



Научная статья

УДК 552.574

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-446-457>

Оценка возможности вовлечения в переработку углесодержащих отходов шламохранилища Западно-Сибирского металлургического комбината

Евгений Сергеевич Прокопьев^a, Ольга Леонидовна Алексеева^b^{a,b}*Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия*^{a,b}*ООО «Научно-производственная компания «Спирит»», г. Иркутск, Россия*Автор, ответственный за переписку: Евгений Сергеевич Прокопьев, pes@spirit-irk.ru

Резюме. Целью исследования являлась возможность получения ликвидных продуктов обогащения (железосодержащего и угольного концентратов) из материала лежалых хвостов углеобогащения. Изучение вещественного состава исходных лежалых хвостов выполнено при помощи минералогического, гранулометрического и химического анализов. Технологические испытания осуществлены по гравитационно-магнитной схеме обогащения. В качестве основного обогатительного оборудования был выбран винтовой сепаратор. Доводочная операция проведена при помощи мокрой магнитной сепарации. В результате получен черновой гравитационный концентрат с массовой долей общего железа 25,3 %. Выход продукта составил 29,62 % с извлечением в него ценного компонента в размере 53,15 %. Выход полученного углесодержащего концентрата был равен 70,38 %, его зольность составила 31,7 %. В результате проведения доводочной операции на первичном гравитационном концентрате при помощи метода мокрой магнитной сепарации был получен железосодержащий концентрат. Выход продукта составил 0,44 % с извлечением в него ценного компонента в размере 1,97 %. Массовая доля общего железа составила 63,29 %. Таким образом, в статье показана потенциальная возможность вовлечения в переработку лежалых хвостов углеобогащения с получением товарной продукции, а именно железосодержащего концентрата и вторичного топлива – угольного концентрата, по экологически чистой технологии при низких энергозатратах и без дополнительных затрат на добычу.

Ключевые слова: шламохранилище, отходы углеобогащения, зольность, винтовая сепарация, экологически чистая технология, мокрая магнитная сепарация, железосодержащий концентрат, получение вторичного топлива, угольный концентрат

Финансирование: Работы выполнены в рамках комплексного научно-технического проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2022-1192 «Переработка хвостов угольных обогатительных фабрик с целью получения товарного угольного концентрата» при поддержке комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации № 1144-р от 11 мая 2022 г.

Для цитирования: Прокопьев Е. С., Алексеева О. Л. Оценка возможности вовлечения в переработку углесодержащих отходов шламохранилища Западно-Сибирского металлургического комбината // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 4. С. 446–457. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-446-457>.

Original article

Evaluating the possibility for coal-containing waste of West Siberian Iron-and-Steel Works sludge storage to be involved in processing

Evgeny S. Prokopiev^a, Olga L. Alekseeva^b^{a,b}*Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia*^{a,b}*Research and Production Company Spirit, LLC, Irkutsk, Russia*Corresponding author: Evgeny S. Prokopiev, pes@spirit-irk.ru



Abstract. The purpose of the study is investigate the possibility to obtain liquid concentration products (iron-containing and coal-containing concentrates) from the material of mature coal washing tailings. The study of the material composition of the original mature tailings was carried out using mineralogical, granulometric and chemical analyses. Technological tests were conducted according to the gravitational-magnetic concentration scheme. The spiral separator was chosen to be the main concentration equipment. Upgrading operation involved the use of wet magnetic separation. As a result, rough gravity concentrate with a mass fraction of total iron of 25.3 % was obtained. The product yield was 29.62 % with 53.15 % extraction of a valuable component into it. The output of the obtained coal-containing concentrate was 70.38 %, its ash content equaled 31.7 %. Having upgraded the primary gravity concentrate with the use of the wet magnetic separation method we obtained an iron-containing concentrate. The product yield was 0.44 % with 1.97 % extraction of a valuable component into it. The mass fraction of total iron was 63.29 %. Therefore, the article has demonstrated the potential possibility for mature tailings of coal cleaning to be involved in the processing with the production of marketable products such as iron-containing concentrate and secondary fuel in the form of coal concentrate using environmentally friendly technology, at low energy costs and without additional production costs.

Keywords: sludge storage, coal concentration waste, ash content, spiral separation, environmentally friendly technology, wet magnetic separation, iron-containing concentrate, secondary fuel production, coal concentrate

Funding: The study was performed in the frameworks of the integrated scientific and technical program of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 075-15-2022-1192 "Processing of tailings of coal preparation plants to obtain commercial coal concentrate". The research was also supported by a comprehensive scientific and technical program of the full innovation cycle "Development and implementation of a set of technologies in the field of exploration and production of solid minerals, ensuring industrial safety, bio-remediation, creation of new products of coal raw material deep processing with a consistent reduction in the environmental load and risks to the population life" approved by the Decree of the Government of the Russian Federation No. 1144-p of May 11, 2022.

For citation: Prokopiev E. S., Alekseeva O. L. Evaluating the possibility for coal-containing waste of West Siberian Iron-and-Steel Works sludge storage to be involved in processing. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(4):446-457. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-446-457>.

Введение

Начиная с декабря 2020 г. цены на энергетические и коксующиеся угли стабильно растут. Это обусловлено политическими разногласиями и введением возникших вследствие них ограничений Китая на импорт угля из Австралии, а также ростом цен на сталь. Цены на энергетический уголь за первую половину 2021 г. выросли почти вдвое по сравнению со средним показателем за 2020 г. – в основном из-за увеличения использования электроэнергии, роста стоимости природного газа и перебоев в поставках из ключевых стран-экспортеров¹.

В Кемеровской области (Кузбассе, Россия) работает более 200 предприятий угольной отрасли, которые в ходе своей производственной деятельности ежегодно накапли-

вают свыше 2 млн т отходов угледобычи: породные отвалы, вскрышные отвалы, шламо-накопители обогатительных фабрик и т. п. В связи с этим особую актуальность приобретают современные технологии переработки отходов прошлых лет с целью повторного получения товарной продукции и последующей рекультивации земель² [1–10], а также их планомерное и комплексное внедрение на территории Кузбасса³.

Одним из крупнейших в Сибири сталелитейных заводов является ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат (ЕВРАЗ ЗСМК), по объему производства он входит в пятерку крупнейших в России. Предприятие характеризуется полным металлургическим циклом. Продукцию реализует в России и других странах Содружества

¹ Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году // Роснедра: федеральное агентство по недропользованию [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rosnedra.gov.ru/data/Files/File/7992.pdf> (05.09.2022).

² Левкин Н. Д. Оценка геоэкологической ситуации и способы снижения деградации окружающей среды в угледобывающих промышленных регионах: дис. ... д-ра. техн. наук: 25.00.36. Тула, 2011. 234 с.

³ Об утверждении комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения: распоряжение Правительства Российской Федерации от 11 мая 2022 № 1144-р // Гарант: информационно-правовое обеспечение [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/404701149/> (05.09.2022).



Независимых Государств, экспортирует металл в 30 зарубежных государств. Входит в пятерку крупнейших производителей железнодорожных рельсов в стране.

Горнорудные активы включают в себя несколько горнодобывающих и горно-обогатительных предприятий на территории Кемеровской области (Таштагольский, Казский, Горно-Шорский рудники и Гурьевский карьер по добыче известняка, Абагурская обогатительно-агломерационная фабрика). Добыча железной руды осуществляется подземным способом. Предприятия обеспечивают поставки качественного железорудного сырья и известняка для производства металлопродукции на ЕВРАЗ ЗСМК.

Производство угольного концентрата осуществляется Центральной обогатительной фабрикой «Кузнецкая» (ЦОФ «Кузнецкая»), которая введена в эксплуатацию в 1966 г. «Кузнецкая» стала первой фабрикой в стране, перерабатывающей уголь, добываемый гидравлическим способом на шахте «Юбилейная». За 55 лет обогатительная фабрика переработала 229 млн т рядового угля, выпустила 169 млн т концентрата. Фабрика перерабатывает марки угля ГЖ и Ж. На сегодняшний день ей перерабатываются угли с шахт «Осинниковская», «Есаульская», «Ерунаковская-VIII», «Усковская», разреза «Распадский» и шахты «Распадская», а также шахты «Межегейуголь»⁴.

Шламохранилище ЗСМК представляет собой емкость для складирования отходов металлургического производства и углеотходов, поступающих с углеобогательного цеха коксоагломерационного производства, Западно-Сибирской ТЭЦ – филиала АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО ЕВРАЗ ЗСМК), других цехов АО ЕВРАЗ ЗСМК и ЦОФ «Кузнецкая», образованной ограждающей дамбой, максимальная высота которой, согласно действующей проектной документации, составляет 53,5 м (I класс). Отходы, складированные в шламохранилище, относятся к IV и V классам опасности.

За последние 20 лет был проведен ряд

изысканий по бурению и определению содержания ценных компонентов в разных пробах по глубине бурения отвала [11]. Так, например, в Лаборатории утилизации промышленных отходов производственно-технического отдела АО ЕВРАЗ ЗСМК (1999 г.) исследован относительно сухой материал гидроотвала с намывных пляжей (декабрь 1998 г. – апрель 1999 г.), всего 70 проб. Пробы отбирали с поверхности гидроотвала, в ряде случаев с заглублением до 0,5 м, на расстоянии до 150 м от дамбы к центру гидроотвала. Расстояние между точками отбора – 25 м. ООО «Сибнии-углеобогащение» в 2012 г. выполняло следующие работы: буровой установкой на автошасси вынимался и исследовался материал скважин на глубину до 42 м [12]. Результаты анализа отобранных проб на зольность представлены в табл. 1.

На отобранном материале проведены исследования всех 13 проб на обогатимость. Окончательным выводом от суммы всех результатов является то, что всего выход товарного угольного сырья составил 26,2 % с зольностью 24,7 % [1].

Материалы и методы исследования

Исследования, результаты которых представлены в статье, проведены в отделе комплексного использования минерального сырья Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук. Цель работы заключалась в изучении возможности переработки материала шламохранилища ЗСМК с получением ликвидной продукции либо сырья, пригодного к использованию в металлургическом производстве. В процессе проведения технологических исследований решались следующие задачи:

- краткое изучение вещественного состава пробы техногенных отходов посредством гранулометрического, химического и минералогического анализов;

- проведение технологических испытаний по физическому обогащению материала пробы отходов углеобогащения, заскладированной в шламохранилище АО ЕВРАЗ ЗСМК.

⁴ Центральная обогатительная фабрика «Кузнецкая» // ПАО «Распадская» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.raspadskaya.com/ru/company/assets/#accordion-kuznetskaya-washing-plant> (05.09.2022).



**Таблица 1. Изменение зольности по глубине шламохранилища
Западно-Сибирского металлургического комбината (результаты бурения)**
**Table 1. Change in ash content over the depth of the sludge storage
of the West-Siberian Iron-and-Steel Works (drilling results)**

Глубина, м	Проба											13
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
	Зольность, %											
0–2	–	–	59,7	59,6	59,1	65,6	67	59	68	74,5	63,5	60,5
2–4	–	–	65,9	64,3	63,1	61,8	57,5	59,7	76,7	70,5	68	50,5
4–6	–	–	60	59,8	62,2	72,1	58,9	48,4	74,4	65	49,5	48,2
6–8	–	–	73,1	69,9	73,3	63,9	67,3	46,6	79,4	69,5	73,6	55,4
8–10	–	–	63,5	42,1	74,3	63,4	55,1	47,6	83,4	71,7	60,1	37,5
10–12	–	–	65	43,1	56,1	51,2	61,1	54,1	85,1	73,7	67,5	45,9
12–14	–	–	58,1	45,8	42,3	38,4	47,9	46,5	90,9	77,5	58,6	52,8
14–16	–	–	50,1	48,7	38,7	33,2	45,4	40,7	98,5	83,9	51,7	44,6
16–18	–	–	46,4	46,4	56,6	50	57,2	48,9	98	84,6	39,9	44,8
18–20	–	–	59,1	45,4	52,6	55	68,7	56,2	98	82	49,6	44,7
20–22	–	–	58	51,5	50,5	52,5	52,5	49,6	95	85,8	66,8	58,9
22–24	–	–	63,5	53,2	60,8	52,8	60,5	54,6	92	75,5	62,7	63,4
24–26	–	–	64,4	57,5	56,4	54,4	50,5	61,2	93,2	71,4	68,9	58,2
26–28	–	–	69,9	48,3	50	53,5	56,2	49,7	96,9	80,4	73,2	60,7
28–30	–	–	64,3	58,6	48	49,2	61,5	50,2	99,4	77,2	70,6	60,5
30–32	–	–	54	32,5	52,2	64,2	44	52,5	95,3	76	73,3	59,2
32–34	–	–	70,1	67,8	43,4	48,4	50,1	47	89,6	77,2	66,1	54,5
34–36	–	–	75	76,6	51,1	44	51,7	46,7	84	71,6	67,5	48,4
36–38	–	–	75,1	75,4	61,6	71,9	48	40,6	63,1	63,4	57,6	45,3
38–40	–	–	60,5	70	57,6	69,8	42	35,4	38,2	52	54,6	41
40–42	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	61,7	43,7
Среднее	73,4	69,2	62,8	55,8	55,5	55,7	55,1	49,8	85	74,2	62,1	51,4

Объектом исследований стала проба отходов углеобогащения ЦОФ «Кузнецкая». Согласно данным, указанным в акте отбора пробы, местом отбора пробы являлось шламохранилище АО ЕВРАЗ ЗСМК. Технологической пробе присвоена маркировка УОФ (отходы угольной обогатительной фабрики).

Отходы угольной обогатительной фабрики были изучены на предмет возможности получения вторичного топлива в виде угольного концентрата и возможных попутных компонентов.

Оценка проведенных экспериментов производилась методом полуколичественного анализа при помощи портативного рентгенофлуоресцентного анализатора Olympus Vanta C-Series. Аналитические работы результатов опытов были выполнены методом количественного анализа в Испытательном аналитическом центре АО «Иргиредмет» (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.510043) с применением атомно-эмиссионного метода с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES). Минеральный состав и количественная оценка

определены с помощью методов оптико-минералогического анализа с применением бинокулярного стереоскопического микроскопа МИКРОМЕД МС-2 ZOOM.

Результаты исследования и их обсуждения

Химический состав исходных проб установлен с помощью количественного анализа с применением атомно-эмиссионного метода с индуктивно-связанной плазмой (ICP-AES) (табл. 2).

Из табл. 1 видно, что материал хвостов углеобогащения состоит преимущественно из алюминия, кальция, железа, калия, магния, марганца, натрия и титана, однако результаты химического анализа позволяют определить основной ценный компонент, коим является железо (содержание в исходном материале общего железа равно 14,2 %). Редкие элементы содержатся в количестве, не превышающем кларк этих элементов в земной коре, и практического интереса не представляют.



Таблица 2. Химический состав исходной пробы отходов угольной обогатительной фабрики
Table 2. Chemical composition of the original sample of coal preparation plant waste

Элемент	Массовая доля, %
Ag	< 0,0001
Al	5,6
As	0,0015
B	< 0,0005
Ba	0,063
Be	< 0,0002
Bi	< 0,0005
Ca	2,9
Cd	< 0,0002
Co	0,001
Cr	0,0047
Cu	0,025
Fe	14,2
Hg	< 0,0005
K	1,1
La	0,0023
Mg	1,05
Mn	0,456
Mo	< 0,0002
Na	0,425
Ni	0,0018
P	0,073
Pb	0,0014
Sb	< 0,0003
Sc	0,0007
Se	< 0,0005
Sn	< 0,0005
Sr	0,021
Te	< 0,0005
Ti	0,225
V	0,0071
W	< 0,001
Y	0,0017
Zn	0,008
Zr	0,009

Гранулометрический состав изучен посредством фракционирования исходной пробы в соответствии с общепринятыми рекомендациями. Зольность выделенных классов (для пробы УОФ) определена согласно ГОСТ 11022-95⁵ (табл. 3).

Гранулометрический анализ показывает, что материал отходов углеобогащения на 63,64 % представлен крупнозернистым материалом, в основном классом крупности +2 мм. На диапазон классов крупности -2+0,125 мм приходится 33,88 % материала. Выход шлами-

стых классов крупности (-0,125+0,0 мм) составляет 2,48 %.

Необходимо отметить высокую зольность материала: значения зольности сухого топлива колеблются от 55,17 до 87,16 % при средневзвешенном значении в исходной пробе 76,09 %, что подтверждает результаты опробования отвала хвостов ЦОФ «Кузнецкая» прошлых лет.

Последовательность операций по определению минерального состава пробы УОФ была следующей:

⁵ ГОСТ 11022-953. Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности // Консорциум кодекс [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200024148> (05.09.2022).



– определение минерального состава исходной пробы (результаты представлены в табл. 4);

– гравитационное фракционирование исходной пробы (результаты представлены в табл. 5);

– магнитное фракционирование тяжелой фракции (результаты представлены в табл. 6).

По данным табл. 4 видно, что основную массу пробы (78,08 %) составляют карбонат-углистые агрегаты и обломки пород. Уголь со-

ставляет 13,5 % от всей массы пробы, карбонаты с примесью угля – 2,33 %. В пробе присутствуют карбонаты (3,51 %), кварц (1,5 %), гидроксиды железа (0,17 %), магнетит (0,24 %), сульфиды (пирит, халькопирит – 0,65 %) и барит (0,01 %). В единичных зернах отмечены пироксены, амфиболы, эпидот, клейофан, хлорит и циркон.

Из табл. 6 видно, что основную массу тяжелой фракции составляет немагнитная фракция (97,22 %).

Таблица 3. Гранулометрическая характеристика, зольность и распределение железа по классам крупности в исходной пробе отходов угольной обогатительной фабрики
Table 3. Granulometric characteristics, ash content and iron distribution by size classes in the original coal preparation plant waste sample

Класс крупности, мм	Выход, %	Зольность сухого топлива, %	Массовая доля железа, %	Распределение, %	
				Зольность сухого топлива	Массовая доля железа
+25	6,5	87,16	16,2	7,45	7,62
-25+15	9,93	80,47	16,1	10,5	11,56
-15+8	20,1	76,32	14,04	20,16	20,41
-8+4	14,54	73,64	12,42	14,07	13,06
-4+2	12,57	73,5	15,6	12,15	14,19
-2+1	11,21	72,87	11,93	10,73	9,67
-1+0,5	11,46	83,93	12,61	12,64	10,45
-0,5+0,25	8,73	68,29	14,98	7,83	9,45
-0,25+0,125	2,48	75,58	15,1	2,46	2,71
-0,125+0,071	0,77	68,75	8,95	0,7	0,5
-0,071+0,04	0,43	55,17	3,6	0,31	0,11
-0,04+0	1,28	58,67	2,96	0,99	0,27
Всего	100	76,09	13,83	100	100

Таблица 4. Минеральный состав пробы отходов угольной обогатительной фабрики
Table 4. Mineral composition of the coal preparation plant waste sample

Минерал	Содержание, масс. %
Уголь	13,5
Карбонаты с примесью угля	2,33
Карбонаты (кальцит, доломит)	3,51
Кварц	1,5
Гидроксиды железа	0,17
Магнетит	0,24
Сульфиды (пирит, халькопирит)	0,65
Барит	0,01
Эпидот	Единичные зерна
Пироксены	
Амфиболы	
Клейофан	
Хлорит	
Циркон	
Апатит	
Карбонат-углистые агрегаты и обломки пород	78,08
Итого	99,99



Таблица 5. Результаты гравитационного фракционирования исходной пробы отходов угольной обогатительной фабрики

Table 5. The results of gravitational fractionation of the original sample of the coal preparation plant waste

Фракция	Выход, %	Минералы
Легкая (менее 2,9 г/см ³)	67,42	Карбонаты, уголь, кварц, карбонаты с примесью угля, гидроксиды железа, обломки пород, карбонат-углистые агрегаты
Тяжелая (более 2,9 г/см ³)	32,58	Магнетит, гидроксиды железа, сульфиды, карбонаты (кальцит, доломит), карбонаты с примесью угля, амфиболы, пироксены, эпидот, барит, хлорит, клейофан, циркон, обломки пород, карбонат-углистые агрегаты, апатит
Итого	100	–

Таблица 6. Результаты магнитного фракционирования тяжелой фракции

Table 6. Results of heavy fraction magnetic fractionation

Фракция	Выход, % от операции	Выход, % от исходного	Минералы
Магнитная фракция	2,69	0,87	Магнетит, гидроксиды железа, сростки с магнетитом
Электромагнитная фракция	0,09	0,03	Гидроксиды железа, амфиболы, пироксены, эпидот, хлорит, обломки пород
Немагнитная фракция	97,22	31,68	Сульфиды, барит, карбонаты (кальцит, доломит), амфиболы, клейофан, циркон, гидроксиды железа, барит, карбонат-углистые агрегаты, апатит
Итого	100	32,58	–

Обобщая результаты изучения вещественного состава исходной пробы, можно заключить, что основными ценными компонентами предоставленной пробы хвостов углеобогащения являются уголь и железо.

Также авторами были отмечены следующие характерные показатели:

- средневзвешенное значение зольности сухого топлива – 75,85 %, что говорит о низком содержании угольных составляющих (по результатам минералогического анализа уголь составляет 13,8 % от всей массы пробы);

- содержание общего железа в исходной пробе – 14,2 %;

- гранулометрический анализ показывает, что проба на 63,64 % представлена крупнозернистым материалом классом крупности +2 мм, на диапазон классов крупности -2+0,125 мм приходится 33,88 % материала, выход шламистых классов крупности (-0,125+0 мм) составляет 2,48 %.

Основным критерием выбора в пользу определения метода переработки отходов производств, безусловно, является экономический. Только в случае превышения прогнозируемых доходов от использования техно-

генных ресурсов над затратами на разработку и внедрение технологических решений с учетом экологических преимуществ возможно ожидание крупномасштабного процесса рециклинга отходов. В связи с этим на первое место выдвигаются задачи разработки технологических решений и схем для переработки сложного техногенного ресурса.

При выборе рационального метода переработки материала гидроотвалов необходимо учесть физико-химические свойства твердой фазы и определить его приоритетные зоны для переработки. Результаты ситового и фракционного анализа дают возможность прогнозировать способ и технологию процессов обогащения.

Особенностями технологии переработки извлекаемого материала из гидроотвалов, в отличие от технологии, использующейся на обогатительных фабриках, является их высокая зольность, а также колебания зольности и гранулометрического состава извлекаемого продукта. Многими исследователями сделано заключение о том, что для угольного шлама крупностью 0,1–1 мм имеют преимущество винтовые сепараторы [13–15].



Применительно к сырью, описанному в данной статье, был сделан выбор в пользу применения технологии винтовой сепарации как метода, являющегося экологически чистым, визуально наблюдаемым и эффективным в плане извлечения железосодержащего компонента и выведения в легкую фракцию угольной составляющей [16–20]. Доводка железосодержащего концентрата проводилась методом мокрой магнитной сепарации.

Схема получения чернового гравеоконцентрата включала в себя (рис. 1):

- предварительное грохочение материала по классу 0,5 мм;
- стадийное измельчение материала до крупности -0,5 мм;
- основную винтовую сепарацию и контрольную винтовую сепарацию.

При проведении основной винтовой сепарации и контрольной винтовой сепарации использован винтовой сепаратор для обогащения шламов типа СВШ-500. При гравитационном обогащении соблюдался следующий режим винтовой сепарации: производительность по твердому – до 250 кг/ч при содержании твердого в питании 40 %.

Результаты обогащения пробы методом винтовой сепарации представлены в табл. 7.

При проведении двух операций винтовой сепарации получены следующие продукты:

- черновой гравеоконцентрат с содержанием железа 25,3 % и извлечением 53,15 % при его выходе 29,62 %;
- хвосты (хвосты основной винтовой сепарации и хвосты контрольной винтовой сепарации) с содержанием железа 9,39 % и зольностью на уровне 31,7 %.

Исследования возможности доводки гравеоконцентрата методом мокрой магнитной сепарации выполнены на электромагнитном барабанном сепараторе марки 120Т-СЭМ с нижним питанием и прямоточной ванной. Данный аппарат предназначен для мокрого магнитного обогащения сильномагнитных руд.

Технологическая схема доводки гравеоконцентрата методом мокрой магнитной сепарации представлена на рис. 2. Полученные технологические показатели приведены в табл. 8.

Доводка первичного гравеоконцентрата методом мокрой магнитной сепарации позволяет получить магнитную фракцию (железосодержащий концентрат) с содержанием общего железа 63,29 % и извлечь 1,97 % железа при выходе продукта 0,44 %. Такой выход магнитной фракции (0,44 %) говорит о низком содержании сильномагнитного материала в пробе.



Рис. 1. Технологическая схема обогащения пробы отходов угольной обогатительной фабрики при получении чернового гравеоконцентрата

Fig. 1. Technological scheme of concentration of a coal preparation plant waste sample when obtaining rough gravity concentrate



Таблица 7. Технологические показатели получения черного гравеоконцентрата
Table 7. Technological indicators of obtaining rough gravity concentrate

Продукт	Выход, %	Массовая доля общего железа, %	Извлечение железа, %	Зольность, %
Основная винтовая сепарация (ОВС) на СВШ-500				
Концентрат ОВС	23,81	25,86	43,66	86
Промпродукт ОВС	26,39	16,34	30,57	72,7
Хвосты ОВС	49,8	7,3	25,77	31,2
Итого: исходная проба	100	14,11	100	75,8
Контрольная винтовая сепарация (КВС) на СВШ-500				
Концентрат КВС	5,81	23,06	9,49	88,3
Хвосты КВС	20,59	14,44	21,07	32,1
Итого: промпродукт ОВС	26,39	16,34	30,57	72,7
Сводные показатели				
Черновой гравеоконцентрат (концентрат ОВС + концентрат КВС)	29,62	25,3	53,15	86,9
Хвосты (хвосты ОВС + хвосты КВС)	70,38	9,39	46,85	31,7
Итого: исходная проба	100	14,11	100	75,8



Рис. 2. Технологическая схема доводки гравеоконцентрата методом мокрой магнитной сепарации
Fig. 2. Technological scheme of gravity concentrate upgrading by wet magnetic separation

Таблица 8. Технологические показатели обогащения пробы отходов угольной обогатительной фабрики с доводкой методом мокрой магнитной сепарации
Table 8. Technological indicators of concentration of the coal preparation plant waste sample upgraded by wet magnetic separation

Продукт	Выход, % от исходного материала	Массовая доля общего железа, %	Извлечение общего железа, % от исходного материала
Мокрая магнитная сепарация ($I = 0,8 \text{ A}$)			
Магнитная фракция	0,44	63,29	1,97
Немагнитная фракция	29,18	24,73	51,18
Итого: черновой гравеоконцентрат	29,62	25,3	53,15
Сводные показатели			
Железосодержащий концентрат (магнитная фракция)	0,44	63,29	1,97
Хвосты отвальные (хвосты ОВС, хвосты КВС и немагнитная фракция)	99,56	13,89	98,03
Итого: исходная проба	100	14,11	100

В немагнитную фракцию извлечение железа составило 96,29 % с содержанием 24,73 % при исходном содержании в питании доводочной операции общего железа 25,3 %.

Заключение

Исследованную технологическую пробу из шламохранилища АО ЕВРАЗ ЗСМК, представленную лежащими хвостами углебога-



щения ЦОФ «Кузнецкая», можно рассматривать как техногенное железо- и углесодержащее сырье.

Оценивая представленную информацию, можно сделать следующие выводы:

1. В ходе тестовых испытаний по возможности переработки отходов угольной обогатительной фабрики по гравитационно-магнитной технологии был получен черновой гравиконцентрат с содержанием общего железа 25,3 % и извлечением 53,15 %.

2. Получено вторичное топливо – углесо-

державший концентрат с зольностью 31,7 %.

3. При доводке первичного гравиконцентрата методом мокрой магнитной сепарации получен железосодержавший концентрат с содержанием общего железа 63,29 %.

Результаты технологических испытаний позволяют сделать заключение о потенциальной возможности вовлечения в переработку лежалых хвостов углеобогащения с получением товарной продукции, а именно железосодержавшего концентрата и вторичного топлива – угольного концентрата.

Список источников

1. Хамзина Т. Угольный шлам: вторая жизнь // Глобус. 2021. № 1. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.vnedra.ru/tehnologii/ugolnyy-shlam-vtoraya-zhizn-13710/\(05.09.2022\)](https://www.vnedra.ru/tehnologii/ugolnyy-shlam-vtoraya-zhizn-13710/(05.09.2022)).
2. Шадренова И. В., Зелинская Е. В., Волкова Н. А., Орехова Н. Н. Горнопромышленные отходы: ресурсный потенциал и технологии переработки (на примере Сибири и Урала) // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения – 2017): материалы Международ. науч. конф. (г. Красноярск, 12–15 сентября 2017 г.). Красноярск: Изд-во СФУ, 2017. С. 15–21.
3. Белоусов В. А. Перспективные методы обогащения угольных шламов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 4. С. 15–17.
4. Новак В. И., Козлов В. А. Обзор современных способов обогащения угольных шламов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. Отдельный выпуск № 5. Угледобыча: технологии, безопасность, переработка и обогащение. С. 130–138.
5. Сокур А. К. Обзор гравитационных технологий обогащения угольных шламов нефлотационной крупности // Обогащения корисних копалин: наук.-техн. зб. 2012. № 51. С. 126–136.
6. Качурин Н. М., Ефимов В. И., Мосина Е. К., Факторович В. В. Перспективы экологически безопасного использования отходов производства на территориях горнодобывающих регионов // Безопасность труда в промышленности. 2014. № 9. С. 81–84.
7. Качурин Н. М., Воробьев С. А., Чистяков Я. В., Рыбак Л. Л. Экологические последствия закрытия угольных шахт Кузбасса по газодинамическому фактору и опасности эндогенных пожаров на отвалах // Экология и промышленность России. 2015. Т. 19. № 4. С. 54–58.
8. Дамба А., Станис Е. В. Использование комплексной геоэкологической оценки в экологическом аудите при разработке угольных месторождений Монголии // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2015. № 2. С. 100–106.
9. Киреев С. А. Современное состояние и экологическая оценка влияния породных отвалов предприятия угольной промышленности // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. № 1. С. 62–71. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2022-1-1-62-71>.
10. Таразанов И. Итоги работы угольной промышленности России за 2012 год // Уголь. 2013. № 3. С. 78–90.
11. Новак В. И., Козлов В. А. Обзор современных способов обогащения угольных шламов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. Отдельный выпуск № 5. Угледобыча: технологии, безопасность, переработка и обогащение. С. 130–138.
12. Гришин И. А., Князбаев Ж. С. К проблеме выбора метода обогащения для углей различной стадии метаморфизма // Успехи современного естествознания. 2016. № 1. С. 107–110.
13. Бобриков В. В., Калабухов М. Л., Канев Н. И. Исследования и совершенствование процессов классификации и обогащения угольного шлама на Печеровской ЦОФ // III Конгресс обогатителей стран СНГ (г. Москва, 19–22 марта 2001 г.). М.: Изд-во МИСиС, 2001. С. 69–75.
14. Прокопьев С. А., Пономарева А. М., Болотин М. Л. Переработка техногенного сырья углеобогачительной фабрики // Экологические проблемы и новые технологии комплексной переработки минерального сырья (Плаксинские чтения – 2002): материалы Международ. совещ. (г. Чита, 16–19 сентября 2002 г.). Чита: ПКЦ-Альтекс, 2002. С. 79–82.
15. Козлов В. А., Новак В. И. Оптимизация работы углеобогачительной фабрики с целью получения максимального выхода концентрата // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 4. С. 175–186. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-175-186>.
16. Иванов В. Д., Прокопьев С. А. Винтовые аппараты для обогащения руд и песков в России. М.: Дакси, 2000. 239 с.
17. Аникин М. Ф., Иванов В. Д., Певзнер М. Л. Винтовые аппараты для обогащения руд. М.: Недра, 1970. 181 с.
18. Яшин А. В., Аникин М. Ф., Скрипко В. А. Сепараторщик винтовых аппаратов. М.: Недра, 1984. 102 с.
19. Турецкая Н. Ю., Прокопьев С. А., Прокопьев



Е. С. Разработка эффективной низкзатратной технологии получения угольного концентрата и железосодержащего продукта из шламов илов гидроотвала Касьяновской ОФ // XII Конгресс обогатителей стран СНГ (г. Москва, 25–27 февраля 2019 г.). М.: Изд-во МИСиС, 2019. С. 205–209.

2019. С. 205–209.

20. Кочетов В. В., Левандович А. П., Беринберг З. Ш., Кирнарский А. С., Пилов П. И. Применение винтовых сепараторов при обогащении углей // Обогащение полезных ископаемых. 1998. № 1. С. 80–87.

References

1. Khamzina T. Coal sludge: a second life. *Globus*. 2021;1. Available from: <https://www.vnedra.ru/tehnologii/ugolnyj-shlam-vtoraya-zhizn-13710/> [Accessed 5th September 2022]. (In Russ.).
2. Shadrinova I. V., Zelinskaya E. V., Volkova N. A., Orekhova N. N. Mining waste: resource potential and processing technologies (for the case of Siberia and the Urals). In: *Sovremennye problemy kompleksnoi pererabotki trudnoobogatimyykh rud i tekhnogennogo syr'ya (Plaksinskie chteniya – 2017): materialy Mezhdunar. nauch. konf. = Modern problems of complex processing of refractory ores and technogenic raw materials (Plaksinsky readings – 2017): materials of the International scientific conference*. 12–15 September 2017, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2017, p. 15–21. (In Russ.).
3. Belousov V. A. Promising methods of coal sludge concentration. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2014;4:15-17. (In Russ.).
4. Novak V. I., Kozlov V. A. Review of modern methods of coal sludge concentration. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2012;5:130-138. (In Russ.).
5. Sokur A. K. Review of gravitational concentration technologies for coal sludge of non-flotation size. *Obogashchenie poleznykh iskopayemykh: nauch.-tekhn. sb.* 2012; 51:126-136. (In Ukrainian).
6. Kachurin N. M., Efimov V. I., Mosina E. K., Faktorovich V. V. Prospects of environmentally safe use of production waste in mining regions. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti = Journal of Research and Production*. 2014;9:81-84. (In Russ.).
7. Kachurin N. M., Vorob'ev S. A., Chistyakov Ya. V., Rybak L. L. Environmental consequences of coal mines of Kuznetsk basin by the gasdynamic factor and hazard of endogenous fires at dumps. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2015;19(4):54-58. (In Russ.).
8. Damba A., Stanis E. V. The use of an integrated geo-ecological assessment in environmental audit at the open coal mining in Mongolia. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti = RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2015;2:100-106. (In Russ.).
9. Kireev S. A. The current state and environmental assessment of the impact of rock dumps of coal industry enterprises. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2022;1:62-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2022-1-1-62-71>.
10. Tarazanov I. Russian coal industry performance in 2012. *Ugol' = Russian Coal Journal*. 2013;3:78-90. (In Russ.).
11. Novak V. I., Kozlov V. A. Review of modern methods of coal sludge concentration. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2012;5:130-138. (In Russ.).
12. Grishin I. A., Knyazbaev Z. S. To the enrichment method choice problem for coals of various stage of the metamorphism. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2016;1:107-110. (In Russ.).
13. Bobrikov V. V., Kalabukhov M. L., Kanev N. I. Research and improvement of the classification and concentration processes of coal sludge at the Pecherovskaya central dressing plant. In: *III Kongress obogatitelei stran SNG = 3^d CIS Congress of the Mineral Processing Engineers*. 19–22 March 2001, Moscow. Moscow: National University of Science and Technology (MISiS); 2001, p. 69–75. (In Russ.).
14. Prokop'ev S. A., Ponomareva A. M., Bolotin M. L. Processing of technogenic raw materials of a coal cleaning plant. In: *Ekologicheskie problemy i novye tekhnologii kompleksnoi pererabotki mineral'nogo syr'ya (Plaksinskie chteniya – 2002): materialy Mezhdunar. soveshch. = Environmental problems and new technologies for the complex processing of mineral raw materials (Plaksinsky readings – 2002): materials of the International meeting*. 16–19 September 2002, Chita. Chita: PKTs-Al'teks; 2002, p. 79–82. (In Russ.).
15. Kozlov V. A., Novak V. I. Optimizing coal preparation plant performance towards maximum concentrate yield. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2019; 4:175-186. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-175-186>.
16. Ivanov V. D., Prokop'ev S. A. *Spiral machines for ores and sands concentration in Russia*. Moscow: Daksi; 2000. 239 p. (In Russ.).
17. Anikin M. F., Ivanov V. D., Pevzner M. L. *Spiral machines for ore dressing*. Moscow: Nedra; 1970. 181 p. (In Russ.).
18. Yashin A. V., Anikin M. F., Skripko V. A. *Spiral machine separator*. Moscow: Nedra; 1984. 102 p. (In Russ.).
19. Turetskaya N. Yu., Prokop'ev S. A., Prokop'ev E. S. Development of an effective low-cost technology for obtaining coal concentrate and iron-containing product from the silt sludge of the hydraulic dump of the Kasyanovskaya ore-dressing plant. In: *XII Kongress obogatitelei stran SNG = 12th CIS Congress of the Mineral Processing Engineers*. 25–27 February 2019, Moscow. Moscow: National University of Science and Technology (MISiS); 2019, p. 205–209. (In Russ.).
20. Kochetov V. V., Levandovich A. P., Berinberg Z. Sh., Kirnar'skii A. S., Pilov P. I. Use of spiral separators in coal cleaning. *Obogashchenie poleznykh iskopayemykh*. 1998;1:80-87. (In Russ.).



Информация об авторах / Information about the authors



Прокопьев Евгений Сергеевич,
ведущий инженер отдела комплексного использования минерального сырья,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
директор по технологиям и инновациям,
ООО «Научно-производственная компания «Спирит»»,
г. Иркутск, Россия,
pes@spirit-irk.ru.
Evgeny S. Prokopiev,
Leading Engineer of the Department of Integrated Use of Mineral Raw Materials,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,
Director for Technology and Innovation,
Research and Production Company Spirit, LLC,
Irkutsk, Russia,
pes@spirit-irk.ru.



Алексеева Ольга Леонидовна,
ведущий инженер отдела комплексного использования минерального сырья,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
директор по экономике и финансам,
ООО «Научно-производственная компания «Спирит»»,
г. Иркутск, Россия,
aol@spirit-irk.ru.
Olga L. Alekseeva,
Leading Engineer of the Department of Integrated Use of Mineral Raw Materials,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,
Director for Economics and Finance,
Research and Production Company Spirit, LLC,
Irkutsk, Russia,
aol@spirit-irk.ru.

Вклад авторов / Contribution of the authors

Прокопьев Е. С. – научное руководство исследованием, формулировка научных гипотез, описание результатов и формирование выводов исследования, табличное и графическое представление результатов, подготовка рукописи к печати. Алексеева А. О. – анализ литературы, сбор статистических данных, подготовка рукописи к печати.

Prokopiev E. S. gave academic advice on the research, formulated scientific hypotheses, described the results, derived the conclusions of the study as well as presented the research results in the form of graphs and tables, prepared the copyright for publication. Alekseeva O. L. analyzed the literature, collected the statistical data and prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 08.09.2022; одобрена после рецензирования 06.10.2022; принята к публикации 11.11.2022.

The article was submitted 08.09.2022; approved after reviewing 06.10.2022; accepted for publication 11.11.2022.