

ЭКСТРАКЦИОННАЯ ПЕРЕРАБОТКА ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ШЛАМОВ ПРОЦЕССА БАЙЕРА КАК МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОКСИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.В. Афинеевский, Д.А. Прозоров, Д.В. Смирнов, Н.Н. Смирнов

Научно-исследовательская лаборатория синтеза, исследований и испытания каталитических и адсорбционных систем для процессов переработки углеводородного сырья, Ивановский государственный химико-технологический университет, Шереметевский пр., 7, Иваново, Российская Федерация, 153000
E-mail: afineevskii@yandex.ru, prozorovda@mail.ru, morgandvs37@gmail.com, nnsmi@mail.ru

Изучена возможность экстракционного разделения железосодержащих шламов, образующихся в процессе производства алюминия, с целью выделения наиболее ценных компонентов отходов. В качестве объектов исследования выбран шлам завода глинозема Тан Рай (Лам Донг, Вьетнам) и железосодержащий шлам Заволжского химического завода (Ивановская область, Россия). Экстракцию компонентов шламов проводили водными растворами азотной и соляной кислоты и карбоната аммония в интервале температур от 293 до 423 К. Элементный и фазовый составы шламов исследовали с помощью рентгенофазового анализа и рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии. Было установлено, что фазовый и элементный состав рассматриваемых в работе железосодержащих шламов имеет значительное отличие по компонентам, содержание которых не превышает 5 масс. %. При одинаковой продолжительности экстракции при выбранных температурах во всех растворителях не удавалось добиться полного извлечения каких-либо из компонентов шлама, что, по всей видимости, объясняется наличием твердых растворов нестехиометрического состава. Найдено, что с помощью метода экстракции, возможно относительно легко выделять из отходов процесса Байера щелочные и щелочноземельные металлы (степень извлечения составляет для Na до 93 масс. %, Mg до 88 масс. %, Ca до 99 масс. %, Ti до 95 масс. %). Выявлено существенное отличие химических составов сухих и твердых остатков в зависимости от используемого экстрагента. Химический состав полученных оксидных материалов проанализирован и может быть рекомендован в качестве сырья для производства катализаторов и адсорбентов.

Ключевые слова: экстракция, оксид железа, щелочные металлы, термическая обработка, дифрактометрия

EXTRACTIVE PROCESSING OF IRON-CONTAINING SLUDGE FROM THE BAYER PROCESS AS A METHOD FOR PRODUCING FUNCTIONAL OXIDE MATERIALS

A.V. Afineevsky, D.A. Prozorov, D.V. Smirnov, N.N. Smirnov

Research Laboratory for Synthesis, Research, and Testing of Catalytic and Adsorption Systems for Hydrocarbon Processing, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevsky ave., 7, Ivanovo, 153000, Russian Federation
E-mail: afineevskii@yandex.ru, prozorovda@mail.ru, morgandvs37@gmail.com, nnsmi@mail.ru

The possibility of extraction separation of iron-containing sludge formed in the aluminum production process has been studied in order to isolate the most valuable waste components. The sludge from the Tan Rai alumina plant (Lam Dong, Vietnam) and the iron-containing sludge from the Zavolzhsky Chemical Plant (Ivanovo region, Russia) were selected as the objects of research. The sludge components were extracted with aqueous solutions of nitric and hydrochloric acid and ammonium carbonate in the temperature range from 293 to 423 K. The elemental and phase compositions of the sludge were studied using X-ray phase analysis and X-ray energy dispersion spectroscopy. It was found that the phase and elemental composition of the iron-containing slurries considered in the work has a significant difference in the components, the content of which does not exceed 5 wt. %. With the same duration of extraction at selected temperatures in all solvents, it

was not possible to achieve complete cure of any of the sludge components, which, most likely, is explained by the presence of solid solutions of nonstoichiometric the composition. It has been found that using the extraction method, it is possible to isolate alkali and alkaline earth metals relatively easily from the waste of the Bayer process (the degree of extraction is for Na up to 93 wt. %, Mg up to 88 wt. %, Ca up to 99 wt. %, Ti up to 95 wt. %). A significant difference in the chemical compositions of dry and solid residues has been revealed, depending on the extractant used. The chemical composition of the obtained oxide materials has been analyzed and can be recommended as a raw material for the production of catalysts and adsorbents.

Keywords: extraction, iron oxide, alkali metals, heat treatment, diffractometry

Для цитирования:

Афинеевский А.В., Прозоров Д.А., Смирнов Д.В., Смирнов Н.Н. Экстракционная переработка железосодержащих шламов процесса Байера как метод получения функциональных оксидных материалов. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2026. Т. LXX. № 2. С. 38–45. DOI: 10.6060/rcj.2026702.5.

For citation:

Afineevsky A.V., Prozorov D.A., Smirnov D.V., Smirnov N.N. Extractive processing of iron-containing sludge from the Bayer process as a method for producing functional oxide materials. *Ros. Khim. Zh.* 2026. V. 70. N 2. P. 38–45. DOI: 10.6060/rcj.2026702.5.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема утилизации и комплексной переработки отходов производства алюминия в последние десятилетия приобретает все большую актуальность в связи с неуклонным ростом объемов глиноземного производства и ужесточением экологических требований к обращению с промышленными отходами [1–3]. Одним из наиболее масштабных по объему и одновременно сложных по химическому составу отходов является так называемый красный шлам, образующийся в процессе переработки бокситов по методу Байера. По различным оценкам, на 1 т произведенного глинозема образуется от 1,0 до 1,5 т красного шлама, что приводит к накоплению сотен миллионов тонн данного материала в шламохранилищах по всему миру [4, 5]. Применение железосодержащих красных шламов в качестве сырья для изготовления различных видов изделий не находит практического применения, по причине сложного химического состава таких отходов [6–8].

Красный шлам представляет собой тонкодисперсную щелочную суспензию сложного оксидного состава, включающую соединения железа, алюминия, кремния, титана, кальция, натрия, а также примеси редких и редкоземельных элементов. Высокая щелочность, мелкодисперсная структура и наличие токсичных компонентов обуславливают существенную экологическую опасность данных отходов и ограничивают возможности их прямого складирования без предварительной обработки [8, 9].

В ряде работ показано, что содержание железа в красных шламах может достигать 30–

60 мас. %, что делает их потенциальным источником железосодержащих материалов [10–12]. Однако из-за сложного фазового состава его последующая переработка до продуктов, удовлетворяющих требованиям промышленного применения затруднена.

В литературе описан широкий спектр подходов к переработке красных шламов, включая пирометаллургические, гидрометаллургические и комбинированные методы [13, 14]. Гидрометаллургические методы, например, отличаются более мягкими условиями проведения и потенциальной возможностью селективного извлечения отдельных элементов. Наиболее распространенными являются процессы кислотного или щелочного выщелачивания. Показано, что кислотное выщелачивание эффективно растворяет соединения кальция, натрия, магния и частично алюминия, тогда как соединения Fe и Si, как правило, остаются в твердом остатке [15].

Отдельный интерес представляют работы, направленные на получение из красных шламов оксидных материалов с заданными физико-химическими свойствами, пригодных для использования в качестве катализаторов, носителей катализаторов или адсорбентов. Показано, что после соответствующей химической и термической обработки железо- и алюмосодержащие фракции красных шламов могут проявлять каталитическую активность в реакциях окисления, гидрирования и разложения органических соединений, а также адсорбционные свойства по отношению к газообразным и жидким субстратам [16, 17]. При этом ключевым фактором, определяющим функциональные

характеристики таких материалов, является элементный и фазовый состав исходного сырья, а также условия его переработки.

Получение металлов или их оксидов из красных шламов не находит применения в промышленности из-за трудоемкости выделения компонентов шлама с требуемой для дальнейшей переработки чистоты. Кроме того, при экстракционном выделении редкоземельных металлов чаще используют растворы минеральных кислот и щелочей, однако в литературе есть работы с использованием органических растворителей, например, керосина, ди(2-этилгексил)фосфорной кислоты, трибутилфосфата [8].

Несмотря на значительное число публикаций, посвященных переработке красных шламов, большинство предложенных технологий характеризуются либо высокой сложностью, либо узкой областью применимости. В этой связи актуальной задачей остается разработка относительно простых и воспроизводимых методов экстракционного разделения железосодержащих отходов процесса Байера, позволяющих эффективно удалять щелочные

и щелочноземельные элементы, а также титан, с одновременным формированием твердого остатка, перспективного для дальнейшего использования в качестве сырья для каталитических и адсорбционных материалов.

Настоящая работа направлена на исследование возможности экстракционного разделения железосодержащих шламов различного происхождения в мягких условиях с использованием водных растворов минеральных кислот и карбоната аммония.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Методики проведения экстракции

При проведении экспериментальной части работы использовали следующие реактивы: азотная кислота, HNO_3 65%, «ХЧ» ГОСТ 4461-77; соляная кислота, HCl «ХЧ» ГОСТ 3118-77; карбонат аммония $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, марки ч, ГОСТ 3770-75; дистиллированная вода, электропроводность $\leq 0,9$ мкСм/см.

В табл. 1 приведен элементный состав используемых в работе железосодержащих шламов.

Таблица 1

Элементный состав железосодержащего шлама
Table 1. Elemental composition of iron-containing sludge

Шлам заводского химического завода (Ивановская область, Россия)													
Fe	O	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Pb	Cu	Mg	Zn	Na
22,08	52,89	2,36	14,5	0,18	1,23	0,78	0,31	0,14	0,01	0,47	0,08	0,15	4,82
Шлам завода глинозема Тан Рай (Лам Донг, Вьетнам)													
24,55	59,04	4,94	1,65	0,1	0,17	-	0,25	2,54	-	-	1,15	0,47	5,14

Экстракцию проводили в интервале температур 293-423 К. Для проведения экстракции использовали автоклав для гидротермального синтеза с фторопластовым вкладышем. Соотношение растворитель:шлам во всех случаях было 5:1 по массе. Время выдержки при заданной температуре составляло от 10 до 180 мин. После проведения экстракции продукты отфильтровывали на фильтре Шотта. Раствор выпаривали до постоянной массы при 358 К, далее прокаливали в атмосфере воздуха при 773 К.

Физико-химические методы анализа

ИК-спектроскопия выполнена на приборе Avatar 360 FT-IR ESP в области $350\text{--}4000\text{ см}^{-1}$; рентгенофазовый анализ (РФА) проводили на дифрактометре Bruker D8 Advance с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения ($\lambda = 0,15406\text{ нм}$, напряжение 40 кВ, 20 мА, углы $2\theta = 10^\circ\text{--}90^\circ$, скорость сканирования $3^\circ/\text{мин}$, дискретность – $0,01^\circ$; идентификация данных рентгенофазового анализа проводилась по кристаллографической базе данных МИНКРИСТ); низкотемпературная адсорбция азота (аппаратный комплекс

Sorbi MS, метод БЭТ); растровая электронная микроскопия и энергодисперсионная спектроскопия (VEGA 3 TESCAN с приставкой OXFORD); термогравиметрия (STA 449 F3 Jupiter® NETZSCH).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В работе проведена экстракция компонентов железосодержащих отходов водными растворами, элементный состав сухих остатков экстрагента и железосодержащего шлама после процесса экстракции приведены в табл. 2.

Приведенные в табл. 2 экспериментальные данные позволяют утверждать, что наиболее эффективно выбранными растворителями возможно извлекать Na, Mg, Ti, Ca. Проводить подобную экстракцию с железосодержащим шламом Заводского химического завода (Россия) оказалось не целесообразно из-за относительно малых количеств примесей оксидов металлов, данные по элементному и фазовому составу данного шлама представлены в работе [9].

Таблица 2

Элементный состав сухих остатков после обработки красного шлама завода глинозема Тан Рай (Лам Донг, Вьетнам)

Table 2. The elemental composition of dry residues after processing red sludge from the Tan Rai alumina plant (Lam Dong, Vietnam)

T, K	O	Na	Mg	Al	S	Cl	Ca	Ti	Fe	Si	Zn	P
Сухие остатки												
HNO ₃												
293	33,98	20,18	0,51	18,46	0,93	0,00	15,51	1,15	4,32	0,00	4,96	0,00
323	32,01	21,19	0,63	19,11	1,35	0,00	14,92	1,33	4,20	0,00	5,25	0,00
348	32,33	25,22	0,74	16,55	0,53	0,00	13,60	1,78	3,56	0,00	5,69	0,00
373	27,82	29,55	0,96	17,54	1,10	0,00	11,39	2,40	3,05	0,00	6,19	0,00
423	30,50	36,14	1,07	11,33	0,28	0,00	9,45	2,79	1,71	0,00	6,73	0,00
HCl												
293	18,10	3,30	0,00	6,67	0,00	55,67	1,34	1,25	4,96	0,00	8,71	0,00
323	16,35	5,96	0,11	6,20	1,20	47,57	2,05	1,68	11,07	0,08	7,72	0,00
348	17,11	10,55	0,24	3,90	0,21	44,73	3,51	2,72	9,58	0,00	7,46	0,00
373	14,15	15,89	0,55	0,15	0,00	38,54	6,14	4,16	12,98	0,00	7,43	0,00
423	7,39	20,22	0,71	0,18	0,00	35,85	7,64	4,73	16,59	0,00	6,70	0,00
(NH ₄) ₂ CO ₃												
293	26,87	53,84	0,00	0,87	1,17	0,00	0,56	0,79	2,79	0,52	12,61	0,00
323	28,83	49,04	0,00	1,26	1,48	0,00	1,49	1,92	3,74	1,12	11,11	0,00
348	31,49	37,28	0,06	1,82	1,62	0,00	2,80	3,15	3,78	2,06	15,93	0,00
373	42,33	25,79	0,07	5,83	0,71	0,00	4,67	4,29	1,46	0,00	14,85	0,00
423	48,22	9,59	0,12	10,72	1,62	0,00	8,19	5,85	2,43	0,14	13,13	0,00
Твердый остаток												
HNO ₃												
293	34,93	0,12	0,56	9,70	0,00	0,00	0,21	4,56	45,93	3,48	0,32	0,18
323	38,52	0,48	0,52	8,92	0,11	0,00	0,20	4,40	43,14	3,28	0,26	0,17
348	38,46	0,99	0,33	7,22	0,00	0,00	0,14	3,59	46,20	2,79	0,16	0,11
373	40,44	1,38	0,22	6,45	0,13	0,00	0,08	1,84	45,58	3,59	0,14	0,14
423	43,26	1,50	0,07	7,24	0,05	0,00	0,00	0,24	46,35	1,27	0,02	0,00
HCl												
293	34,17	0,46	0,34	12,49	0,18	6,29	0,26	5,19	35,53	4,58	0,27	0,22
323	35,31	0,99	0,30	14,62	0,20	5,87	0,21	4,13	37,31	0,64	0,23	0,17
348	37,22	1,24	0,23	12,31	0,21	5,85	0,17	3,55	34,40	4,30	0,19	0,34
373	39,53	1,71	0,14	13,13	0,00	3,48	0,12	2,74	35,40	3,29	0,13	0,34
423	40,63	1,81	0,04	12,40	0,00	4,07	0,08	1,21	38,03	1,48	0,00	0,26
(NH ₄) ₂ CO ₃												
293	33,16	3,05	0,71	11,49	0,29	0,00	0,39	4,86	42,10	3,59	0,25	0,11
323	32,59	3,30	0,63	12,13	1,04	0,00	0,37	4,36	40,38	4,87	0,22	0,10
348	35,67	3,55	0,60	10,96	0,20	0,00	0,29	3,69	41,15	3,67	0,16	0,07
373	35,92	3,76	0,58	11,71	0,41	0,00	0,25	2,14	41,93	3,11	0,14	0,06
423	36,33	3,77	0,54	12,14	0,27	0,00	0,22	1,11	41,55	4,02	0,05	0,00

Основные компоненты железосодержащих шламов Al, Si, Fe поддаются растворению в меньшей степени, что может объясняться фазовым составом образцов (рис. 1).

Анализ дифрактограмм позволяет утверждать, что по фазовому составу исследуемые железосодержащие отходы представляют из себя смесь оксидов металлов различных степеней окисления. Оксид железа присутствует в различных кристаллических модификациях (магнетит, вюрцит, магге-

мит и др.), алюминий в виде (α , γ -оксидов, псевдобемита), при этом восстановленные металлы практически отсутствуют. Фазовый состав исследуемых шламов подробно проанализирован в работах [18, 19].

При термической обработке шламов, до процесса экстракции, происходит потеря массы до 20 мас. % для исследуемых железосодержащих шламов, кривые термогравиметрического и дифференциального термического анализа приведены на рис. 2 и 3.

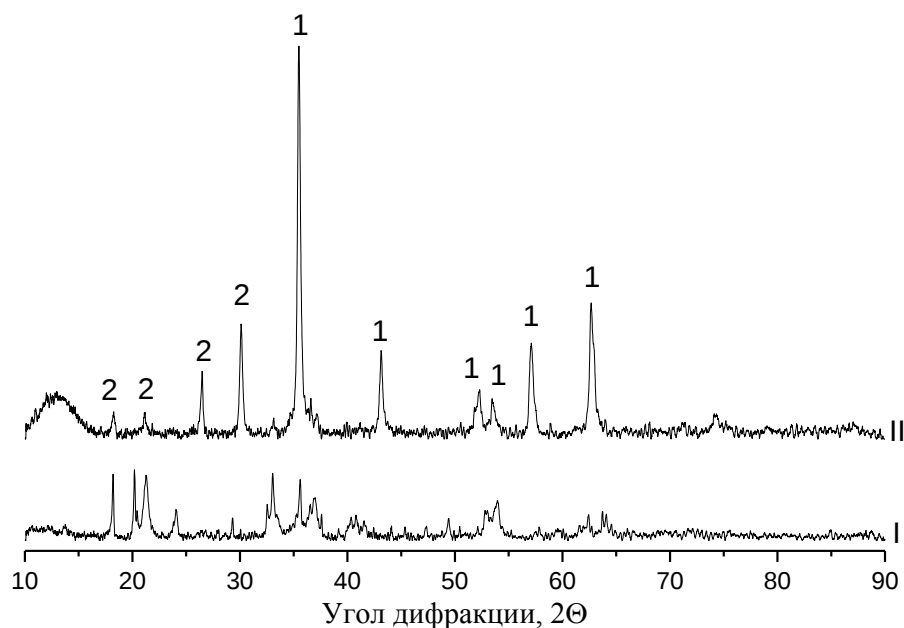


Рис. 1. Рентгенограммы образцов железосодержащего шлама: I – Шлам завода глинозема Тан Рай (Лам Донг, Вьетнам), II – Шлам заволжского химического завода (Ивановская область, Россия). Фазы: 1 – $\text{Fe}_{3,005}\text{O}_4$; 2 – Гетит $\text{FeO}(\text{OH})$
 Fig. 1. X-ray images of iron-containing sludge samples: I – Sludge from the Tan Rai alumina plant (Lam Dong, Vietnam), II – Sludge from the Zavolzhsky Chemical Plant (Ivanovo region, Russia). Phases: 1 – $\text{Fe}_{3,005}\text{O}_4$; 2 – Goethite $\text{FeO}(\text{OH})$

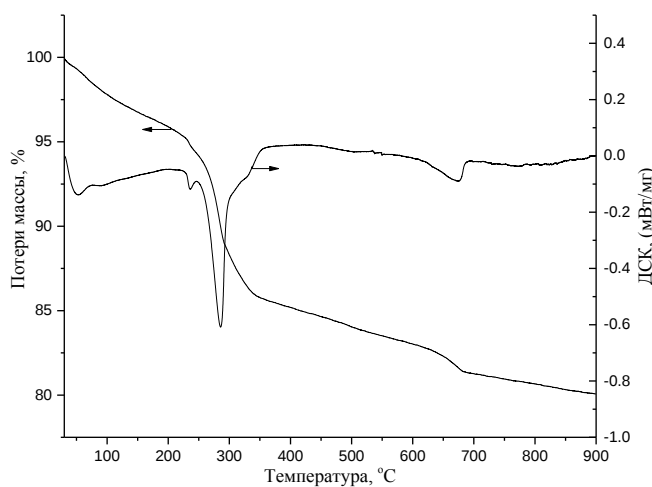


Рис. 2. Синхронный термический анализ шлама завода глинозема Тан Рай (Лам Донг, Вьетнам)
 Fig. 2. Synchronous thermal analysis of sludge from the Tan Rai alumina plant (Lam Dong, Vietnam)

Синхронный термический анализ позволяет утверждать, что процессы, приводящие к потере массы катализатором на основе шлама завода Тан Рай (Вьетнам) проходят последовательно в определенном интервале температур, о чем свидетельствуют выраженные ступеньки на кривой ТГ. Более сложные по химическому составу отходы производства Заволжского химического завода (Россия), имеющие в составе органические молекулы

[9], теряют массу при нагревании практически постоянно, не позволяя выявить отдельные процессы даже при уменьшении скорости нагрева до $1^\circ/\text{мин}$. Различную природу процессов, протекающих при нагревании отходов Заволжского химического завода, подтверждают и различные по знаку тепловые эффекты наблюдаемые при уменьшении массы.

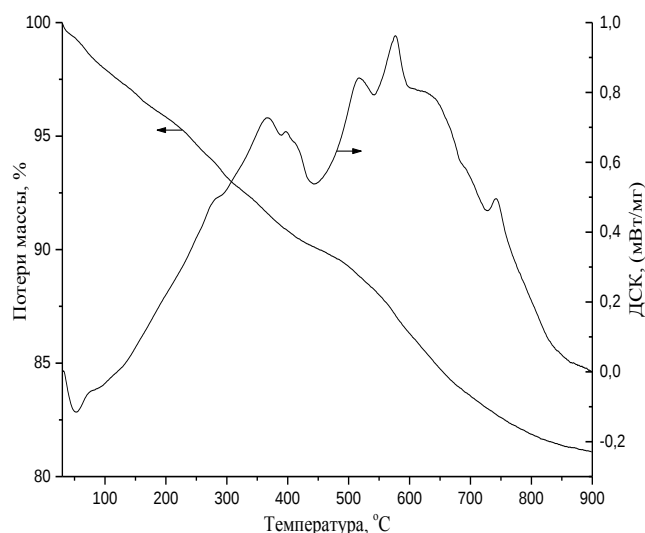


Рис. 3. Синхронный термический анализ шлама заволжского химического завода (Ивановская область, Россия)
 Fig. 3. Synchronous thermal analysis of sludge from the Zavolzhsky Chemical Plant (Ivanovo region, Russia)

Анализ рентгенограмм показал, что в процессе обработки различными экстрагентами фазовый состав твердых остатков остается практически неизменным, дифрактограммы приведены на рис. 4.

При этом наблюдается изменение интенсивности пиков, что указывает на изменение степени кристалличности образцов. Фазовый состав извлеченных компонентов значительно зависит от природы растворителя (дифрактограммы приведены на рис. 5), при этом в зависимости от температуры

меняется интенсивность полос на дифрактограмме, что можно объяснить изменением концентраций компонентов (табл. 2).

В отдельных опытах было установлено, что сухие остатки, полученные из экстрагента, и не растворившаяся фракция, приведенные в табл. 2, после прокаливании при 1000 °С до постоянной массы практически не изменяют свой элементный состав.

Исходя из анализа литературы, элементный состав полученной после прокаливании при 150 °С

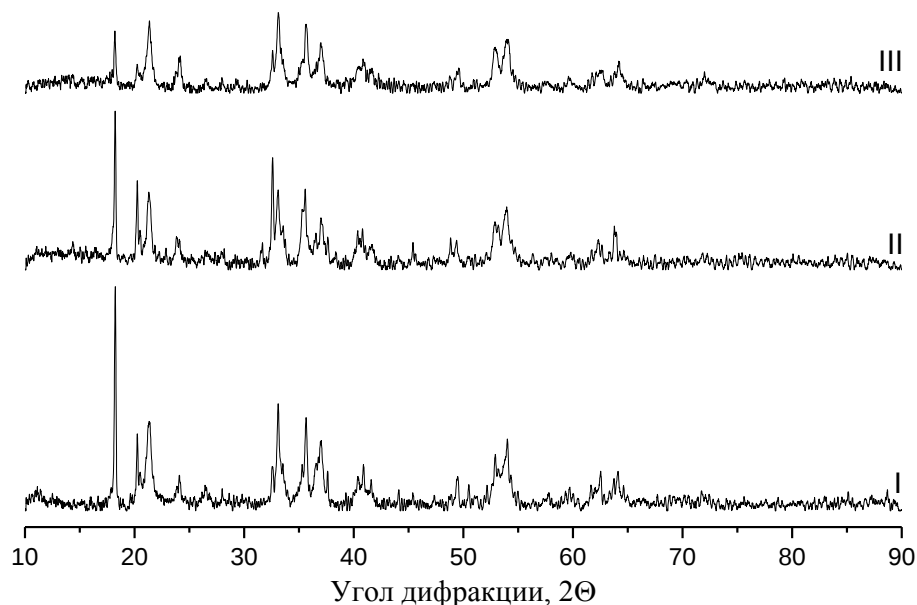


Рис. 4. Дифрактограммы твердых остатков, полученных при 293 К, после обработки: I – HNO_3 ; II – HCl ; III – NH_4CO_3
Fig. 4. Diffractograms of solid residues obtained at 293 K, after treatment: I – HNO_3 ; II – HCl ; III – NH_4CO_3

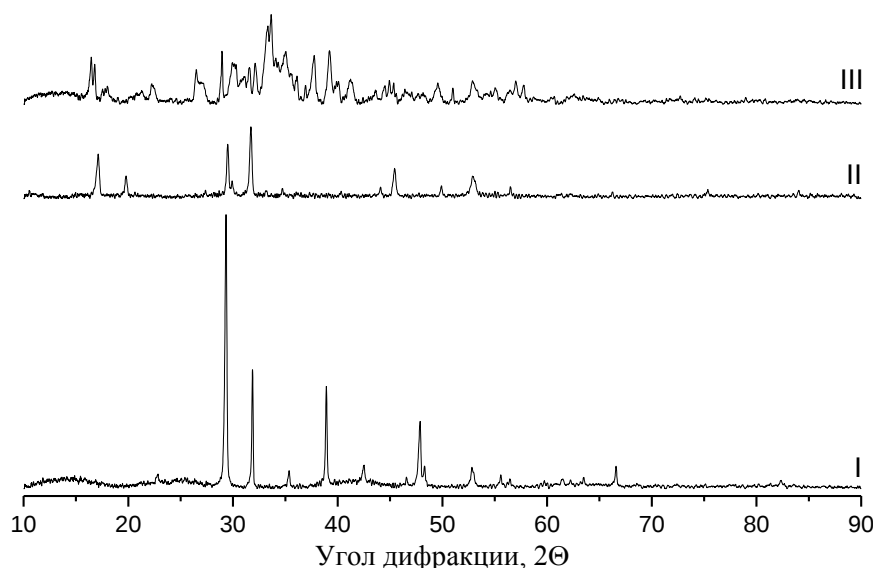


Рис. 5. Дифрактограммы извлеченных компонентов шлама, полученных при 293 К, после обработки: I – HNO_3 ; II – HCl ; III – NH_4CO_3
Fig. 5. Diffractograms of extracted sludge components obtained at 293 K, after treatment: I – HNO_3 ; II – HCl ; III – NH_4CO_3

не растворившийся фракции позволяет утверждать, что она практически не подходит к применению в качестве катализатора или адсорбента для какого-либо процесса при переработки нефти и газа. Однако минимальное содержание натрия и серы, классических каталитических ядов, позволяют рассматривать продукт обработки исследуемых шламов в качестве сырья для катализаторов и адсорбентов [20-23].

ВЫВОДЫ

Установлено, что экстракционная обработка в мягких условиях не приводит к полному растворению основных компонентов шламов, прежде всего соединений железа, алюминия и кремния, что связано с их присутствием в виде устойчивых оксидных фаз и твердых растворов нестехиометрического состава. В то же время показано, что выбранные экстрагенты обеспечивают эффективное извлечение щелочных и щелочноземельных металлов, а также титана. Для Na, Mg, Ca и Ti степень извлечения достигает соответственно до 93, 88, 99 и 95 мас. %.

Повышение температуры приводит к увеличению степени извлечения легкорастворимых компонентов, однако не сопровождается существенным изменением фазового состава твердых остатков. Рентгенофазовый анализ показал, что после экстракционной обработки основными фазами твердых остатков остаются оксиды железа и алюминия, при этом наблюдаются изменения степени кристалличес-

ности, что может оказывать влияние на дальнейшие физико-химические свойства материалов.

Проведенный термогравиметрический анализ позволил установить особенности термического поведения исследуемых шламов и подтвердил различия в природе протекающих процессов, обусловленные их химическим составом. Показано, что термическая обработка продуктов экстракции не приводит к существенным изменениям элементного состава, что указывает на устойчивость сформированных оксидных систем.

Химический состав твердых остатков, характеризующийся пониженным содержанием натрия и серы – типичных каталитических ядов, позволяет рассматривать полученные оксидные материалы в качестве потенциального сырья для дальнейших исследований в области создания катализаторов и адсорбентов. Таким образом, предложенный подход может быть использован как элемент комплексной стратегии утилизации и ресурсного использования железосодержащих отходов глиноземного производства.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2024-481.

ЛИТЕРАТУРА

1. Леонтьев Л.И., Пономарев В.И., Шешуков О.Ю. // *Экология и промышленность России*. 2016. Т. 20. № 3. С. 24-27. DOI: 10.18412/1816-0395-2016-3-24-27.
2. Зенкин Е.Ю., Гавриленко А.А., Немчинова Н.В. // *iPolytech Journal*. 2017. Т. 21. № 3. С. 123-132. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-3-123-132.
3. Афинеевский А.В., Прозоров Д.А., Смирнов Д.В., Гордина Н.Е. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2024. Т. 67. Вып. 11. С. 6-14. DOI: 10.6060/ivkkt.20246711.7111.
4. Jia K., Zhou Z., Singh S.V., Wang C. // *Results in Engineering*. 2024. V. 24. P. 102927. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102927.
5. Du P., Wang P., Zhang X., Wen G., Wang Y. // *Particuology*. 2024. V. 93. P. 328-348. DOI: 10.1016/j.partic.2024.07.010.
6. Dang Tran Tho, Le Thi Mai Huong, Смирнова О.П., Афинеевский А.В., Смирнов Д.В., Гордина Н.Е., Прозоров Д.А. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 10. С. 109-116. DOI: 10.6060/ivkkt.20256810.7244.
7. Крамер С.М., Терехова М.В., Артамонова И.В. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2017. Т. 60. Вып. 8. С. 80-83. DOI: 10.6060/tcct.2017608.5663.

REFERENCES

1. Leontiev L.I., Ponomarev V.I., Sheshukov O.Y. // *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2016. V. 20. N 3. P. 24-27. DOI: 10.18412/1816-0395-2016-3-24-27. (in Russian).
2. Zenkin E.Yu., Gavrilenco A.A., Nemchinova N.V. // *iPolytech Journal*. 2017. V. 21. N 3 P. 123-132. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-3-123-132. (in Russian).
3. Afineevskii A.V., Prozorov D.A., Smirnov D.V., Gordina N.E. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 11. P. 6-14. DOI: 10.6060/ivkkt.20246711.7111.
4. Jia K., Zhou Z., Singh S.V., Wang C. // *Results in Engineering*. 2024. V. 24. P. 102927. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102927.
5. Du P., Wang P., Zhang X., Wen G., Wang Y. // *Particuology*. 2024. V. 93. P. 328-348. DOI: 10.1016/j.partic.2024.07.010.
6. Dang Tran Tho, Le Thi Mai Huong, Smirnova O.P., Afineevskii A.V., Smirnov D.V., Gordina N.E., Prozorov D.A. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 10. P. 109-116. DOI: 10.6060/ivkkt.20256810.7244. (in Russian).
7. Kramer S.M., Terekhova M.V., Artamonova I.V. // *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2017. V. 60. N 8. P. 80-83. DOI: 10.6060/tcct.2017608.5663. (in Russian).

8. Абдурахмонов О.Э., Семенов С.А., Соколова Ю.В. // *Экстракция и мембранные методы в разделении веществ*. 2018. С. 36-38.
9. Zhang H., Yang J., Yu W., Luo S., Peng L., Shen X., Shi Y., Zhang S., Song J., Ye N., Li Y., Yang C., Liang S. // *Water research*. 2014. V. 59. P. 239-247. DOI: 10.1016/j.watres.2014.04.026.
10. Karimi Z., Rahbar-Kelishami A. // *Scientific Reports*. 2023. V. 13. P. 8527. DOI: 10.1038/s41598-023-35753-w.
11. Kong H., Zhou T., Yang X., Gong Y., Zhang M., Yang H. // *Energies*. 2022. V. 15. N 10. P. 3830. DOI: 10.3390/en15103830.
12. Rai S., Nimje M.T., Chaddha M.J., Modak S., Rao K.R., Agnihotri A. // *Minerals Engineering*. 2019. V. 134. N 1. P. 222-231. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.02.018.
13. Зиновьев Д.В., Грудинский П.И., Дюбанов В.Г., Коваленко Л.В., Леонтьев Л.И. // *Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия*. 2018. Т. 61. № 11. С. 843-858. DOI: 10.17073/0368-0797-2018-11-843-858.
14. Druzhinin K.E., Vasyunina N.V., Dubova I.V., Gilmanshina T.R., Bazhenova T.P. // *MME-SEE Congress Proceedings*. 2025. V. 6. N 1. P. 311-313. DOI: 10.30544/MMESEE20.
15. Samal S. // *Materials*. 2021. V. 14. N 9. P. 2211. DOI: 10.3390/ma14092211.
16. Zhang T., Yan J., Li Z., Wang H., Han P., Shufeng Y. // *J. Environ. Manage.* 2025. V. 377. P. 124669. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.124669.
17. Shoppert A., Valeev D., Diallo M.M., Loginova I., Beavogui M.C., Rakhmonov A., Ovchenkov Y., Pankratov D.A. // *Materials*. 2022. V. 15. N 23. P. 8423. DOI: 10.3390/ma15238423.
18. Hai L.D., Khai N.M., Quy T.V., Huan N.X. // *Int. J. Res. Earth Environ. Sci.* 2014. P. 2311-2484.
19. Прозоров Д.А., Афиневский А.В., Смирнов Д.В., Гордина Н.Е., Румянцев Р.Н. // *Экология и промышленность России*. 2025. Т. 29. № 3. С. 28-33. DOI: 10.18412/1816-0395-2025-3-28-33.
20. Яшкова Д.Н., Смирнов Н.Н., Кунин А.В. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 10. С. 117-123. DOI: 10.6060/ivkkt.20256810.7251.
21. Гордина Н.Е., Бутман М.Ф., Гушин А.А., Морозов Л.Н., Прозоров Д.А., Рыбкин В.В., Смирнов Н.Н., Афиневский А.В., Борисова О.А., Гусев Г.И., Извекова Т.В., Квиткова Е.Ю., Кунин А.В., Овчинников Н.Л., Румянцев Р.Н., Строганова Т.Е. // *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2025. Т. LXIX. № 3. С. 18-38. DOI: 10.6060/rcj.2025693.2.
22. Романенко Ю.Е., Афиневский А.В., Румянцев Р.Н., Меледин А.Ю., Никитин К.А. // *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2024. Т. LXVIII. № 3. С. 82-89. DOI: 10.6060/rcj.2024683.13.
23. Сальникова Н.В., Прозоров Д.А., Смирнов Д.В., Смирнов Е.П. // *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2024. Т. LXVIII. № 3. С. 9-15. DOI: 10.6060/rcj.2024683.2.
8. Abdurakhmanov O.E., Semenov S.A., Sokolova Yu.V. // *Ekstraksiya i membrannyye metody v razdelenii veshchestv*. 2018. P. 36-38. (in Russian).
9. Zhang H., Yang J., Yu W., Luo S., Peng L., Shen X., Shi Y., Zhang S., Song J., Ye N., Li Y., Yang C., Liang S. // *Water research*. 2014. V. 59. P. 239-247. DOI: 10.1016/j.watres.2014.04.026.
10. Karimi Z., Rahbar-Kelishami A. // *Scientific Reports*. 2023. V. 13. P. 8527. DOI: 10.1038/s41598-023-35753-w.
11. Kong H., Zhou T., Yang X., Gong Y., Zhang M., Yang H. // *Energies*. 2022. V. 15. N 10. P. 3830. DOI: 10.3390/en15103830.
12. Rai S., Nimje M.T., Chaddha M.J., Modak S., Rao K.R., Agnihotri A. // *Minerals Engineering*. 2019. V. 134. N 1. P. 222-231. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.02.018.
13. Zinoveev D.V., Grudinsky P.I., Dyubanov V.G., Kovalenko L.V., Leontyev L.I. // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya Metallurgiya*. 2018. V. 61. N 11. P. 843-858. DOI: 10.17073/0368-0797-2018-11-843-858. (in Russian).
14. Druzhinin K.E., Vasyunina N.V., Dubova I.V., Gilmanshina T.R., Bazhenova T.P. // *MME-SEE Congress Proceedings*. 2025. V. 6. N 1. P. 311-313. DOI: 10.30544/MMESEE20.
15. Samal S. // *Materials*. 2021. V. 14. N 9. P. 2211. DOI: 10.3390/ma14092211.
16. Zhang T., Yan J., Li Z., Wang H., Han P., Shufeng Y. // *J. Environ. Manage.* 2025. V. 377. P. 124669. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.124669.
17. Shoppert A., Valeev D., Diallo M.M., Loginova I., Beavogui M.C., Rakhmonov A., Ovchenkov Y., Pankratov D.A. // *Materials*. 2022. V. 15. N 23. P. 8423. DOI: 10.3390/ma15238423.
18. Hai L.D., Khai N.M., Quy T.V., Huan N.X. // *Int. J. Res. Earth Environ. Sci.* 2014. P. 2311-2484.
19. Prozorov D.A., Afineevsky A.V., Smirnov D.V., Gordina N.E., Rumyantsev R.N. // *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2025. V. 29. N 3. P. 28-33. DOI: 10.18412/1816-0395-2025-3-28-33. (in Russian).
20. Yashkova D.N., Smirnov N.N., Kunin A.V. // *Chem-ChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 10. P. 117-123. DOI: 10.6060/ivkkt.20256810.7251. (in Russian).
21. Gordina N.E., Butman M.F., Gushchin A.A., Morozov L.N., Prozorov D.A., Rybkin V.V., Smirnov N.N., Afineevsky A.V., Borisova O.A., Gusev G.I., Izvekova T.V., Kvitkova E.Yu., Kunin A.V., Ovchinnikov N.L., Rumyantsev R.N., Stroganova T.E. // *Ros. Khim. Zh.* 2025. V. 69. N 3. P. 18-38. DOI: 10.6060/rcj.2025693.2. (in Russian).
22. Romanenko Yu.E., Afineevskii A.V., Rumyantsev R.N., Meledin A.Yu., Nikitin K.A. // *Ros. Khim. Zh.* 2024. V. 68. N 3. P. 82-89. DOI: 10.6060/rcj.2024683.13. (in Russian).
23. Salnikova N.V., Prozorov D.A., Smirnov D.V., Smirnov E.P. // *Ros. Khim. Zh.* 2024. V. 68. N 3. P. 9-15. DOI: 10.6060/rcj.2024683.2. (in Russian).

Поступила в редакцию 24.02.2026

Принята к опубликованию 02.05.2026

Received 24.02.2026

Accepted 02.05.2026