	-
17		2:1		2,5	10,08
18		1:1		2,87	11,59
19		1:2		5,97	20,09
20		1:3		5,8	23,38
21	80:20	3:1	0,5	-	-
22		2:1		-	-
23		1:1		-	-
24		1:2		-	-
25		1:3		1,36	5,48
26	50:50	3:1		0,9	3,63
27		2:1		2,22	8,97
28		1:1		3,9	15,72
29		1:2		6,05	24,39
30		1:3		6,2	24,99

Таблица 3.

Влияния состав композиции на прочность 1см 3 кубка

Номер образцов соответствует номерам табл. 1	Прочность образцов		
	кг/гранул	кг/см ²	МПа
6	1,4	5,64	0,55
7	1,925	7,76	0,76
8	2,87	11,59	1,14
9	4,57	18,44	1,81
10	5,35	21,57	2,11
17	2,5	10,08	0,98
18	2,87	11,59	1,136
19	5,97	24,09	2,36
20	5,8	23,38	2,29
25	1,36	5,48	0,54
26	0,9	3,63	0,36
27	2,22	8,97	0,88
28	3,9	15,72	1,54
29	6,05	24,39	2,39
30	6,2	24,99	2,45

Из табл. 3 видно, что при соотношении демеркуризированного ртутьсодержащего угольного отхода катализатора. : СК = 80:20 без добавления поликарбоксилата прочность образцов является очень низкой и составляет менее 0,2 МПа. С увеличением содержания связующей композиции до соотношения демеркуризированного ртутьсодержащего угольного отхода катализатора. : СК = 50:50 прочность образцов существенно возрастает. При этом с увеличением соотношения песок: цемент от 1:1 до 1:3 прочность повышается от 1,14 до 2,11 МПа.

Кроме того, при увеличении содержания поликарбоксилата от 0 до 0,2 и 0,5 % при одинаковых значениях остальных параметров также наблюдается повышение прочности образцов. Так, при соотношении демеркуризированного ртутьсодержащего угольного отхода катализатора.: СК = 50:50 и составе связующей композиции песок: цемент = 1:2 увеличение содержания поликарбоксилата от 0 до 0,5 % приводит к заметному росту прочности сформованных образцов. Прочность образцов при соотношении песок: цемент = 1:2 увеличивается от 1,31 до 2,39 МПа, а при соотношении песок: цемент = 1:3 — от 2,11 до 2,45 МПа. Следует отметить, что даже при соотношении демеркуризированного ртутьсодержащего угольного отхода катализатора.: СК = 80:20 прочность образцов достигает 0,88 МПа, что является достаточным для их безопасного хранения в открытых шламохранилищах и на полигонах техногенных отходов. Таким образом, оптимальными условиями формирования композиции являются соотношение демеркуризированного ртутьсодержащего угольного отхода катализатора.: СК не менее 4:1 (80:20) и соотношение компонентов связующей композиции песок: цемент: поликарбоксилат = 1:(2–3):(0,2–0,5). При

указанных условиях получают композиционный материал с прочностью 0,88–2,45 МПа, пригодный для длительного безопасного хранения в открытых шламохранилищах техногенных отходов.

Выводы

В работе разработан способ безопасной утилизации демеркуризованного ртутьсодержащего угольного отхода катализатора, образующегося при производстве поливинилхлорида. Установлено, что содержание ртути в исходном отходе составляет 1,5–2,5%, а степень извлечения HgCl_2 при оптимальных условиях выщелачивания превышает 80%. Показано, что после демеркуризации демеркуризованного ртутьсодержащего угольного отхода катализатора приобретает рыхлую структуру и повышенную пылеобразующую способность, что требует его последующей стабилизации. Исследовано влияние состава связующей композиции на прочность сформованных образцов. Установлено, что увеличение содержания связующей композиции и введение поликарбоксилата способствуют повышению механической прочности материала. Оптимальными являются соотношение демеркуризованного ртутьсодержащего угольного отхода катализатора : СК = 80:20–50:50 и состав связующей композиции песок : цемент : поликарбоксилат = 1:(2–3):(0,2–0,5), обеспечивающие получение композиционного материала с прочностью 0,88–2,45 МПа, пригодного для безопасного хранения в открытых шламохранилищах техногенных отходов.

Список литературы

1. Fu F., Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review // Journal of Environmental Management. – 2011. – Т. 2011, № 3. – Р. 407–418.
2. GOST R 58527–2023. [Methods for Determining Flexural and Compressive Strength Limit] (In Russian).
3. GOST 10180–2022. [Concretes. Methods for Determining Strength Using Control Specimens] (In Russian).
4. GOST 5802–2024. [Building Mortars. Test Methods] (In Russian).
5. GOST 25140–2022. [Additives for Concretes. Methods for Determining Effectiveness] (In Russian).
6. Mehta P.K., Monteiro P.J.M. Concrete: Microstructure, Properties and Materials. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.
7. Minamata Convention on Mercury. Text and Annexes. UNEP, Geneva, 2023.
8. Neville A.M. Properties of Concrete. 5th Edition. Pearson Education Limited, 2011.
9. United Nations Environment Programme (UNEP). Global Mercury Assessment 2018. Geneva: UNEP, 2019.
10. Wang S., Mulligan C.N. Occurrence of arsenic contamination in Canada: Sources, behavior and distribution. Science of the Total Environment. 2006. Vol. 366. P. 701–721.