

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 669.054.82.83

DOI: 10.26730/1999-4125-2023-6-39-46

**АНАЛИЗ ПРОДУКТОВ КИСЛОТНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ
ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ КОТЕЛЬНОЙ АО «ЦОФ БЕРЕЗОВСКАЯ»****Черкасова Татьяна Григорьевна, Золотухина Наталья Анатольевна,
Буланова Татьяна Владимировна, Винидиктова Юлия Александровна,
Ченская Валентина Васильевна**

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

*для корреспонденции: ctg.htnv@kuzstu.ru

**Информация о статье**

Поступила:

27 октября 2023 г.

Одобрена после

рецензирования:

10 декабря 2023 г.

Принята к публикации:

12 декабря 2023 г.

Опубликована:

21 декабря 2023 г.

Ключевые слова:*золошлаковые отходы, анализ и переработка золы, выщелачивание, извлечение, редкие и редкоземельные элементы***Аннотация.**

Проблемы, связанные с накоплением золошлаковых отходов, с каждым годом становятся все более актуальными. Для решения данных проблем необходимы комплексные подходы и инновационные технологии. Одним из возможных решений является переработка золошлаковых отходов с целью извлечения полезных компонентов и уменьшения объема отходов. В последние годы создаются новые технологические схемы обогащения и извлечения ценных и редких элементов из золошлаковых отходов углепереработки.

В качестве исходного сырья для выщелачивания редких и ценных металлов использовали золошлаковые отходы с котельной АО «ЦОФ Березовская». Были определены химический, фазовый состав зольных остатков.

Для получения оптимальных условий вскрытия золы использовали 3М и 6М азотную кислоту. Химический состав минеральной части образцов определялся на рентгенофлуоресцентном спектрометре. По результатам исследований химического состава после выщелачивания золошлаковых отходов кремний практически весь остается в нерастворимом остатке. Железо, марганец, хром, цветные металлы частично переходят в раствор щелока и частично остаются в осадке. Для вскрытия золы азотной кислотой предложена оптимальная концентрация 3М, так как результаты выщелачивания золы 6М и 3М приблизительно одинаковы.

Для цитирования: Черкасова Т.Г., Золотухина Н.А., Буланова Т.В., Винидиктова Ю.А., Ченская В.В. Анализ продуктов кислотного выщелачивания золошлаковых отходов котельной АО «ЦОФ БЕРЕЗОВСКАЯ» // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. № 6 (160). С. 39-46. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-6-39-46, EDN: QSJWКУ

Введение

Накопление золошлаковых отходов имеет серьезные экологические последствия. Золошлаки содержат различные вредные вещества, которые могут проникать в почву и воду, загрязняя окружающую среду и наносить вред здоровью людей и животных. Проблемы, связанные с накоплением золошлаковых отходов, с каждым годом становятся все более актуальными. К настоящему времени в отвалах накоплено порядка 1,5 млрд т золошлаковых отходов и с каждым годом эта цифра растет [1]. За год на территории Кемеровской области образуется более 2,3 млн т золошлаковых отходов, которые занимают территорию площадью свыше 1125 га [2]. С учетом предполагаемого роста угольной генерации к 2030 г. ожидается,

что ежегодный выход золошлаковых отходов на угольных ТЭС России составит не менее 35 млн т, и как следствие, объем накопленных золошлаковых отходов к 2030 г. может превысить 1,5 млрд т [3].

Для решения проблемы накопления золошлаковых отходов необходимы комплексные подходы и инновационные технологии. Одним из возможных решений является переработка золошлаковых отходов с целью извлечения полезных компонентов и уменьшения объема отходов. Также важно разработать стратегии по уменьшению образования золошлаковых отходов путем повышения эффективности производства и использования ресурсов [4]. В последние годы создаются новые технологические схемы обогащения и извлечения ценных и редких элементов из золошлаковых отходов. К настоящему времени накопился ряд технологических решений, позволяющих утилизировать некоторые виды золошлаковых отходов с целью извлечения из них ценных элементов. С помощью выщелачивания извлекают галлий, теллур, цезий, ниобий, индий, лантан и некоторые другие редкие элементы [5].

В ранних работах проведены эксперименты по выщелачиванию угольной золы с использованием трех видов кислот: соляной, азотной и серной. Все исследования проводились в одинаковых условиях [6]. Результаты показали, что извлечение при выщелачивании происходит в следующем порядке: соляная кислота > азотная кислота > серная кислота. Однако стоит отметить, что серная кислота менее летучая и более экономичная по сравнению с двумя другими кислотами.

В работе [7] также провели эксперименты по выщелачиванию золы углеродной переработки с использованием соляной, азотной и серной кислот. Получены несколько противоречивые результаты, но соляная кислота является наиболее часто используемым выщелачивающим средством. Ожидается, что серная кислота обеспечит наилучшую эффективность, так как остаточную кислоту обычно нейтрализуют известью (CaO), гашеной известью (Ca(OH)_2) или тонкоизмельченным известняком (CaCO_3), в результате реакций образуется плохо растворимый гипс. Его образование вызывает потери редкоземельных элементов, которые включаются в структуру гипса и теряются с осадком [8]. Извлечение редкоземельных элементов (РЗЭ) при выщелачивании зависит от соотношения жидкость/твердое вещество, концентрации кислоты, температуры и продолжительности выщелачивания [6, 9, 10].

В исследованиях [11] наибольшее извлечение редкоземельных элементов, составило 75,25% масс. Выщелачивание проводилось с использованием 1М H_2SO_4 , соотношения жидкости и твердого вещества 25 (мл/г) и времени выщелачивания 30 мин. В работе [12] использовали технологию азотнокислого выщелачивания, в результате степень извлечения суммы РЗЭ составила более 72% масс. Выщелачивание проводили при 70°C и концентрации азотной кислотой 150 г/л, отношение Ж:Т=4:1.

Экспериментальная часть, Результаты и их обсуждение

В качестве исходного сырья для выщелачивания редких и ценных металлов использовали золошлаковые отходы котельной АО «ЦОФ Березовская». Химический состав золных остатков определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии на спектрометре с индуктивно-связанной плазмой iCAP 7400 Duo. В результате анализа определены основные компоненты, составляющие золу: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MnO , MgO , TiO_2 , Na_2O , K_2O , P_2O_5 . Химический состав золы, образующейся при высокотемпературном сжигании угля, представлен в Таблице 1. Основными матричными элементами являются кремний, алюминий и железо.

Анализ химического состава золы котельной АО ЦОФ «Березовская» показал, что золы являются низкокальциевыми и кислыми [13]. На основании полученных данных были рассчитаны алюмосиликатный модуль и модуль кислотности [14]. Модуль кислотности больше двух, что удовлетворяет требованию к химическому составу кислых зол. Алюмосиликатный модуль является показателем содержания кремнезема, в исследуемом образце он равен 2,5 [14]. Содержание оксидов щелочных и щелочноземельных металлов в сумме составляет 2,3 %. Алюминий присутствует в золе в основном в форме муллита [15], который является очень устойчивым соединением.

Таблица 1. Химический состав золошлаковых отходов котельной АО «ЦОФ Березовская»
Table 1. Chemical composition of ash and slag waste from the boiler house of JC «TSOF Berezovskaya»

Оксиды, % масс.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
Зола	37,6	15,1	7,06	5,2	1,78	0,06	1,25	1,5	0,69

Таблица 2. Результаты кислотного выщелачивания азотной кислотой золошлаковых отходов котельной АО «ЦОФ Березовская»

Table 2. Results of acid leaching with nitric acid of ash and slag waste from the boiler house of JC «TSOF Berezovskaya»

Оксиды	W _{осадка} , % 6М/3М	m _{осадка} , Г 6М/3М	W _{щелок} , % 6М/3М	m _{щелока} , Г 6М/3М	Степень разделения осадок/щелок , 3М, %	Степень разделения осадок/щелок , 6М, %
Fe ₂ O ₃	4,380 / 4,284	4,117 / 3,513	54,113/ 55,492	7,035 / 7,769	31/69	37/63
CaO	1,918 / 1,715	1,803/ 1,406	22,718/ 21,824	2,953 / 3,055	32/68	38/62
Al ₂ O ₃	19,615 /20,160	18,438 / 16,531	16,732/ 17,135	2,175 / 2,399	87/13	89/11
SO ₃	0,437 / 0,240	0,411 / 0,197	2,661/ 2,632	0,346 / 0,37	65/35	54/46
SiO ₂	69,666 / 69,829	65,486/ 57,260	0,780 /-	0,101/-	100/-	99,8/0,2
K ₂ O	2,763 / 2,635	2,597 / 2,161	0,656 / 0,956	0,085 / 0,133	94/6	97/3
TiO ₂	0,991 / 0,937	0,932 / 0,768	0,651 / 0,668	0,085 / 0,094	89/11	92/8
SrO	0,056 / 0,048	0,052 / 0,039	0,406 / 0,396	0,053 / 0,055	41/59	50/50
MnO	0,037 / 0,036	0,035 / 0,030	0,388 / 0,410	0,050 / 0,057	34/65	41/59
Cl	-	-	0,335 /-	0,043/-	-	100/-
P ₂ O ₅	-	-	0,255 / 0,092	0,033 /0,013	-/100	-/100
V ₂ O ₅	0,055 /0,048	0,052 / 0,039	0,188 / 0,038	0,024 / 0,005	88/11	68/32
CuO	-	-	0,068 / 0,064	0,009 /0,009	-/100	-/100
Cr ₂ O ₃	0,009 / 0,008	0,008 / 0,007	0,050 / 0,031	0,007 / 0,004	64/36	53/46
NiO	0,005 / 0,004	0,005 /0,004	0,031 / 0,033	0,004 / 0,005	44/56	55/45
ZnO	0,008 /0,004	0,008 / 0,005	0,030 / 0,030	0,004 / 0,004	56/44	67/33
Ir ₂ O ₃	0,005 / 0,004	0,005 / 0,004	0,009 / 0,008	0,001 / 0,001	80/20	83/16
ZrO ₂	0,035 / 0,030	0,329/ 0,025	-	-	100/-	100/-
Y ₂ O ₃	0,005 / 0,004	0,005 /0,003	- /0,009	-/0,001	31/69	100/-
NbO	0,002 / 0,002	0,0003 /0,002	-	-	100/-	100/-
ThO ₂	0,001 / 0,001	0,0001 /0,001	-	-	100/-	100/-
Rb ₂ O	0,011 /0,010	0,001 /0,008	-	-	100/-	100/-
Tl ₂ O ₃	-/0,001	-/0,001	-	-	100/-	-
PbO	0,002/-	0,0003/-	-	-	-	100/-
CeO ₂	-	-	-/ 0,183	-/0,026	-/100	-

Фазовый состав золошлаковых отходов определяли на дифрактометре X PERT Powder

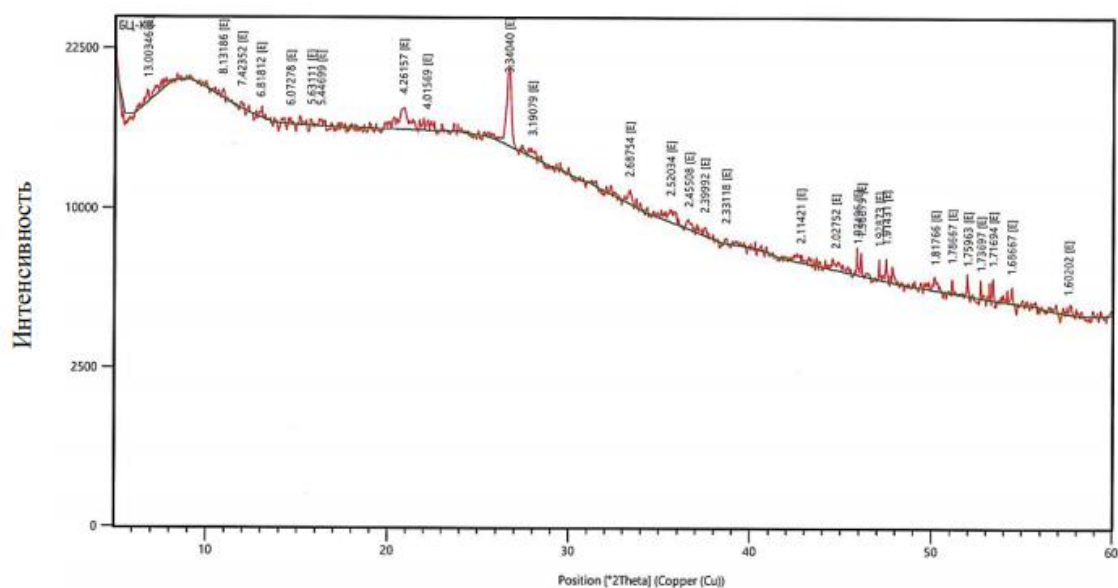


Рис. 1. Дифрактограмма валового состава образца золошлаковых отходов котельной АО «ЦОФ Березовская»

Fig. 1. Diffractogram of the gross composition of the sample of ash and slag waste of the boiler house of JC «TSOF Berezovskaya»

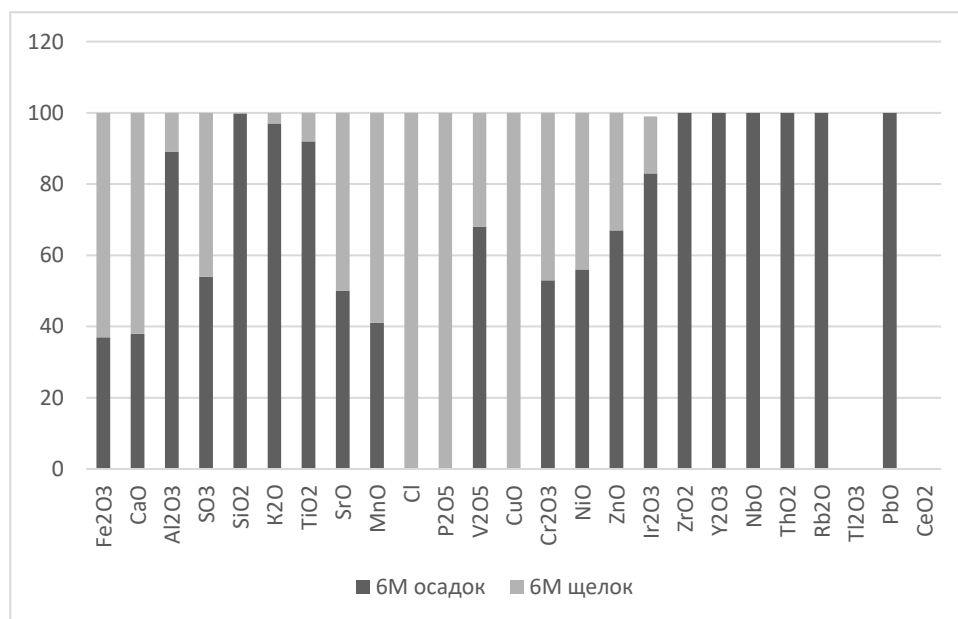


Рис. 2. Распределение оксидов между осадком и маточным раствором выщелачивания золы в 6M HNO₃

Fig. 2. Distribution of oxides between the sediment and the mother liquor of ash leaching in 6M HNO₃

фирмы Pananalitiscal. Рентгенограммы снимались с шагом около 0,02 в интервале 3-60° 2 θ с вращением 30 об/мин и выдержкой 0,1 сек в точке. Анализ выполнен при нормальных условиях с использованием CuK α -излучения.

В исследуемом образце присутствуют следы железа и муллита с характерными интенсивностями при углах отражения 45,7°, 18,3°, 35,1° и 41,1°. Наличие на дифрактограмме максимумов интенсивности пиков для углов 18,3°, 35,1° и 41,1° свидетельствует о присутствии магнезиоферрита, содержание которого составляет 10% масс. Кварц в образце находится в большом количестве (61% масс.), с характерными углами 20,8°, 26,7°, 36,8°, 50,2°. Остальные

характерные пики на дифрактограмме относятся к различным глинистым минералам с суммой 26% масс. (Рис. 1).

С целью определения возможности получения из золы котельной АО «ЦОФ Березовская» ценных и редких элементов было проведено кислотное выщелачивание и анализ состава остатка.

Одним из методов переработки золошлаковых материалов является выщелачивание кислотными реагентами, в качестве которых могут использоваться минеральные кислоты. Результаты определения растворимости золошлаковых отходов в азотной и серной кислотах показали, что в 30%-й азотной и серной кислотах растворимости равны 0,063 и 0,046 г/100 г растворителя соответственно. В азотной и серной кислотах с $\omega = 91\%$ 0,056 и 0,036 г/100 г растворителя.

Для получения оптимальных условий вскрытия золы азотной кислотой выбрана концентрация 6М и 3М. Вскрытие азотной кислотой проводили при температуре 70-80°C в массовом соотношении золы Т:Ж =1:2, при постоянном перемешивании. По истечению 4 ч суспензию фильтровали и отделяли нерастворимый осадок от маточного раствора выщелачивания. Твердый осадок промывали водой и высушивали в сушильном шкафу при температуре 105-110°C до постоянной массы. Фильтрат выпаривали на песочной бане, далее высушивали при температуре 105-110°C и прокаливали в муфельной печи до 700°C. Химический состав минеральной части образцов определялся на рентгенофлуоресцентном спектрометре «SHIMADZU EDX-7000P». Результаты исследования кислотного выщелачивания золошлаковых отходов приведены в Таблице 2.

По данным Таблицы 2 видно, что степень разделения незначительно лучше в 3М растворе азотной кислоты. Продуктами процесса выщелачивания золы котельной АО «ЦОФ Березовская» являются маточный раствор и твердый кремнеземистый осадок. Содержание SiO₂ в осадке 3М и 6М HNO₃, составляют соответственно 99,8 и 100% масс., что свидетельствует о слабом растворении кремнезема в азотной кислоте и максимальном концентрировании его в твердом осадке. На Рис. 2 и 3 представлено распределение оксидов между осадком и маточным раствором. В процессе выщелачивания медь полностью переходит в щелок. Железо, марганец, хром, цветные металлы частично переходят в раствор щелока и частично остаются в нерастворимой части осадка. Редкоземельные металлы остаются в осадке. Церий при выщелачивании золы в 3М азотной кислоте полностью переходит в раствор щелока.

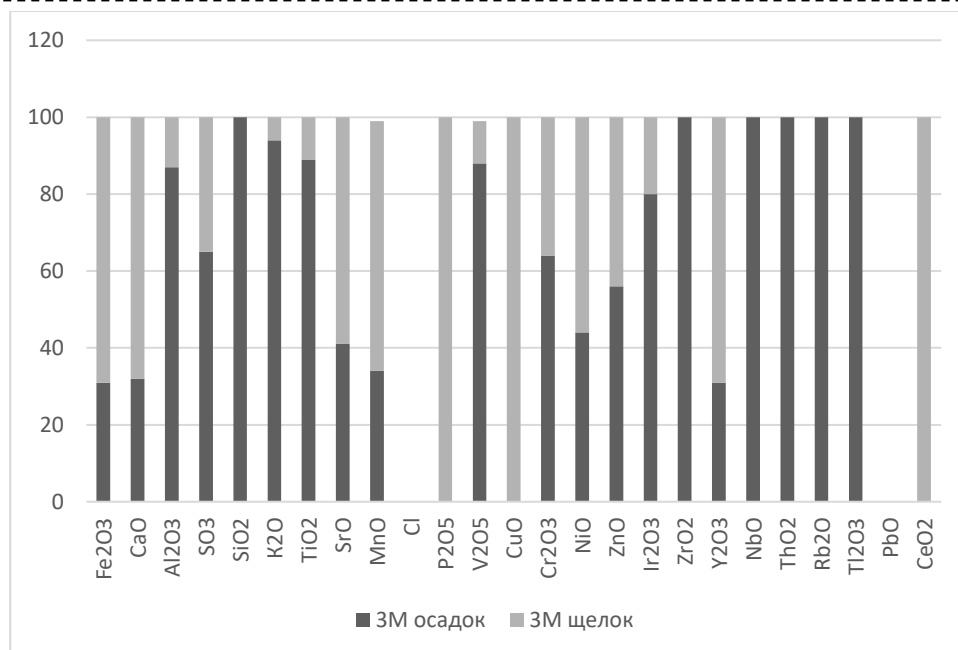


Рис. 3. Распределение оксида между осадком и маточным раствором выщелачивания золы в 3М HNO₃

Fig. 3. Distribution of oxide between the precipitate and the mother liquor of ash leaching in 3M HNO₃

Выводы

По результатам исследований химического состава золы после выщелачивания золошлаковых отходов выявлено, что кремний практически весь остается в нерастворимом остатке, а железо, кальций, стронций, марганец находятся и в растворе, и в осадке. Редкоземельные элементы за исключением церия находятся в нерастворимой части осадка.

Для вскрытия золы азотной кислотой предложена оптимальная концентрация 3М, так как степень разделения элементов с данной концентрацией выше.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Минобрнауки России (Соглашение № 075-15-2022-1194)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Путилова И. В. Текущее состояние проблемы обращения с угольной золой в России и за рубежом, аспекты угольной золы применение в водородной экономике [Электронный ресурс] // International Journal of Hydrogen Energy. 2023. 48 (1–3).
2. Черкасова Т. Г. [и др.] Определение промышленно значимых кондиций редких элементов в золошлаковых отходах Кузбасса // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2021. № 5. С. 37–44.
3. Косарев А. С. [и др.] Оценка возможности использования золошлаковых отходов теплоэнергетики при производстве гранулированного пористого заполнителя для легких бетонов и теплоизоляционных засыпок // Северо-кавказский регион. Технические науки. 2018. № 4. С. 111–117.
4. Афанасьева О. В. [и др.] Комплексное использование золошлаковых отходов // Проблемы энергетики. 2015. № 7–8. С. 26–35.
5. Ксенофонтов Б. С. [и др.] Золошлаки – перспективное сырье для получения редкоземельных металлов // Экология и промышленность России. 2014. № 4. С. 9–13.
6. Kumari A. [et al.] Novel approach to recover rare earth metals (REMs) from Indian coal bottom ash // Hydrometallurgy. 2019 Vol. 187. P. 1–7.
7. Tuan L. Q. [et al.] Leaching characteristics of low concentration rare earth elements in Korean (Samcheok) CFBC bottom ash samples // Sustainability. 2019. Vol. 11. 2562 p.
8. Dutrizac J. E. The behaviour of the rare earth elements during gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) precipitation // Hydrometallurgy. 2017. Vol. 174. P. 38–46.
9. Cao S. [et al.] Study on influence factors of leaching of rare earth elements from coal fly ash // Energy Fuels. 2018. Vol. 32. P. 8000–8005.
10. Tang M. [et al.] Study on extraction of rare earth elements from coal fly ash through alkali fusion // Acid leaching. Miner. Eng. 2019. Vol. 136. P. 36–42.
11. Widya R. Recovery of rare earth elements and Yttrium from Indonesia coal fly ash using sulphuric acid leaching, I. Made Bendiyasa, Indra Perdana, Ferian Anggara // AIP Conf. Proc. 2020. Vol. 2223. Iss. 1.
12. Балбекова Б. К., Таубаева Ш. М. Исследование возможности извлечения РЗЭ из золошлаковых отходов Карагандинской // Наука и техника Казахстана. 2020. № 2. С. 82–87.
13. Явинский А. В., Чулкова Л. Н. Анализ зарубежного опыта переработки золошлаковых отходов // Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции. 2021. С. 423–427.
14. Монгуш Г. Р. [и др.] Утилизация золошлаковых отходов процесса сжигания углей Улуг-Хемского бассейна Республики Тыва // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2016. №4 (48). 112–120.
15. Тагаев И. А. [и др.] Теоретические и практические аспекты изучения ангреноского бурого угля как возможного материала для получения сорбентов // Молодой ученый. 2018. № 23. С. 13–18.

© 2023 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Черкасова Татьяна Григорьевна, директор института химических и нефтегазовых технологий, докт. хим. наук, профессор, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: ctg.htnv@kuzstu.ru

Золотухина Наталья Анатольевна, доцент кафедры химии, технологии неорганических веществ и наноматериалов, канд. хим. наук, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: zna.htnv@kuzstu.ru

Буланова Татьяна Владимировна, доцент кафедры химии, технологии неорганических веществ и наноматериалов, канд. хим. наук, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: bulanovatv@kuzstu.ru

Винидиктова Юлия Александровна доцент кафедры химии, технологии неорганических веществ и

наноматериалов, канд. хим. наук, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: vinidiktovaua@kuzstu.ru
Ченская Валентина Васильевна, доцент кафедры химии, технологии неорганических веществ и наноматериалов, канд. хим. наук, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: cvv.htnv@kuzstu.ru

Заявленный вклад авторов:

Черкасова Татьяна Григорьевна – постановка исследовательской задачи, корректировка исследований;
Золотухина Наталья Анатольевна – обзор соответствующей литературы, эксперимент, сбор и анализ данных, выводы, написание текста;
Буланова Татьяна Владимировна – обзор соответствующей литературы, эксперимент, сбор и анализ данных, выводы, написание текста;
Винидиктова Юлия Александровна – обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных, выводы, написание текста;
Ченская Валентина Васильевна – обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

ANALYSIS OF ACID LEACHING PRODUCTS OF ASH AND SLAG WASTE FROM THE BOILER HOUSE OF JC «TSOF BEREZOVSKAYA»

Tatyana G. Cherkasova, Natalia A. Zolotukhina,
Tatyana V. Bulanova, Yulia A. Vinidiktova, Valentina V. Chenskaya

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

*for correspondence: ctg.htnv@kuzstu.ru



Article info

Received:
27 October 2023

Accepted for publication:
10 December 2023

Accepted:
12 December 2023

Published:
21 December 2023

Keywords: ash and slag waste, ash of the boiler house of JC «TSOF Berezovskaya», ash analysis and processing, leaching, extraction, rare and rare earth elements

Abstract.

The problems associated with the accumulation of ash and slag waste are becoming more and more urgent every year. Comprehensive approaches and innovative technologies are needed to solve these problems. One of the possible solutions is the processing of ash and slag waste in order to extract useful components and reduce the volume of waste. In recent years, new technological schemes have been created for the enrichment and extraction of valuable and rare elements from ash and slag waste from coal refining. Ash and slag waste from the boiler house of JC TSOF "Berezovskaya" was used as a raw material for leaching of rare and valuable metals. The chemical and phase composition of ash residues were determined. To obtain optimal conditions for opening the ash, 3M and 6M nitric acid were used. The chemical composition of the mineral part of the samples was determined on an X-ray fluorescence spectrometer. According to the results of chemical composition studies, after leaching of ash and slag waste, silicon remains almost entirely in an insoluble residue. Iron, manganese, chromium, non-ferrous metals partially pass into the liquor solution and partially remain in the sediment. An optimal concentration of 3M has been proposed for opening ash with nitric acid, since the results of ash leaching of 6M and 3M are approximately the same.

For citation: Cherkasova T.G., Zolotukhina N.A., Bulanova T.V., Vinidiktova Yu.A., Chenskaya V.V. Analysis of acid leaching products of ash and slag waste from the boiler house of JC «TSOF BEREZOVSKAYA». *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2023; 6(160):39-46. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2023-6-39-46, EDN: QSJWKU

REFERENCES

1. Putilova I.V. Current state of the problem of handling coal ash in Russia and abroad, aspects of coal ash application in the hydrogen economy [Electronic resource]. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023; 48(1–3). Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene> – [27.09.2023].
2. Cherkasova T.G. [et al.] Opredelenie promyshlennno znachimyykh konditsiy redkikh elementov v zoloshlakovykh otkhodakh Kuzbassa. *Vestnik Kuzbasskogo gos-udarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2021; 5:37–44. DOI: 10.26730/1999-4125-2021-5-37-44.
3. Kosarev A.S. [et al.] Assessment of the possibility of using ash and slag waste from thermal power engineering in the production of granular porous aggregate for lightweight concrete and heat-insulating backfills. *North Caucasus region. Technical science*. 2018; 4:111–117.
4. Afanasyeva O.V. [et al.] Integrated use of ash and slag waste. *Energy Problems*. 2015; 7–8:26–35.
5. Ksenofontov B.S. [et al.] Ash and slag – a promising raw material for the production of rare earth metals. *Ecology and industry of Russia*. 2014; 4:9–13.
6. Kumari A. [et al.] Novel approach to recover rare earth metals (REMs) from Indian coal bottom ash. *Hydrometallurgy*. 2019; 187:1–7.
7. Tuan L.Q. [et al.] Leaching characteristics of low concentration rare earth elements in Korean (Samcheok) CFBC bottom ash samples. *Sustainability*. 2019; 11. 2562 p.
8. Dutrizac J.E. The behaviour of the rare earth elements during gypsum (CaSO₄·2H₂O) precipitation. *Hydrometallurgy*. 2017; 174:38–46.
9. Cao S. [et al.] Study on influence factors of leaching of rare earth elements from coal fly ash. *Energy Fuels*. 2018; 32:8000–8005.
10. Tang M. [et al.] Study on extraction of rare earth elements from coal fly ash through alkali fusion. *Acid leaching. Miner. Eng.* 2019; 136:36–42.
11. Widya R. [et al.] Recovery of rare earth elements and Yttrium from Indonesia coal fly ash using sulphuric acid leaching, I. Made Bendiyasa, Indra Perdana, Ferian Anggara. *AIP Conf. Proc.* 2020; 2223(1).
12. Balbekova B.K., Taubaeva Sh.M. Study of the possibility of extracting rare earth elements from ash and slag waste of Karaganda. *Science and technology of Kazakhstan*. 2020; 2:82–87.
13. Yavinsky A.V., Chulkova I. L. Analysis of foreign experience in processing ash and ash waste. *Collection of materials of the VI International Scientific and Practical Conference*. 2021. Pp. 423–427.
14. Mongush G.R. [et al.] Recycling of ash and slag waste from the coal combustion process of the Ulug-Khem basin of the Republic of Tyva. *Modern high technology. Regional application*. 2016; 4(48):112–120.
15. Tagaev I.A. [et al.] Theoretical and practical aspects of studying Angren brown coal as a possible material for the production of sorbents. *Young scientist*. 2018; 23:13–18.

© 2023 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).
The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Tatiana G. Cherkasova, director of the Institute of Chemical and Oil-Gas Technologies, Dr. Sc.in Chemistry, professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (28 Street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: ctg.htnv@kuzstu.ru

Natalia A. Zolotukhina, associate Professor of the Department of Chemistry, Technology of Inorganic Substances and Nanomaterials, C. Sc. in Chemistry, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (28 Street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: zna.htnv@kuzstu.ru

Tatiana V. Bulanova, associate Professor of the Department of Chemistry, Technology of Inorganic Substances and Nanomaterials, C. Sc. in Chemistry, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (28 Street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: bulanovatv@kuzstu.ru

Yulia A. Vinidiktova, associate Professor of the Department of Chemistry, Technology of Inorganic Substances and Nanomaterials, C. Sc. in Chemistry, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (28 Street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: vinidiktovaua@kuzstu.ru

Valentina V. Chenskaya, associate Professor of the Department of Chemistry, Technology of Inorganic Substances and Nanomaterials, C. Sc. in Chemistry, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (28 Street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: cvv.htnv@kuzstu.ru

Contribution of the authors:

Tatyana G. Cherkasova – setting a research task, correcting research;

Natalia A. Zolotukhina – review of relevant literature, experiment, data collection and analysis, conclusions, writing a text;

Tatyana V. Bulanova – review of relevant literature, experiment, data collection and analysis, conclusions, writing the text;

Yulia A. Vinidiktova – review of relevant literature, data collection and analysis, conclusions, writing the text.

Valentina V. Chenskaya – review of relevant literature, data collection and analysis, conclusions, writing the text.

All authors have read and approved the final manuscript.

