

УДК 504.062.2

## РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УТИЛИЗАЦИИ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ

Шаповалов Валерий Васильевич<sup>1</sup>,  
wwshapovalov@gmail.com

Козырь Дмитрий Александрович<sup>2</sup>,  
kozyr.dmitriy@gmail.com

<sup>1</sup> Донецкий национальный технический университет,  
Россия, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58.

<sup>2</sup> Севастопольский государственный университет,  
Россия, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33.

**Актуальность исследования.** Мировой спрос на уголь в 2022 г. достиг исторического максимума 2013 г. и составил 8 млрд т. Увеличение спроса на уголь привело к интенсификации его добычи и, соответственно, к увеличению количества техногенных отходов – породных отвалов. Породные отвалы опасны для окружающей среды, однако их химический состав позволяет рассматривать породные отвалы как техногенные месторождения.

**Цель:** разработка ресурсосберегающей технологии утилизации породных отвалов горнодобывающей промышленности с получением глинозема и других полезных компонентов.

**Объект:** породные отвалы угольных шахт.

**Методы:** экспериментальные исследования влияния режима спекания шихты аргиллит–сода–мел на степень извлечения глинозема из аргиллита и на качество спека: определение массовой доли оксида алюминия титриметрическим методом; определение количества диоксида углерода в образцах волюмометрическим методом; определение потери влаги и продуктов реакций при прокаливании гравиметрическим методом.

**Результаты.** Проведен анализ содержания полезных компонентов в породных отвалах Донбасса, а также существующих технологий извлечения глинозема из техногенных месторождений с низким содержанием алюминия. Техногенные отходы могут быть значительной сырьевой базой производства на многие годы. Кроме получения востребованной продукции, переработка техногенных отходов позволит повысить уровень экологической безопасности горнопромышленных агломераций. Рассмотрена технология утилизации породных отвалов с применением метода спекания шихты порода–сода–мел. В ходе экспериментальных исследований было установлено, что метод спекания с добавлением соды, несмотря на относительно небольшой процент извлечения глинозема (75,2 %), позволяет значительно снизить температуру спекания шихты (до 850 °С) и повысить энергоэффективность метода.

### Ключевые слова:

Породный отвал, глинозем, спекание отходов, ресурсосбережение, выщелачивание.

### Введение

Сценарии развития человечества, опубликованные полвека назад в докладе «Пределы роста», предполагают остановку развития благосостояния жителей Земли до 2040 г., а после – его снижение. Средством изменения негативных сценариев является применение концепции устойчивого развития. Реализация устойчивого развития предусматривает деятельность в том числе по экологическому направлению – охране окружающей природной среды и естественных ресурсов. В свою очередь, охрана природных ресурсов и окружающей среды означает рациональное их использование и снижение влияния процессов, связанных с добычей на окружающую среду. Возрастающее потребление природных ресурсов приводит к истощению месторождений. Освоение техногенных месторождений позволит комплексно использовать природные ресурсы, получать новые виды продукции и реализовывать устойчивое развитие.

Растущий спрос на уголь для производства энергии требует интенсивной добычи [1]. Добыча угля приводит к образованию техногенных отходов – породных отвалов. В 2021–2022 гг. добыча угля в Ин-

дии и образование породы составили примерно 850 млн т, 1952,220 млн м<sup>3</sup>, соответственно, при значении коэффициента вскрыши равном 3,12 [2]. В промышленно развитом Донском регионе, как и в целом в России, также существует потребность в утилизации породных отвалов [3]. Они представляют угрозу для экологической безопасности горнопромышленных регионов, но также они содержат до 25 % глинозема, сырья для производства алюминия. На данный момент на территории Донбасса находится около 600 породных отвалов. Накопление отходов горнодобывающей промышленности на отвалах вызывает выброс многочисленных токсичных соединений (сероводород, диоксид серы, оксиды азота и углерода, бензол, тяжелые металлы) в атмосферу [4]. Водная и ветровая эрозия приводит к смыву в природную среду до 400 м<sup>3</sup>/га породы в год и выносу более 150 т/год породы с гектара его поверхности соответственно [5]. Горение породных отвалов представляет угрозу населению и сотрудникам пожарных служб [6]. Самовозгорание отходов угледобычи является серьезной проблемой в ведущих странах по добыче и потреблению угля [7].

Существует ряд мировых технологий обращения с породными отвалами – использование породы в выработанном пространстве шахт, рекультивация породных отвалов и их утилизация. Одним из перспективных направлений обращения с отвалами является их использование в строительной промышленности. Исследователями рассмотрена возможность использования строительных отходов и отходов горнодобывающей промышленности для производства бетонных смесей с увеличением их прочности и снижением количества цемента [8]. Однако это направление не является ресурсосберегающим.

В мировом масштабе бокситы с содержанием глинозема ( $Al_2O_3$ ) от 32 до 60 %, нефелины и алуниты являются основным сырьём для производства алюминия. Производство алюминий содержащего глинозема основано на различных способах получения алюминатных растворов и их свойстве самопроизвольно разлагаться при снижении концентрации и температуры на щелочь и гидроксид алюминия [9].

Основная масса породных отвалов Донбасса состоит из разных по крупности осадочных пород: аргиллитов (до 30 %), алевролитов (до 20 %), глинистых алевролитов (до 15 %), песчаников (около 10 %), обломков известняка. По мнению исследователей, средний состав пород отвалов Донбасса характеризуется содержанием в породе таких химических компонентов, как 56,43 %  $SiO_2$ , 26,01 %  $Al_2O_3$ , 8,20 %  $Fe_2O_3$  [10].

Анализ проб отвальных пород Донбасса показал отсутствие в них аномальных концентраций микроэлементов [11]. Исследователями выделены четыре зоны отвальных пород по содержанию в них  $Al_2O_3$ :

1. Первая зона представлена первичным рыхлым материалом отвала черного цвета. Содержание  $Al_2O_3$  составляет 17,73 %.
2. Переходная зона, вишневого и бурого оттенка. Выделяются вкрапления серы желтого цвета. Содержание  $Al_2O_3$  составляет 18,43 %.
3. В зоне сульфатной минерализации породы приобретают красный цвет. Содержание  $Al_2O_3$  составляет 17,97 %.
4. Окисленные породы кирпично-красного цвета с содержанием 20,86 %  $Al_2O_3$ .

Анализ породных отвалов г. Донецка показал, что наиболее часто встречающаяся концентрация  $Al_2O_3$  составляет 20–25 % (рис. 1) [11].

В породах отвалов находится ряд ценных редкоземельных металлов, содержание которых может превышать их кларки в земной коре. Общее содержание ценных элементов в отвале может составлять 230–260 г/т при целесообразности их промышленной добычи от 10 г/т. Кроме этого, в породных отвалах содержится в оксидной форме не менее 20 % железа [12].

Определено, что содержание оксида алюминия в перегоревшей породе на 6,76 % выше, чем в породе из очага горения [13]. По мнению исследователей, содержание германия и галлия в породных отвалах шахт Луганской Народной Республики может различаться – содержание германия колеблется от 0,015 до

2 мг/кг породы, содержание галлия – от 0,0015 до 2 мг/кг породы. Известно, что наибольшие концентрации германия содержит уголь низких стадий метаморфизма [10].

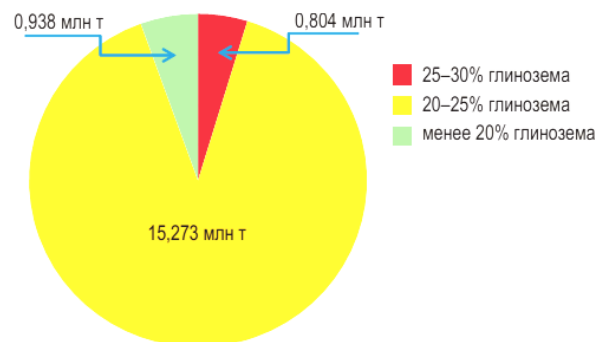


Рис. 1. Распределение прогнозных запасов глинозема в породной массе отвалов в соответствии с уровнями концентрации  $Al_2O_3$

Fig. 1. Distribution of alumina forecast reserves in the rock mass of dumps in accordance with the concentration levels of  $Al_2O_3$

При исследовании содержания редкоземельных, редких и цветных микроэлементов в породных отвалах одной из шахт в г. Донецке были выявлены их повышенные концентрации по отношению к кларку: хлор (превышение в 2,27 раза), свинец (превышение в 2,85 раза), титан (превышение в 1,22 раза), ванадий (превышение в 1,36 раз), хром (превышение в 1,28 раз), галлий (превышение в 2,55 раза), германий (превышение в 4,5 раза), ниобий (превышение в 2,27 раза) (табл. 1).

Таблица 1. Содержание микроэлементов в породных отвалах шахты в г. Донецке в граммах на 1 т породы

Table 1. Content of trace elements in the waste dumps of the mine in Donetsk in grams per 1 ton of rock

Наименование элемента Element name	Содержание микроэлементов, г/т Content of microelements, g/t			
	Кларковые содержания Clark content	Минимальные промышленные содержания Minimum industrial contents	Отвал № 1 Waste dump no. 1	Отвал № 2 Waste dump no. 2
Титан Titanium	3900	5000	5000	–
Ванадий Vanadium	110,0	100,0	150,0	–
Хром Chromium	78,0	100,0	100,0	30,0
Галлий Gallium	17,0	20,0	43,3	–
Германий Germanium	1,4	2,5	6,3	–
Хлор Chlorine	152	–	340	–
Свинец Plumbum	17,5	50,0	50,0	–
Ниобий Niobium	8,8	100,0	20,0	–

В настоящее время накоплен достаточный опыт использования технологий получения оксида алюми-

ния и других ценных компонентов из техногенных месторождений. Исследователями предложен способ кислотного биохимического выщелачивания алюминия из породных отвалов с применением бактерий *Th. Ferrooxidans* [10]. Из породных отвалов Подмосквовного угольного бассейна путём обжига и выщелачивания серной кислотой получен коагулянт сульфата алюминия [14].

Для извлечения германия и других редкоземельных элементов из отвальной породы применяется способ электростатической сепарации. В настоящее время в МакНИИ разработан перспективный способ переработки горной массы, основанный на электро-взрывных технологиях [15].

Исследования породных отвалов в Польше направлены на использование породы в качестве энергетического концентрата. Так, при обработке породы с применением отсадочного устройства получен энергетический концентрат высокого качества с зольностью менее 12 % и высшей теплотворной способностью более 26 МДж/кг [16]. Технико-экономическое обоснование переработки одного породного отвала в Польше показало, что извлечение угля экономически оправдано [17]. Результаты исследований химического состава породных отвалов Верхнесилезского угольного бассейна показали, что основными компонентами породных отвалов являются 45,22 % SiO<sub>2</sub> и 18,48 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [18]. Летучая зола также является техногенным сырьем. Зола, образованная при горении лигнита, состоит из SiO<sub>2</sub> (15–45 %), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10–25 %), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (4–15 %) и других компонентов [19]. Для повышения устойчивости склонов породных отвалов исследователями предложен способ их укрепления путем смешивания летучей золы и породы отвалов горной промышленности [20]. Исследователи извлекали Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> из летучей золы смешанно-щелочным гидротермальным способом. В оптимальных условиях степень извлечения глинозема достигала 91,3 % [21].

Для извлечения металлов из техногенных месторождений активно применяются дезинтеграторы. Предварительная активационная обработка промышленных отходов Гайского ГОК в дезинтеграторах приводит к ускорению процесса выщелачивания и наиболее полному извлечению полезных компонентов (железо, медь, цинк, алюминий, магний). Обра-

ботка отходов 20 % раствором серной кислоты после активации в дезинтеграторе позволила увеличить эффективность экстракции в среднем до 80 % [22]. Установлено, что при приготовлении закладочного материала для выработанного пространства традиционные компоненты можно заменить техногенными отходами горнодобывающих производств. Активация промышленных отходов, используемых в закладочном композите, повышает прочность массы после затвердевания до 40 % [23].

При систематизации результатов агитационного выщелачивания хвостов, агитационного выщелачивания после обработки в дезинтеграторе и реагентного выщелачивания в дезинтеграторе установлено, что реагентная обработка хвостов обогащения в дезинтеграторе на два порядка быстрее по сравнению с агитационным выщелачиванием [24]. Извлечение железа из хвостов мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов обогатительной фабрики Лебединского ГОК (содержание железа 8 %) методом агитационного выщелачивания показало эффективность извлечения до 3,2 %, а после обработки в дезинтеграторе – до 4,4 % [25].

Исследование получения металлов (Zn, Cd, Ga) из отходов заброшенных шахт в г. Горно, Италия, показало, что из измельченной до размеров <0,5 мм породы при обогащении на вибрационном столе было извлечено 66 % Cd, 56 % Ga и 64 % Zn. Эти же образцы при измельчении породы до размеров 0,063–0,16 мм и применении пенной флотации показали извлечение Cd, Ga и Zn до 61, 72 и 47 % соответственно [26].

Перспективными являются способы спекания породы с известняком или мелом. При этом получают саморассыпающиеся спеки, которые в дальнейшем перерабатывают щелочными методами. Белитовый шлам, остающийся после извлечения глинозема, представляет собой силикаты кальция – составную часть цементного клинкера. При использовании белитового шлама как минеральной добавки в цемент (замена клинкера белитом в количестве 10 и 20 %) прочность на сжатие в 28-ми дневном возрасте уменьшилась лишь на 5,2 и 14 % соответственно. Расчеты сырьевых шихт показали возможность использования смеси на основе мела и белитового шлама для производства цементного клинкера (табл. 2) [27].

**Таблица 2.** Результаты расчетов смеси на основе белитового шлама

**Table 2.** Calculation results for a mixture based on belite sludge

Смесь Mixture	Химический состав клинкера, мас. %/Chemical composition of clinker, wt. %						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	R <sub>2</sub> O	Прочее/Other
Белитовый шлам (80,3 %) + мел (19,7 %) Belite sludge (80,3 %) + chalk (19,7 %)	24,76	1,73	1,21	67,06	1,58	0,88	2,77

Из спека, полученного спеканием шихты аргиллит–каолин–мел, глинозем эффективно извлекается содовым раствором [28]. Оптимальными условиями выщелачивания спека являются: концентрация содового раствора – 100–120 кг/м<sup>3</sup> Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>; температура процесса 70 °С на протяжении 10–30 мин.; соотношение жидкой и твердой фаз 1,5–2. При соблюдении

вышеперечисленных условий степень извлечения глинозема будет составлять до 92,7 %.

Главной проблемой извлечения из породных отвалов глинозема является преобладающее содержание в них кремнезема, который препятствует извлечению глинозема. Целью исследования является разработка ресурсосберегающей технологии утилизации пород-

ных отвалов горнодобывающей промышленности с получением глинозема и других полезных компонентов.

### Материалы и методы

Поскольку исследование предполагало использование высоких температур, нами была разработана и изготовлена лабораторная электрическая муфельная печь с максимальной температурой нагрева 1600 °С (рис. 2) и компьютерным управлением.



Рис. 2. Муфельная лабораторная печь

Fig. 2. Muffle laboratory furnace

Внутренняя обкладка печи была изготовлена из корундового легковеса. В качестве нагревателей в печи использовались молибденовые спирали, заключенные в корундовые трубки (рис. 3). Подача аргона в нагреватель для защиты молибдена от окисления

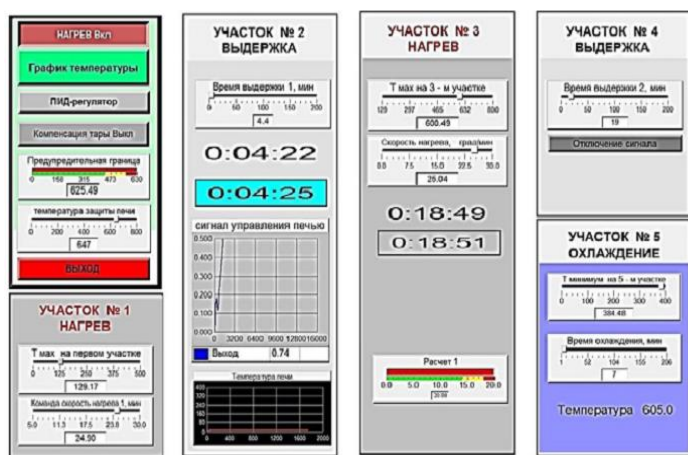
осуществлялась через конструкционные элементы на торцах нагревателя, которые одновременно служили и токоподводами.

Так как с помощью ручного регулирования довольно тяжело получить воспроизводимый результат, процесс спекания был автоматизирован с помощью ряда вспомогательной аппаратной и программной составляющих. Программа управления печью была разработана на основе пакета MasterSCADA (рис. 4). В качестве интерфейсов сопряжения программной и аппаратной части использовались OPC сервер и конфигуратор фирмы ОВЕН. Контроль и управление процессом нагрева осуществлялись прибором ОВЕН ТРМ202 через твердоточное реле HD-2525.LA. При заданном режиме нагрева в печи размещали две лодочки с шихтой одинакового состава.



Рис. 3. Нагреватель печи

Fig. 3. Furnace heater



а/а



б/б

Рис. 4. Окно оператора работы печи (а), блок управления печью (б)

Fig. 4. Window of the furnace operation operator (a), furnace control unit (b)

Массовую долю извлекаемого из спеков оксида алюминия определяли титриметрическим методом [29]. При pH=5,2–5,8 и титровании избытка трилона Б раствором сернокислого цинка образуется трионат-

ный комплект алюминия. В качестве индикатора использовали ксиленоловый оранжевый.

Оценка количества диоксида углерода в образцах осуществлялась волнометрическим методом путем



разложения образцов раствором соляной кислоты (1:1) и измерением объема выделившегося газа. Определение потери влаги и продуктов разложения соды и мела при прокаливании проводилось гравиметрическим методом анализа.

#### Экспериментальные исследования

Для оценки возможности применения породных отвалов Донбасса как сырья для получения глинозёма были проведены экспериментальные исследования по спеканию шихты аргиллит–мел–сода.

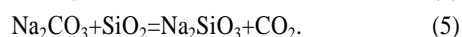
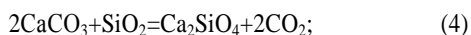
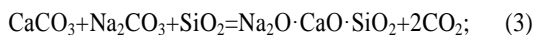
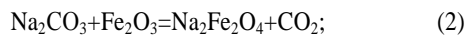
Порода отвалов шахт Донбасса использовалась в качестве сырья, содержащего алюминий (аргиллит). Отходы содового производства гранулометрическим составом менее 30 мм использовались в качестве кальцийсодержащего компонента шихты (мел).

Исходя из известных методов переработки низкокачественного глиноземсодержащего сырья основные стадии переработки включают: подготовку сырьевых материалов; приготовление шихты; спекание шихты; выщелачивание спека после спекания с целью извлечения глинозема и перевода его в раствор; отделение раствора от шлама; очистка раствора от кремния; карбонизация раствора и отделение осадка гидроксида алюминия от раствора; прокаливание гидроксида алюминия; переработка шлама в цемент.

Наиболее ответственной операцией является подготовка сырьевых компонентов и их спекание. От правильно подобранного состава шихты для спекания, а также режима спекания и охлаждения в определяющей степени зависит степень извлечения глинозема. В экспериментальных исследованиях были выполнены опыты с изменением температуры спекания шихты (°С), времени выдержки (мин) при увеличенном и уменьшенном содержании соды и мела в шихте, с заменой мела на соду (табл. 3).

#### Результаты исследований

Установлено, что при прокаливании шихты состава аргиллит–сода–мел саморассыпавшийся спек не образуется. В зависимости от условий возможно образование спека рыхлой структуры, который легко поддается измельчению, и спека стеклообразного вида. Суммарно процесс взаимодействия в системе аргиллит–мел–сода можно представить системой уравнений:



Сода используется для связывания железа и алюминия с образованием растворимого алюмината натрия по реакции (1) и нерастворимого феррита натрия по реакции (2), соответственно. Мел используется для связывания кремния в нерастворимые силикаты по реакциям (3), (4). Образование растворимого алюмината натрия по реакции (1) позволяет осуществлять выщелачивание спека водой. Во время

прокаливания происходит потеря массы за счет  $\text{CO}_2$ , выделяющегося во время реакций (1)–(5), сопровождающих спекание. Этот факт позволяет контролировать степень спекания шихты. Реакции (4), (5) принципиально не важны для извлечения алюминия, но могут существенно влиять на механические свойства спека, поэтому проводились также эксперименты как с избытком мела и соды, так и с их недостатком по сравнению со стехиометрическим составом.

Отобранные в отвалах образцы аргиллита имели усредненный состав по основным компонентам:  $\text{SiO}_2$  – 58,2 %,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 18 %,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 8,87 %. Исходя из содержания компонентов аргиллита, для осуществления реакций (1)–(3) стехиометрической шихте соответствует следующий состав, мас. %: аргиллит – 30,79, сода – 39,35, мел – 29,86, или в весовом соотношении 1:1,28:0,97. Масса и схема распределения компонентов для отдельного опыта стехиометрического состава представлены на рис. 5.

Расчет ожидаемой потери массы при прокаливании шихты стехиометрического состава за счет влаги компонентов, разложения мела и соды показал, что общая потеря массы при спекании должна составлять 30,97 %.

Результаты серии экспериментов приведены в табл. 3. На примере стехиометрических составов (1)–(4) видно, что существенное влияние на качество спека и степень извлечения глинозема оказывает время выдержки при заданной температуре. Если после нагрева сразу произвести охлаждение (опыт 1), то получаются спеки с низкой степенью извлечения глинозема. Увеличение времени выдержки (опыт 2) положительно сказывается на качестве спека (рис. 6) и степени извлечения глинозема. Увеличение времени выдержки позволяет обеспечить достаточно высокую степень извлечения глинозема и при понижении максимальной температуры спекания шихты (опыты 3, 4).

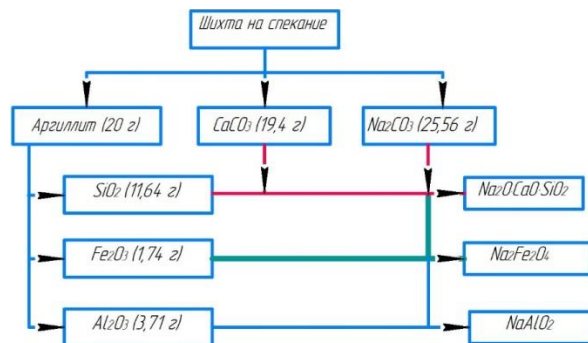


Рис. 5. Схема распределения компонентов стехиометрической шихты аргиллит–мел–сода в процессе спекания

Fig. 5. Scheme of distribution of components of stoichiometric charge argillite–chalk–soda during sintering

В пределах 850–900 °С с повышением температуры фиксируется увеличение степени извлечения глинозема при одном и том же времени выдержки (опыт 4).

**Таблица 3.** Результаты исследования влияния режима спекания шихты аргиллит (А) – сода (С) – мел (М) на степень извлечения глинозема из аргиллита и на качество спека

**Table 3.** Results of studies of the influence of the sintering regime of the charge argillite (A) – soda (C) – chalk (M) on the degree of extraction of alumina from argillite and on the quality of the sinter

№ опыта Experiment number	Массовое соотношение компонентов Mass ratio of components	А	С	М	Температура спекания, °С Sintering temperature, °C	Время выдержки, мин Holding time, min	Степень извлечения глинозема, % Alumina extraction degree, %	Состояние спека Sinter state
1	Стехиометрический состав Stoichiometric composition	1	1,28	0,97	1050	–	9,2	Трудно извлекаемый Difficult to extract
2		1	1,28	0,97	1050	60	64,5	
3		1	1,28	0,97	850	120	66,7	
4		1	1,28	0,97	900	120	75,2	
5	Увеличенное содержание соды на 3,5 % Increased soda content by 3,5 %	1	1,323	0,97	900	120	67,2	Пористый, легко извлекается и измельчается Porous, easy to extract and crush
6	Увеличенное содержание соды на 19,4 % Increased soda content by 19,4 %	1	1,528	0,97	1050	60	51,5	
7	Увеличенное содержание соды на 19,4 % Increased soda content by 19,4 %	1	1,528	0,97	1250	30	54,0	Прочный, трудно извлекаемый Durable, hard to extract
8	Уменьшенное содержание соды на 19,4 % Reduced soda content by 19,4 %	1	1,028	0,97	1250	30	68,5	
9	Увеличенное содержание мела на 10,3 % Increased chalk content by 10,3 %	1	1,28	1,07	1250	30	52,1	Прочный, трудно извлекаемый Durable, hard to extract
10	Уменьшенное содержание мела на 10,3 % Reduced chalk content by 10,3 %	1	1,28	0,87			52,2	
11	Мел заменен на соду Chalk replaced with soda	1	2,0		900	60	–	Стеклообразный спек Glassy sinter

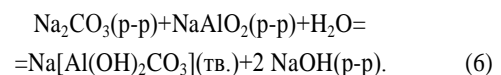
Установлено, что при стехиометрическом составе шихты аргиллит–мел–сода потеря массы при спекании в среднем составила 31,8 %, что незначительно отличается от расчетного значения. Полученные результаты вполне соответствует представлениям химической кинетики в твердофазных гетерогенных системах, согласно которым степень превращения увеличивается с ростом температуры и времени реакции.



**Рис. 6.** Спек после нагрева стехиометрической шихты аргиллит–мел–сода при 900 °С с выдержкой 120 минут

**Fig. 6.** Sinter after heating a stoichiometric mixture of argillite–chalk–soda at 900 °C with an exposure of 120 minutes

Увеличенное содержание соды (опыты 5, 6) несколько снижает степень извлечения глинозема, но спек получается удовлетворительного качества. Средняя фактическая потеря массы при спекании составила 28,5 % (опыт 6). Это связано с тем, что избыток соды не прореагировал с образованием CO<sub>2</sub>. Наличие в спеке соды при выщелачивании его водой приводит к ее растворению и образованию с алюминатом натрия нерастворимого гидроалюмокарбоната натрия Na[Al(OH)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>], вследствие чего уменьшается степень извлечения Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:



Данное предположение подтверждается экспериментально. В спеке после выщелачивания водой остается некоторая часть глинозема (~10 %), которая извлекается раствором кислоты. При этом диоксид углерода из водной вытяжки не выделяется, что указывает на то, что сода в растворе практически отсутствует. В спеке, оставшемся после выщелачивания глинозема и промывом многократно дистиллированной водой, диоксид углерода определяется, что свидетельствует о его наличии в нерастворимых соединениях. Эти факты не противоречат реакции (6).

Повышение температуры спекания шихты до 1250 °С при различном соотношении компонентов в исходной шихте не увеличивает существенно степень извлечения глинозема (опыты 7–10), но при этом образуются прочные, трудноизвлекаемые спеки.

При замене мела в шихте на эквивалентное количество соды образуются агрессивные расплавы, приводящие к разрушению лодочек из нержавеющей стали (рис. 8).



Рис. 8. Спекание шихты аржиллит–сода. Температура 900 °С

Fig. 8. Sintering of the argillite-soda charge. Temperature 900 °С

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Review of preventive and constructive measures for coal mine explosions: an Indian perspective / S.K. Ray, A.M. Khan, N.K. Mohalik, D. Mishra, S. Mandal, J.K. Pandey // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2022 – V. 32 – Iss. 3. – P. 471 – 485. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2022.02.001> (дата обращения 15.11.2022).
2. A review on the geotechnical response of fly ash-colliery spoil blend and stability of coal mine dump / S. Dandin, M. Kulkarni, M. Wagale, S. Sathe // *Cleaner Waste Systems*. – 2022 – V. 3. – 100040. URL: <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2022.100040> (дата обращения 15.11.2022).
3. Бесцементные закладочные смеси на основе водорастворимых техногенных отходов / М. Хайрутдинов, Ч. Конгар-Сюрюн, Ю. Тюляева, А. Хайрутдинов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 11. – С. 30–36. DOI: 10.18799/24131830/2020/11/2883.
4. The origin of GHG's emission from self-heating coal waste dump: Atmogeochemical interactions and environmental implications / G. Maciej, B. Yaroslav, S. Dariusz, N. Jaroslaw // *International Journal of Coal Geology*. – 2022 – V. 250. – 103912. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2021.103912> (дата обращения 15.11.2022).
5. Высоцкий С.П., Козырь Д.А. Экологический мониторинг породных отвалов горнопромышленных агломераций // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 37–46. – DOI: 10.18799/24131830/2021/11/2964.
6. Жданова А.О., Исламова А.Г., Копылов Н.П. Взаимодействие капель огнетушащих составов с фрагментами горючих материалов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 7. – С. 7–19. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3689.
7. Development of a petrographic classification system for organic particles affected by self-heating in coal waste. (An ICCP Classification System, Self-heating Working Group – Commission III) / M. Misz-Kennan, J. Kus, D. Flores, C. Avila, Z. Büçkün, N. Choudhury, K. Christanis, J.P. Joubert, S. Kalaitzidis, A.I. Karayigit, M. Malecha, M. Marques, P. Martizzi, J.M.K. O'Keefe, W. Pickel, G. Predeanu, S. Pusz, J. Ribeiro, S. Rodrigues, A.K. Singh, I. Suárez-Ruiz, I. Sýkorová, N.J. Wagner, D. Životić // *International Journal of Coal Geology*. – 2020. – V. 220. – 103411. DOI: 10.1016/j.coal.2020.103411.
8. Industrial waste in concrete mixtures for construction of underground structures and minerals extraction / Ch. Kongar Syuryun, Y. Tyulyaeva, A. Khairutdinov, T. Kowalik // *Construction the Formation of Living Environment (FORM-2020)*. – Hanoi: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. – V. 869. – 032004. DOI: 10.1088/1757-899X/869/3/032004.
9. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям 11-2019 «Производство алюминия». – М.: Бюро НДТ, 2019. – 247 с.
10. Получение металлов из терриконов угольных шахт Донбасса: монография / Л.Г. Зубова, А.Р. Зубов, К.И. Верех-Белоусова, Н.В. Олейник. – Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2012. – 144 с.
11. Выборов С.Г., Силин А.А. Перспективы отвалных пород в качестве алюминиевого сырья // *Уголь Украины*. – 2012. – № 6. – С. 33–39.
12. Петлеваний М.В., Гайдай А.А. Анализ накопления и систематизация породных отвалов угольных шахт, перспективы их разработки // *Геотехнічна механіка*. – 2017. – № 136. – С. 147–158.
13. Чоботько И.И., Тынына С.В. Рентгенофлуоресцентное исследование химического состава образцов породного отвала // *Техническая инженерия*. Житомир. – 2020. – № 1 (85). – С. 249–254.
14. Наумов К.И., Шведов И.М., Малолетнев А.С. Применение новых технологий для получения коагулянта (сульфата алюминия) из углеотходов // *ГИАБ*. – 2014. – № 5. – С. 67–72.
15. К вопросу извлечения редкоземельных металлов из породных отвалов угольных шахт / А.Г. Мнухин, Н.А. Мнухина, А.А. Гитуляр, И.П. Горошко // *Уголь Украины*. – 2017. – № 7–8. – С. 64–66.
16. Coal recovery from a coal waste dump / Z. Róžański, T. Suponik, P. Matusiak, D. Kowol, J. Szpyrka, M. Mazurek, P. Wrona // *E3S Web of Conferences*. – 2016. – V. 8 – 01052. DOI: 10.1051/e3sconf/20160801052.
17. Gawor Ł. Coal mining waste dumps as secondary deposits exemplified on Upper Silesian coal basin and Lublin coal basin // *Geology, Geophysics and Environment*. – 2014. – V. 40 (3). – P. 285–289. DOI: 10.7494/geol.2014.40.3.285128525.
18. Management of mining waste and the areas of its storage – environmental aspects. / Z. Róžański, T. Suponik, P. Matusiak, D. Kowol, J. Szpyrka, M. Mazurek, P. Wrona // *Gospodarka Surowcami Mineralnymi. Mineral Resources Management*. – 2019. – V. 35. – Iss. 3. – P. 119–142. DOI: 10.24425/gsm.2019.128525.
19. Yadav V.K., Fulekar M.H. The current scenario of thermal power plants and fly ash: Production and utilization with a focus in India // *Int. J. Adv. Eng. Res. Dev.* – 2018. – V. 5. – P. 768–777.
20. Sandeep N. Utilization of recycled form of concrete, E-wastes, glass, quarry rock dust and waste marble powder as reliable construction materials // *Materials Today: Proceedings*. 2021 – V. 45 – P. 2. – P. 3231–3234. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.381> (дата обращения 15.11.2022).
21. Extraction of alumina from coal fly ash by mixed-alkaline hydrothermal method / L. Huiquan, J. Hui, C. Wang, W. Bao,

#### Выводы

1. Оценка количества техногенных отходов показывает, что они могут быть значительной сырьевой базой производства на многие годы. Кроме получения востребованной продукции, переработка техногенных отходов позволит решить многие экологические и социальные проблемы.
2. Реализацию процесса извлечения глинозема на данный момент можно перспективно осуществить двумя способами. Спекание с мелом обеспечивает более высокий процент извлечения, но является более энергозатратным. Спекание с добавлением соды имеет меньший процент извлечения глинозема, но позволяет снизить температуру спекания вплоть до ~850 °С.
3. Главной задачей при разработке данного метода извлечения глинозема из техногенных отходов является обоснование технологических приемов для максимального возврата соды в производственный цикл.

- Z. Sun // Hydrometallurgy. – 2014. – № 147–148. – P. 183–187. DOI: 10.1016/j.hydromet.2014.05.012.
22. Renewable-resource technologies in mining and metallurgical enterprises providing environmental safety / J. Rybak, A. Adigamov, C. Kongar-Syuryun, M. Khayrutdinov, Y. Tyulyaeva // Minerals. – 2021. – V. 11. – 1145. DOI: 10.3390/min11101145
23. Creation of backfill materials based on industrial waste / J. Rybak, C. Kongar-Syuryun, Y. Tyulyaeva, A.M. Khayrutdinov // Minerals. – 2021. – V. 11. – 739. URL: <https://doi.org/10.3390/min11070739> (дата обращения 15.11.2022).
24. Механохимическая технология извлечения железа из хвостов обогащения / В.И. Голик, Ю.В. Дмитрак, Ю.И. Разоренов и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2021. – Т. 64. – № 4. – С. 282–291. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-4-282-291.
25. Исследование процессов выщелачивания металлов из хвостов обогащения руд / В.И. Голик, О.З. Габараев, Ю.И. Разоренов, С.А. Масленников // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2022. – Т. 65. – № 7. – С. 511–518. DOI: 10.17073/0368-0797-2022-7-511-518.
26. Assessment of the possible reuse of extractive waste coming from abandoned mine sites: case study in Gorno, Italy / N. Mehta, G.A. Dino, I. Passarella, F. Ajmone-Marsan, P. Rossetti, D.A. De Luca // Sustainability. – 2020. – V. 12. – 2471. URL: <https://doi.org/10.3390/su12062471> (дата обращения 15.11.2022).
27. Клименко А.А., Шаповалова Т.В., Реброва Л.М. Использование белитового шлама глиноземного производства в качестве добавки при получении цемента // Научные труды ДонНТУ. – 2014. – № 3 (23). – С. 189–194.
28. Шаповалов В.В., Козырь Д.А. Ресурсосберегающая технология комплексной утилизации отвалов угледобывающих производств с получением глинозема и вяжущих материалов // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2021. – № 5 (151). – С. 54–60.
29. Тихонов В.Н. Аналитическая химия алюминия. – М.: Наука, 1971. – 266 с.

Поступила: 26.11.2022 г.

Прошла рецензирование: 02.12.2022 г.

#### Информация об авторах

**Шаповалов В.В.**, доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной экологии и охраны окружающей среды Донецкого национального технического университета.

**Козырь Д.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэкологии и экологической безопасности Севастопольского государственного университета.



UDC 504. 062.2

## RESOURCE-SAVING TECHNOLOGY FOR UTILIZATION OF WASTE DUMPS OF MINING INDUSTRIES

**Valery V. Shapovalov<sup>1</sup>,**  
wwshapovalov@gmail.com

**Dmitriy A. Kozyr<sup>2</sup>,**  
kozyr.dmitriy@gmail.com

<sup>1</sup> Donetsk National Technical University,  
58, Artema street, 283001, Donetsk, Russia.

<sup>2</sup> Sevastopol State University,  
33, Universitetskaya street, Sevastopol, 299053, Russia.

**The relevance of research.** Global demand for coal in 2022 reached a historic high of 2013 and amounted to 8 billion tons. The increase in demand for coal led to the intensification of its production and, accordingly, to increase in the amount of man-made waste – waste dumps. Waste dumps are dangerous for the environment, but their chemical composition makes it possible to consider them as technogenic deposits.

**Purpose:** development of a resource-saving technology for the disposal of waste dumps in the mining industry with the production of alumina and other useful components.

**Object:** waste dumps of coal mines.

**Methods:** experimental studies of the influence of the sintering regime of the argillite–soda–chalk charge on the degree of extraction of alumina from argillite and on the quality of the sinter: determination of the mass fraction of aluminum oxide by the titrimetric method; determination of the amount of carbon dioxide in samples by the volumetric method; determination of moisture loss and reaction products during calcination by the gravimetric method.

**Results.** The article analyzes the content of useful components in the waste dumps of the Donbass, as well as the existing technologies for extracting alumina from man-made deposits with a low aluminum content. Technogenic waste can be a significant raw material base for production for many years. In addition to obtaining demanded products, the processing of man-made waste will increase the level of environmental safety of mining agglomerations. The article considers the technology of disposal of rock dumps using the method of sintering the charge rock–soda–chalk. It was found that the sintering method with soda addition, despite the relatively low percentage of alumina extraction (75,2 %), can significantly reduce the charge sintering temperature (up to 850 °C) and increase the energy efficiency of the method.

### Key words:

Waste dump, alumina, waste sintering, resource saving, leaching.

### REFERENCES

1. Ray S.K., Khan A.M., Mohalik N.K., Mishra D., Mandal S., Pandey J.K. Review of preventive and constructive measures for coal mine explosions: an Indian perspective. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, vol. 32, Iss. 3, pp. 471–485. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2022.02.001> (accessed 15 November 2022).
2. Dandin S., Kulkarni M., Wagale M., Sathe S. A review on the geotechnical response of fly ash–colliery spoil blend and stability of coal mine dump. *Cleaner Waste Systems*, 2022, vol. 3, 100040. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2022.100040> (accessed 15 November 2022).
3. Khayrutdinov M., Kongar-Syuryun Ch., Tyulyaeva Y., Khayrutdinov A. Cementless backfill mixtures based on water-soluble manmade waste. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 11, pp. 30–36. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2020/11/2883.
4. Maciej G., Yaroslav B., Dariusz S., Jarosław N. The origin of GHG's emission from self-heating coal waste dump: Atmogeochemical interactions and environmental implications. *International Journal of Coal Geology*, 2022, vol. 250, 103912. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2021.103912> (accessed 15 November 2022).
5. Vysotsky S., Kozyr D. Environmental monitoring of waste dumps of mining agglomeration. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 37–46. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2021/11/2964.
6. Zhdanova A., Islamova A., Kopylov N. Interaction of drops of fire-extinguishing compositions with fragments of combustible materials. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, pp. 7–19. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3689.
7. Misz-Kennan M., Kus J., Flores D., Avila C., Büçkün Z., Choudhury N., Christanis K., Joubert J.P., Kalaitzidis S., Karayigit A.I., Malecha M., Marques M., Martizzi P., O'Keefe J.M.K., Pickel W., Predeanu G., Pusz S., Ribeiro J., Rodrigues S., Singh A.K., Suárez-Ruiz I., Sýkorová I., Wagner N.J., Životić D. Development of a petrographic classification system for organic particles affected by self-heating in coal waste. (An ICCP Classification System, Self-heating Working Group – Commission III). *International Journal of Coal Geology*, 2020, vol. 220, 103411. DOI: 10.1016/j.coal.2020.103411.
8. Kongar Syuryun Ch., Tyulyaeva Y., Khairutdinov A., Kowalik T. Industrial waste in concrete mixtures for construction of underground structures and minerals extraction. Construction the Formation of Living Environment (FORM-2020). Hanoi. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 869, 032004. DOI: 10.1088/1757-899X/869/3/032004.
9. *Informatsionno-tehnicheskii spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam 11-2019 «Proizvodstvo alyuminiya»* [Information and technical guide to the best available technologies 11-2019 «Aluminum production». Bureau of NDT]. Moscow, 2019. 247 p.
10. Zubova L.G., Zubov A.R., Verekh-Belousova K.I., Oleinik N.V. *Poluchenie metallov iz terrikonov ugolnykh shakht Donbassa: monografiya* [Obtaining metals from waste DUMPS of Donbass coal mines: monograph]. Lugansk, VNU im. V. Dahl Publ. house, 2012. 144 p.
11. Vyborov S.G., Silin A.A. Perspektivy otvalnykh porod v kachestve alyuminiyevogo syrta [Prospects for waste dumps as aluminum raw materials]. *Coal of Ukraine*, 2012, no 6, pp. 33–39.

12. Petlevany M.V., Gayday A.A. Analysis of accumulation and systematization of rock dumps of coal mines, prospects for their development. *Geotechnical mechanics*, 2017, no. 136, pp. 147–158. In Rus.
13. Chobotko I.I., Tynyna S.V. X-ray fluorescence study of the chemical composition of waste dump samples. *Technical engineering, Zhitomir*, 2020, no. 1 (85), pp. 249–254. In Rus.
14. Naumov K.I., Shvedov I.M., Maloletnev A.S. Application of new technologies for the production of coagulant (aluminum sulfate) from coal waste. *GIAB*, 2014, no. 5, pp. 67–72. In Rus.
15. Mnukhin A.G., Mnukhina N.A., Gitulyar A.A., Goroshko I.P. K voprosu izvlecheniya redkozemelnykh metallov iz porodnykh otvalov ugolnykh shakht [On the issue of extracting rare earth metals from waste dumps of coal mines]. *Coal of Ukraine*, 2017, no 7–8, pp. 64–66.
16. Rózański Z., Suponik T., Matusiak P., Kowol D., Szpyrka J., Mazurek M., Wrona P. Coal recovery from a coal waste dump. *E3S Web of Conferences*, 2016, vol. 8, 01052. DOI: 10.1051/e3sconf/20160801052.
17. Gawor Ł. Coal mining waste dumps as secondary deposits exemplified on Upper Silesian coal basin and Lublin coal basin. *Geology, Geophysics and Environment*, 2014, vol. 40 (3), pp. 285–289. DOI: 10.7494/geol.2014.40.3.285128525.
18. Rózański Z., Suponik T., Matusiak P., Kowol D., Szpyrka J., Mazurek M., Wrona P. Management of mining waste and the areas of its storage – environmental aspects. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi. Mineral Resources Management*, 2019, vol. 35, Iss. 3, pp. 119–142. DOI: 10.24425/gsm.2019.128525.
19. Yadav V.K., Fulekar M.H. The current scenario of thermal power plants and fly ash: Production and utilization with a focus in India. *Int. J. Adv. Eng. Res. Dev.*, 2018, vol. 5, pp. 768–777.
20. Sandeep N. Utilization of recycled form of concrete, E-wastes, glass, quarry rock dust and waste marble powder as reliable construction materials. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 45, P. 2, pp. 3231–3234. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.381> (accessed 15 November 2022).
21. Huiquan L., Hui Jun-bo, Wang C., Bao W., Sun Z. Extraction of alumina from coal fly ash by mixed-alkaline hydrothermal method. *Hydrometallurgy*, 2014, no 147–148, pp. 183–187. DOI: 10.1016/j.hydromet.2014.05.012.
22. Rybak J., Adigamov A., Kongar-Syuryun C., Khayrutdinov M., Tyulyaeva Y. Renewable-resource technologies in mining and metallurgical enterprises providing environmental safety. *Minerals*, 2021, vol. 11, 1145. DOI: 10.3390/min11101145
23. Rybak J., Kongar-Syuryun C., Tyulyaeva Y., Khayrutdinov A.M. Creation of backfill materials based on industrial waste. *Minerals*, 2021, vol. 11, 739. Available at: <https://doi.org/10.3390/min11070739> (accessed 15 November 2022).
24. Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Razorenov Yu.I., Maslennikov S.A., Lyashenko V.I. Mechanochemical technology of iron extraction from enrichment tailings. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2021, vol. 64, pp. 282–291. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-4-282-291.
25. Golik V.I., Gabaraev O.Z., Razorenov Yu.I., Maslennikov S.A. Metal leaching from ore dressing tailings. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2022, vol. 65, pp. 511–518. In Rus. DOI: 10.17073/0368-0797-2022-7-511-518.
26. Mehta N., Dino G.A., Passarella I., Ajmone-Marsan F., Rossetti P., De Luca D.A. Assessment of the possible reuse of extractive waste coming from abandoned mine sites: case study in Gorno, Italy. *Sustainability*, 2020, vol. 12, 2471. Available at: <https://doi.org/10.3390/su12062471> (accessed 15 November 2022).
27. Klímenko A.A., Shapovalova T.V., Rebrova L.M. The use of belite sludge from alumina production as an additive in the production of cement. *Scientific works of DonNTU*, 2014, no. 3 (23), pp. 189–194. In Rus.
28. Shapovalov V.V., Kozyr D.A. Resource-saving technology for the integrated disposal of dumps of coal mining industries with the production of alumina and binders. *Bulletin of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2021, no. 5 (151), pp. 54–60. In Rus.
29. Tikhonov V.N. *Analiticheskaya khimiya alyuminiya* [Analytical chemistry of aluminum]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 266 p.

Received: 26 November 2022.

Reviewed: 2 December 2022.

#### Information about the authors

**Valery V. Shapovalov**, Dr. Sc., professor, Donetsk National Technical University.

**Dmitriy A. Kozyr**, Cand Sc., associate professor, Sevastopol State University.