

**ТЕХНОЛОГИЯ РЕДКИХ, РАССЕЯННЫХ И РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
TECHNOLOGY OF RARE, SCATTERED AND RADIOACTIVE ELEMENTS**

Научная статья

УДК 62-665.4: 622.7

DOI: 10.26730/1999-4125-2024-6-36-46

**ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ ОТХОДОВ
УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ ЦОФ «БЕРЕЗОВСКАЯ»****Черкасова Татьяна Григорьевна^{1,*}, Таскин Андрей Васильевич²,
Федотов Демьян Романович², Баранцев Денис Александрович¹**¹Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева²Дальневосточный федеральный университет

*для корреспонденции: ctg.htnv@kuzstu.ru

**Информация о статье**

Поступила:

07 ноября 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

22 ноября 2024 г.

Принята к публикации:

02 декабря 2024 г.

Опубликована:

05 декабря 2024 г.

Ключевые слова:угледобывающая отрасль,
отходы углеобогащения,
угольный концентрат,
гравитационное обогащение,
электростатическая
сепарация, магнитная
сепарация, сегрегационное
разделение.**Аннотация.**

В настоящее время уголь занимает первое место в мире по использованию в генерации энергии, оставаясь гарантом устойчивого промышленного развития стран. Этому содействуют большие объемы добычи и переработки, в результате которых образуются отвалы горных пород и шламов. Как правило, развитие производства в странах с угледобывающими предприятиями не способно перерабатывать постоянно растущие объемы отходов, что, в частности, связано с отсутствием рентабельных технологий, большими капитальными затратами и отсутствием большого спроса на продукцию, получаемую из данного техногенного сырья. Одним из направлений уменьшения объемов образующихся отходов является их глубокая переработка, которая зачастую не производится из-за использования старых технологий на обогатительных фабриках. В результате имеются отвалы, содержание угля в которых достигает 57 %, что позволяет перерабатывать их с целью получения товарного угольного концентрата. Мировой опыт переработки таких отвалов связан с технологиями гравитационного обогащения в силу малых капитальных затрат и высокой эффективности. При этом иностранные фирмы преимущественно перерабатывают отходы шламостойников в силу однородности элементного и гранулометрического составов и отсутствия необходимости дополнительного измельчения материала.

В данной работе рассмотрена возможность использования магнитной, электростатической сепарации (ЭСС) с целью концентрирования отходов углеобогащения ЦОФ «Березовская», а также сегрегационное разделение на концентрационном столе. Установлено, что использование разделения материала в магнитном и электростатическом поле не дает удовлетворительных результатов в обогащении по углю, при этом ЭСС показала положительный результат только для частиц размером не более 50 мкм. Одноступенчатое гравитационное обогащение на концентрационном столе позволяет получить угольный концентрат с выходом до 58 % и зольностью не более 23 %.

Для цитирования: Черкасова Т.Г., Таскин А.В., Федотов Д.Р., Баранцев Д.А. Физические методы обогащения отходов углеобогащения ЦОФ «Березовская» // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 6 (166). С. 36-46. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-6-36-46, EDN: EFAOME

Введение

По распространённости в природе количество угля превышает запасы других углеводородов, в тоже время оставаясь самым дешевым видом топлива. В ведущих экономиках мира, таких как Германии и США, доля угля в топливно-энергетическом балансе превышает 50 %, а в Индии и Китае это доля составляет более 70 % [1], что подтверждает ценность данного ресурса в укреплении энергетической безопасности, бесперебойности энергоснабжения и устойчивого развития промышленности в развитых странах [2]. В свою очередь высокие темпы добычи значительно превосходят объёмы производства в добывающих странах, что приводит к накоплению отходов добычи и углепереработки. Так за 2018 г. в Кемеровской области добыто рекордные 255,3 млн т угля [3] с учетом норм потери сопутствующих материалов при производстве 1 тонны угля образуется более 4 т вскрышных пород при открытой добыче (более 0,3 т при шахтной добыче) и более 0,3 т шламов обогащения [4], на основании чего можно сделать вывод о примерных объёмах отходов угледобывающей промышленности.

Как показывает практика, часть образующихся отходов является следствием ограниченности технологий обогащения. Так в работе [5] представлены результаты исследования гранулометрического состава отходов флотации ОФ «Краснобродская-Коксовая» филиала УК «УРК» «Краснобродский угольный разрез», в которых 53,89 % материала имеют крупность менее 20 мкм с зольностью 40,5 %, при этом во фракции от 0,25 до 0,020 мм содержание угля достигает 39,92 %.

Авторы [6] представили результаты гранулометрического и минерального состава отходов ЦОФ «Кузнецкая», в которых среднее содержание угля составляет 13,5 %. Минеральная часть состоит из карбонатных минералов с включениями угля, кварца, гидроксида железа, магнетита, пирита, халькопирита, ибарита и единичных включений различных минералов (пироксен, амфибол, эпидот, клейофан, хлорит, циркон).

В гидроотвале ОФ «Ново-Гришевская» (Иркутская область) среднее содержание общего углерода в отходах обогащения каменного угля по данным приближенно-количественного рентгенофлуоресцентного анализа составляет от 58,8 до 67,6%, что свидетельствует о высокой степени потерь при обогащении [7].

Большая доля потерь угля наблюдается на ЦОФ «Березовская», зольность шламов, образующихся на различных стадиях углеобогащения, варьируется от 43 – 83,8 % [8], что объясняется устаревшими технологиями [9]

поскольку фабрика была введена в эксплуатацию в 1969 г.

Отходы флотации ЦОФ «Беловская» представляют собой сфлуктурированные гранулы крупностью +0,5 мм и зольностью 69,8%, содержание минеральных компонентов составляет: SiO_2 – 44,8 %; Al_2O_3 – 14,9 %; CaO – 3,1 %, FeO – 3,0 % [10]. На основании вышеописанного можно сделать вывод, в Кузбассе имеются большие залежи техногенных отходов, имеющих высокую концентрацию угля.

Снизить объёмы образующихся отходов, повысить ресурсосбережение и получить дополнительную продукцию возможно, примером тому служит обогатительная фабрика «Черниговская», где из угольных шламов отстойников с зольностью 26,6 % за счет внедрения установки по их переработке удалось получить концентрат с зольностью 10,9 % и выходом 40,6 % [11]. Избирательная модернизация отдельных узлов также приводит к снижению себестоимости переработки и увеличению степени извлечения целевого компонента, примером тому служит замена традиционного процесса флотации на селективную флокуляцию угольных шламов классом + 0,15 мм. Подобные исследования по флокуляции шлама класса 0-0,15 мм с зольностью 25,0-28,0 % проведены на ОФ «Распадская», полученный угольный концентрат имеет зольность 14-16% при выходе 75-80 % [12].

Опыт использования отходов угледобычи и углеобогащения имеется во многих развитых странах, в Китае ежегодно прирост данного типа отходов составляет 300 - 350 млн тонн, а накопленных более 5 млрд тонн. С 2013 г. в Китае перерабатывается 480 млн тонн отходов угольной промышленности, из которых примерно 150 млн тонн были использованы для производства электроэнергии (32%), 56 млн тонн переработаны в сырье для строительных материалов (12%), а 260 млн тонн задействованы для мелиорации земель (56%) [13]. В Турции отходы шламоотстойника ОФ «Тунджели» компании «Western Lignite Company» перерабатывают с использованием концентраторов Кнелсона, спиральных и мультигравитационных сепараторов (multi gravity separator). Из фракции 0,2 – 1 мм получен концентрат с содержанием угля 81 %, а из более мелкой фракции 0,038 – 0,2 мм выход концентрата составил около 90 % с содержанием угля 82,2 % [14]. В Силезском технологическом институте (г. Гливице, Польша) исследована возможность обесшламливания мелкодисперсных отходов угля посредством их просеивания через быстро вибрирующий грохот с тканевой фильтрующей мембраной,

Таблица 1. Описание проб полученных ЦОФ «Берёзовская»
Table 1. Description of the samples obtained by the CPP "Berezovskaya"

Маркировка пробы	Наименование пробы	Описание пробы
БФ-1	Отходы ФПО 0 - 0,5	Грунт темно-серого цвета, слипшийся в небольшие комья. Имеет редкие включения черного цвета (возможно угля) размерами от 0,5 мм до 4мм.
БФ-2	Промпродукт + 0,5 – 13	Мелкий грунт, похожий на песок темно-серого цвета. Более крупные включения пробы имеют черный цвет.
БФ-3	Промпродукт + 13	Куски породы черного цвета. Некоторые на изломе имеют слоистую структуру, некоторые зернистую.
БФ-4	Порода +13	Крупные куски породы серого и черного цветов, примерно в равном соотношении. Куски черного цвета визуально схожи с пробой БФ-3.
БФ-5	Порода + 0,5 - 13	Кусочки породы светло-серого и темно-серого цветов, включений кусков черного цвета не наблюдается. Темно-серые куски в преобладающем большинстве имеют слоистую структуру.

Таблица 2. Весовое распределение пробы БФ-3 по результатам двухступенчатой электростатической сепарации

Table 2. Weight distribution of the BF-3 sample according to the results of two-stage electro-static separation

1 ступень ЭС сепарации (масса обогащаемой пробы 9825 г)	
Бункер ЭС сепаратора	Масса, г
1 (концентрат 1-й ступени ЭС сепарации)	1315
2 (промежуточный продукт)	7965
3 (промежуточный продукт)	20
4 (промежуточный продукт)	10
Итого	9310
Потери	515
2 ступень ЭС сепарации (масса обогащаемой пробы 1315 г)	
Бункер ЭС сепаратора	Масса, г
1 (концентрат 2-й ступени ЭС сепарации)	345
2 (промежуточный продукт)	600
3 (промежуточный продукт)	-
4 (промежуточный продукт)	5
Итого	950
Потери	365

двухэтапный процесс позволяет извлечь 19,2 % угольного концентрата с зольностью 20,1 % [15]. Из мелкодисперсных отходов (0 - 0,15 мм) шламоотстойника центральной угольной шахты № 4 Иллинойс (штат Иллинойс, США) с помощью пенной флотации в камере Джеймсона (диаметром 15 см) выделен угольный концентрат с содержанием угля 75 %, пригодный для использования в энергетических целях. Зольность исходного шлама около 50 % [16]. На основании изложенной информации можно сделать вывод, что традиционными способами концентрирования угля из шламов, представленных в иностранной литературе, являются центробежная сепарация и флотация.

В данной работе рассматриваются способы обогащения некоторых отходов углеобогащения ЦОФ «Березовская» методами магнитной и

электростатической сепарации и вибрационной сегрегации. Преимущественно разделение в магнитном и электростатическом полях используется для руд или золотшляков [17, 18], тогда как работы по сегрегационному разделению угольных шламов на концентрационных столах встречаются чаще [19, 20].

Методы и результаты

Описание исходных образцов отходов углеобогащения ЦОФ «Берёзовская» расположенной в пгт. Березовский (Кемеровская область) представлено в таблице 1.

По предварительным результатам исследований, представленных в работе [21], в качестве наиболее ценного образца для проведения работ по извлечению угля, была выбрана проба БФ-3 с большим показателем

Таблица 3. Определение зольности проб после электростатической сепарации

Table 3. Determination of ash content of samples after electrostatic separation

Проба	Масса навески, г	Масса после прокаливания, г	Зольность, %
БФ – 3 (исходная)	100	56,97	57,0
БФ – 3 (концентрат 1-й ступени ЭС)	100	53,62	53,6
БФ – 3 (концентрат 2-й ступени ЭС)	100	54,00	54,0

Таблица 4. Определение зольности пылевой части пробы БФ – 3

Table 4. Determination of the ash content of the dust part of the BF – 3 sample

Масса навески, г.	Масса после прокаливания, г	Зольность, %
9,41	3,62	38,5

Таблица 5. Физические характеристики магнитной и немагнитной фракций

Table 5. Physical characteristics of magnetic and non-magnetic fractions

Название пробы	Выход, г	Выход, %	Влажность, %	Летучие вещества, %	Зольность, %
БФ-3, исходная проба	26656	100,00	0,71	15,37	57,59
БФ-3, магнитная фракция	156	0,59	0,47	22,53	38,23
БФ-3, немагнитная фракция	26500	99,41	0,69	18,03	57,72

Таблица 6. Результаты определения общего, органического и неорганического углерода в исходной пробе и продуктах деления

Table 6. Results of determination of total, organic and inorganic carbon in the initial sample and fission products

Название пробы	Выход, г	Выход, %	С _{общ} , %	С _{неорг} , %	С _{орг} , %
БФ-3, исходная проба	26656	100,00	31,88	0,11	31,77
БФ-3, магнитная фракция	156	0,59	52,70	0,19	52,51
БФ-3, немагнитная фракция	26500	99,41	32,74	0,06	32,68

потерь после прокаливания. Образец измельчался до 50-150 мкм. После осушения измельчённой пробы частицы материала визуально исследованы под оптическим микроскопом с увеличением в 500 раз.

Исследование показало, что большинство частиц представлено сростками породы и угля, ещё более мелкими, чем сама частица и без чётких границ раздела, что сразу переводит задачу по извлечению угля из представленных проб в область работы с мелкими углями и шламами углеобогащения. Исходя из этого, можно сделать предварительное предположение, что для получения углеродного концентрата перспективны мелкие классы пробы после измельчения.

Электростатическая сепарация проводилась на трибоэлектростатическом сепараторе ЭРГА ЭСС 320х300/Т667 для фракции классом крупности - 2+ 0,5 мм и массой 9,825 кг. Сепарация проводилась в две ступени, полученный на первой ступени концентрат подвергался повторной сепарации. Результаты ЭС сепарации, показывающие весовое распределение, пробы, представлены в таблице 2.

Для определения содержания угля в полученных образцах после электростатической сепарации отобрано и прокалено 3 навески:

исходного материала (100 г); концентрата после первой ступени обогащения (1315 г/100 г); концентрата после второй ступени обогащения (345 г/100 г). Результаты представлены в таблице 3.

После обогащения пробы БФ – 3 на электростатическом сепараторе, дополнительно со стенок прибора было собрано 9,41 г угольной пыли, оставшейся после эксперимента. Собранная пыль была прокалена до достижения стабильной массы при температуре 825⁰ С. Результаты представлены в таблице 4.

Сухая одноступенчатая магнитная сепарация пробы проводилась на лабораторном магнитном сепараторе ПБСЦ-40/10.

Определение гранулометрического состава материала проб выполнялось с использованием сит 2 мм, 1 мм, 0,5 мм, 0,2 мм на просеивающей машине AS 200 basic.

Гравитационное обогащение немагнитной фракции по классам крупности проводилось на концентрационном лабораторном столе 30-А КЦ.

Определение химического состава золы исходного угля и продуктов обогащения выполнено по ГОСТ Р 59592-2021.

Определение зольности, серы исходного угля и продуктов обогащения выполнено по ГОСТ Р 55661-2013.

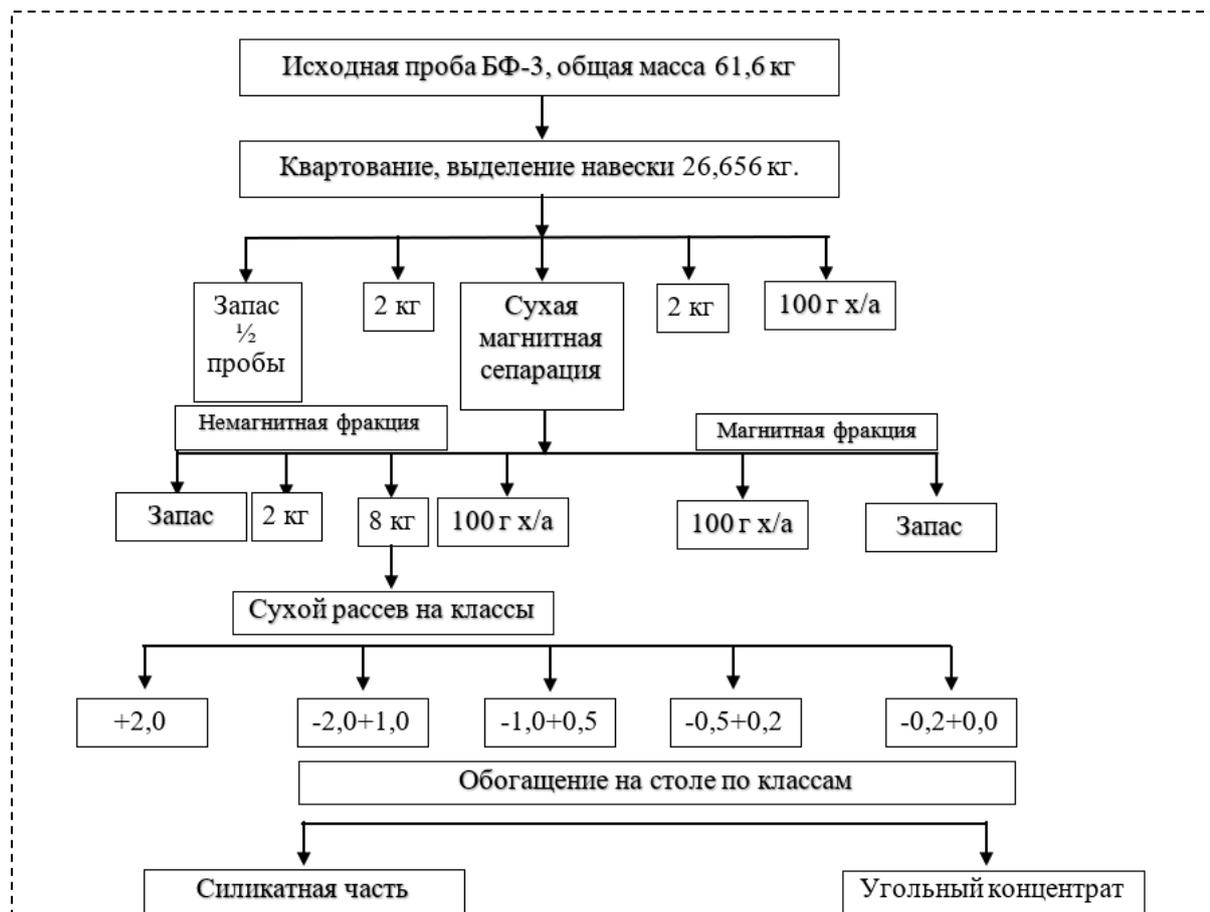


Рис. 1. Схема проведения исследований

Fig. 1. Research scheme

Таблица 7. Химический состав исходной пробы БФ-3 и продуктов магнитной сепарации
 Table 7. Chemical composition of the initial sample of BF-3 and magnetic separation products

Название пробы	Содержание в %									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	S	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	П.П.П.
БФ-3, исходная проба	29,80	8,74	0,21	4,43	0,48	3,18	4,66	н/о	1,63	42,41
БФ-3, немагнитная фракция	18,35	6,07	0,32	4,38	0,54	2,97	5,11	н/о	1,67	61,77
БФ-3, магнитная фракция	32,34	10,03	0,16	5,28	0,45	4,18	4,71	н/о	1,60	42,28

Таблица 8. Результаты магнитной сепарации
 Table 8. Results of magnetic separation

Магнитная индукция, Тл	Выход, %	
	Магнитная фракция	Немагнитная фракция
0,03 (ручной магнит)	0	100
0,05 (ручной магнит)	0	100
0,13 (сухой магнитный сепаратор ПБСЦ-40/10)	0,5	95
0,25 (ручной магнит)	10	90

Определение содержания органического, неорганического, общего углерода проведено с использованием анализатора углерода ТОС исходного угля и продуктов обогащения по ГОСТ 32979-2014.

Полуколичественный анализ выполнялся с использованием атомно-эмиссионного

многоканального спектрометра «Гранд» (спектральный анализ V категории точности).

Для получения угольного концентрата из пробы БФ-3 гравитационным методом навеска массой 26,656 кг была обработана по схеме, представленной на рисунке 1.

На лабораторном магнитном сепараторе ПБСЦ-40/10 отобрана магнитная фракция при

Таблица 9. Зольность, содержание летучих веществ, влажность в различных классах крупности немагнитной фракции

Table 9. Ash content, volatile matter content, humidity in various classes of non-magnetic fraction size

Название пробы	Выход, г	Выход, %	Влажность, %	Летучие вещества, %	Зольность, %
Немагнитная фракция, + 2 мм	228	2,87	0,74	16,4	62,96
Немагнитная фракция, - 2 + 1 мм	5940	74,71	0,72	18,46	58,93
Немагнитная фракция, - 1 + 0,5 мм	953	11,99	0,61	19,06	54,15
Немагнитная фракция, - 0,5 + 0 мм	830	10,44	0,45	20,77	48,60
Итого	7951	100,00			

Таблица 10. Содержания углерода по классам крупности немагнитной фракции

Table 10. Carbon content by size classes of non-magnetic fraction

Описание пробы	Выход, г	Выход, %	С _{общ} , %	С _{неорг} , %	С _{орг} , %
БФ-3, немагнитная фракция, +2 мм	228	2,87	28,16	0,24	27,93
БФ-3, немагнитная фракция, -2+1 мм	5940	74,71	31,45	0,12	31,33
БФ-3, немагнитная фракция, -1+0,5 мм	953	11,99	36,61	0,05	36,56
БФ-3, немагнитная фракция, -0,5+0 мм	830	10,44	41,68	0,06	41,62
Итого	7951	100,00			

Таблица 11. Химический состав образцов по классам крупности немагнитной фракции пробы БФ-3

Table 11. Chemical composition of samples by size classes of the non-magnetic fraction of the BF-3 sample

Описание пробы	Массовая доля оксида, %									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	S	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	П.П.П.
БФ-3, немагнитная фракция, + 2 мм	38,73	11,77	0,13	4,15	0,45	3,98	4,16	1,13	2,14	36,22
БФ-3, немагнитная фракция, - 2 + 1 мм	34,76	10,08	0,12	4,72	0,46	3,62	5,56	1,10	2,04	40,14
БФ-3, немагнитная фракция, - 1 + 0,5 мм	31,11	9,42	0,23	4,26	0,45	2,91	4,72	0,97	1,85	45,85
БФ-3, немагнитная фракция, - 0,5 + 0 мм	27,14	7,78	0,24	4,21	0,51	3,03	4,84	0,93	1,88	51,40

Таблица 12. Результаты гравитационного одноступенчатого обогащения немагнитной фракции расклассифицированной пробы БФ-3

Table 12. Results of gravitational single-stage enrichment of the non-magnetic fraction of the classified sample BF-3

Описание пробы	Выход		Влажность, %	Летучие, %	Зольность, %
	г	%			
БФ-3, немагнитная фракция, -2+1,0 мм (угольный концентрат)	3685	64,1	0,44	15,09	45,29
БФ-3, немагнитная фракция, хвосты стола -2+1,0 мм (силикатная часть)	2068	35,9	0,55	18,54	66,92
Итого -2+1 мм	5753	100			
БФ-3, немагнитная фракция, -1+0,5 мм (угольный концентрат)	453	55,1	0,51	22,47	38,11
БФ-3, немагнитная фракция, хвосты стола -1+0,5 мм (силикатная часть)	369	44,9	0,54	18,43	67,07
Итого -1+0,5 мм	822	100			
БФ-3, немагнитная фракция, -0,5+0 мм (угольный концентрат)	291	40,1	0,29	17,81	37,01
БФ-3, немагнитная фракция, хвосты стола -0,5+0 мм (силикатная часть)	398	54,9	0,5	18,50	65,47
БФ-3, пена, собранная перед гравитационным обогащением	36,6	5,04	0,32	23,12	37,29
Итого -0,5+0 мм	725,6	100,0			

Таблица 13. Процентное содержание углерода в продуктах обогащения немагнитной фракции БФ-3
Table 13. Percentage of carbon content in products of enrichment of non-magnetic fraction BF-3

Описание пробы	Выход, г	Выход, %	С _{общ} , %	С _{неорг} , %	С _{орг} , %
БФ-3, немагнитная фракция, - 2 + 1,0 мм (угольный концентрат)	3685	64,1	45,50	0,06	45,43
БФ-3, немагнитная фракция, хвосты стола - 2 + 1,0 мм (силикатная часть)	2068	35,9	23,18	0,20	22,99
Итого - 2 + 1 мм	5753	100			
БФ-3, немагнитная фракция, - 1 + 0,5 мм (угольный концентрат)	453	55,1	53,53	0,04	53,49
БФ-3, немагнитная фракция, хвосты стола - 1 + 0,5 мм (силикатная часть)	369	44,9	22,92	0,30	22,62
Итого - 1 + 0,5 мм	822	100			
БФ-3, немагнитная фракция, - 0,5 + 0 мм (угольный концентрат)	291	42,2	53,75	0,02	53,73
БФ-3, немагнитная фракция, хвосты стола - 0,5 + 0 мм (силикатная часть)	398	57,8	23,78	0,57	23,20
БФ-3, пена, собранная перед гравитационным обогащением	36,6	0,46	53,10	0,04	53,06
Итого - 0,5 + 0 мм	689	100			

Таблица 14. Химический состав продуктов обогащения немагнитной фракции БФ-3
Table 14. Chemical composition of the enrichment products of the non-magnetic fraction BF-3

Название пробы	Содержание в %									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	S	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	П.П.П.
БФ-3, - 2 + 1,0 мм (угольный концентрат)	23,98	6,58	0,14	2,91	0,49	3,33	4,07	0,91	1,78	57,03
БФ-3, хвосты стола - 2 + 1,0 мм (силикатная часть)	39,36	11,12	0,18	5,44	0,82	3,69	5,39	1,21	1,65	32,11
БФ-3, - 1 + 0,5 мм (угольный концентрат)	22,70	5,74	0,26	2,34	0,48	2,38	2,86	0,68	1,50	61,89
БФ-3, хвосты стола - 1 + 0,5 мм (силикатная часть)	39,34	10,69	0,17	5,63	0,51	3,34	5,73	1,27	1,72	32,11
БФ-3, - 0,5 + 0 мм (угольный концентрат)	21,56	5,39	0,27	2,50	0,53	2,50	3,06	0,62	1,69	62,99
БФ-3, хвосты стола - 0,5 + 0 мм (силикатная часть)	38,22	9,86	0,18	5,57	0,36	3,86	6,22	1,01	1,65	33,90
БФ-3, пена, перед гравитационным обогащением	19,46	4,72	0,28	3,98	0,48	2,96	4,62	0,77	1,70	62,71

значении магнитной индукции 0,13 Тл. В таблице 5 приведены физические характеристики пробы, разделённой на магнитную и немагнитную части с определением влажности, летучих веществ и зольности.

В таблице 6 представлены результаты определения общего (С_{общ}), органического (С_{орг}), неорганического углерода (С_{неорг}), выполненные высокотемпературным каталитическим методом ИК-детектирования с использованием анализатора общего углерода модель ТОС-V фирмы Шимадзу в исходном материале пробы БФ-3, в немагнитной и магнитной фракциях.

В таблице 7 представлены результаты по определению химического состава образцов исходной пробы БФ-3 и продуктов магнитной сепарации.

Проведение эксперимента по сухой магнитной сепарации пробы БФ-3 с

использованием магнитного сепаратора ПБСЦ-40/10 (магнитная индукция на поверхности барабана 0,13 Тл) позволило отделить только 0,5 % магнитной фракции. В таблице 8 представлены результаты тестовых экспериментов по сухой магнитной сепарации с использованием магнитов с разной величиной магнитной индукции.

В таблице 9 представлены показатели зольности, содержания летучих веществ, влажности по классам крупности немагнитной фракции.

В таблице 10 представлены результаты определения содержания общего (С_{общ}), органического (С_{орг}), неорганического углерода (С_{неорг}) в немагнитной фракции исходной расклассифицированной пробы БФ-3.

В таблице 11 представлен химический состав навесок по классам крупности немагнитной фракции.

Аналитические исследования показывают, что содержание оксидов кремния, алюминия, железа, титана, магния, кальция, калия для всех классов крупности сохраняется на одном уровне. Содержание серы увеличивается к нижним классам. По данным количественного химического анализа содержание железа, в среднем, во всех классах около 4,3 %.

Перед проведением экспериментов по гравитационному обогащению пробы БФ-3 по углю материал каждого класса крупности замачивался, всплывшая пена собиралась, объединялась и проводился анализ зольности данного продукта. В таблице 12 приведены результаты обогащения немагнитной фракции расклассифицированной пробы БФ-3 на концентрационном столе 30-А КЦ при одноступенчатом обогащении.

В таблице 13 представлены результаты оценки процентного содержания показателей углерода - общего ($C_{\text{общ}}$), органического ($C_{\text{орг}}$), неорганического ($C_{\text{неорг}}$) в продуктах немагнитной фракции БФ-3 полученные на концентрационном столе 30-А КЦ при одноступенчатом обогащении.

В таблице 14 представлены результаты химического анализа продуктов обогащения немагнитной фракции БФ-3 по классам крупности.

Обсуждение результатов

Эксперименты показали, что при предварительном измельчении и классификации пробы БФ-3 возможно получение черного угольного концентрата гравитационным одноступенчатым обогащением, без перешесток, с зольностью ниже 40 % и выходом не менее 54 % в классах крупности $-1+0,5$ мм и $-0,5+0$ мм.

По мере уменьшения класса крупности частиц пробы происходит уменьшение зольности, что позволяет сделать вывод о необходимости измельчения проб в случае организации переработки данных отходов с целью получения угольного концентрата.

Использование магнитного поля при обогащении имеет следующую зависимость, выход магнитной фракции пропорционален величине магнитной индукции.

По результатам, эксперимента электростатической сепарации для крупных частиц не наблюдается обогащение пробы БФ-3 по углю. Предварительно это можно объяснить тем, что проба состоит из вкрапленных друг в друга компонентов угля и породы без четких границ раздела. Для обогащения по углю методом ЭСС положительный результат достигается только для пылевидной фракции с размерами частиц не более 50 мкм. Установлено,

что содержание углерода в немагнитной фракции увеличивается (зольность снижается) по мере уменьшения класса крупности навесок. Исходя из полученных результатов, рекомендовать метод ЭСС с целью практического применения для получения углеродного концентрата из отходов углеобогащения нецелесообразно в связи с высокими энергозатратами на измельчение, сложностью аппаратного оформления технологического процесса и заведомо низким количеством полезного продукта.

При одноступенчатом концентрировании на концентрационном столе для фракций 0-1,0 мм происходит концентрирование угля с выходом от 36 до 58 % и зольностью не более 23 %.

Основные результаты и выводы

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- 1) При измельчении отходов БФ-3 в мелкой фракции сосредотачивается больше всего угля;
- 2) Использование магнитной сепарации не приводит к значительному изменению концентрации углеродной составляющей, при этом на магнитах с магнитной индукцией более 0,13 Тл возможно извлечь около 5 % магнитной фракции;
- 3) Электростатическая сепарация не дает положительно эффекта при обогащении отходов БФ-3, концентрирование углеродной составляющей с 57 % до 38,5 % наблюдается только для фракций менее 50 мкм;
- 4) Использование одноступенчатого гравитационного обогащения на концентрационном столе позволяет получить угольный концентрат с выходом до 58 % и зольностью не более 23 %.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цивилева А.Е., Голубев С.С. Влияние санкций на работу предприятий угольной промышленности // Уголь. 2022. № 8. С. 84 - 91. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-8-84-91.
2. Анализ возможностей сохранения угольной генерации в России на основе мирового опыта / Н.Г. Любимова, Ю.Н. Линник, А.Б. Жабин и др. // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2022. В. 2. С. 24 - 34. DOI 10.46689/2218-5194-2022-2-1-24-34.
3. Проблема обоснования условно оптимальных объемов добычи угля в Кузбассе с учетом ограничений экологической емкости региона / А.И. Копытов, С.В. Новоселов, А.Н. Куприянов и др. // Уголь. 2023. № 6. С. 85-91. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-6-85-91.
4. Пути утилизации горючих отходов угольной промышленности / Н.А. Кучер, Т.В. Шевченко // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2013. № 2. С. 109 - 112.
5. Перспективы получения товарного продукта из

отходов флотации угольных фабрик / Н.Ю. Турецкая, Т.А. Чикишева, Е.С. Прокопьев и др. // Уголь. 2023. № 9. С. 95 - 99. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-9-95-99.

6. Чикишева Т. А., Комарова А. Г., Прокопьев С. А., Прокопьев Е. С. Предварительная минералогическая оценка отходов углеобогадательной фабрики «Кузнецкая» // Вестник геонаук. 2022. В. 12 (336). С. 44 - 48. DOI: 10.19110/geov.2022.12.6.

7. Опыт сжигания композиционного топлива на основе угольного шлама на ТЭЦ Иркутской области / А.Н. Кудряшов, Т.В. Коваль, М.И. Ижганайтис // Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 1. С. 33 - 45. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-1-33-45.

8. Некоторые физико-химические характеристики отходов углеобогадательного предприятия ПАО ЦОФ «Березовская» / Т.Г. Черкасова, М.О. Пилин, Д.А. Баранцев и др. // Уголь. 2023. № 6. С. 80 - 84. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-6-80-84.

9. Антипенко Л. А., Ермаков А. Ю. Пути повышения объемов обогащения угля // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № S5. С. 59 - 69.

10. Анализ отходов флотационного обогащения угля / Н.Ю. Свечникова, С.В. Юдина, Н.И. Мамедалина // Теория и технология металлургического производства. 2015. № 1(16). С. 19 - 21.

11. Комплексная переработки угольных шламов в товарную продукцию / В.И. Ефимов, Т.В. Корчагина, А. И. Антонов и др. // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2018. Вып. 3. С. 42 - 48.

12. Селективная флокуляция угольного шлама на ОФ «Распадская» / В.И. Новак, В.В. Долматов, В.А. Козлов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. № 5. С. 48 - 51.

13. Jiayan L., Jinman W. Comprehensive utilization and environmental risks of coal gangue: A review. Journal of Cleaner Production. 2019. V. 239. A. 117946. DOI:

10.1016/j.jclepro.2019.117946.

14. Ucara A., Sahbaza O., Ediza N., Karacaa S., Ediza I. G. An investigation into the enrichment of coal wastes of Western Lignite Company (WLC) by physical and physico-chemical methods. Madencilik – Mining. 2023. V. 62 (1). P. 7 - 15. DOI: 10.30797/madencilik.1111260.

15. Hucnar J., Pasiowiec P., Tora B. Methods of Increasing the Calorific Value of Fine Coal Waste. XVIII International Coal Preparation Congress. 2016. P. 409 – 414. DOI: 10.1007/978-3-319-40943-6_61.

16. Chugh Y.P., Patwardhan A. Mine-mouth power and process steam generation using fine coal waste fuel. Resources, Conservation and Recycling. 2004. V. 40. I. 3. P. 225 – 243. DOI: 10.1016/S0921-3449(03)00071-5.

17. Мнушкин И.И. Разработка и внедрение технологии переработки зол тепловых электростанций // Горный информационно-аналитический бюллетень. 1999. № 6. С. 70 - 71.

18. Месеняшин А.И., Логачева Н.А. Электростатическая сепарация минерального сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 1. С. 366 - 369.

19. Кусков В.Б., Кускова Я.В. Сегрегационное разделение угольных шламов на концентрационных столах. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S1-4. С. 230 - 235.

20. Ромашев А.О., Кусков В.Б., Львов В.В. Интенсификация сепарации полезных ископаемых с использованием вибрационной сегрегации // Записки горного института. 2013. Т. 202. С. 118 - 121.

21. Извлечение угольного концентрата из отходов углеобогащения как подготовка к выделению редких и редкоземельных элементов / А.В. Таскин, Д.Р. Федотов, А.Л. Шкуратов, Д.А. Баранцев и др. // Уголь. 2024. В. 4. С. 40 - 44. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-4-40-44.

© 2024 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 – доктор химических наук, профессор, научный руководитель Института химических и нефтегазовых технологий, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», e-mail: ctg.htnv@kuzstu.ru

Таскин Андрей Васильевич – кандидат химических наук, заведующий лабораторией Технологий использования вторичных ресурсов, «Дальневосточный федеральный университет», e-mail: taskin@yandex.ru

Федотов Демьян Романович – ассистент Политехнического института, «Дальневосточный федеральный университет»

Баранцев Денис Александрович – ассистент Института химических и нефтегазовых технологий, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», e-mail: kemche@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Черкасова Татьяна Григорьевна – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, концептуализация исследования, выводы, написание текста.

Таскин Андрей Васильевич - постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, концептуализация исследования, выводы, написание текста.

Федотов Демьян Романович - научный менеджмент, концептуализация исследования, сбор и анализ данных.

Баранцев Денис Александрович - научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

PHYSICAL METHODS OF ENRICHMENT OF CARBON ENRICHMENT WASTE FROM THE CENTRAL PROCESSING PLANT "BEREZOVSKAYA"

Tatiana G. Cherkasova ^{1,*}, Andrey V. Taskin ²,
Demyan R. Fedotov ², Denis A. Barantsev ¹

¹ T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

² Far Eastern Federal University

*for correspondence: ctg.htnv@kuzstu.ru



Article info

Received:

07 November 2024

Accepted for publication:

22 November 2024

Accepted:

02 December 2024

Published:

05 December 2024

Keywords: coal mining industry, coal enrichment waste, coal concentrate, gravity enrichment, electrostatic separation, magnetic separation, segregation separation.

Abstract.

A qualitative solution to the problems of estimated assessment and further design, control, diagnostics and operation of a technical system, using the example of vehicles, contributes to the formation of professional competence among graduates of a polytechnic university in the specialty 23.05.0 «Land transport and technological means» and the training area 23.03.03 «Automobiles and automotive industry», within the framework of studying special chapters of mathematics. The study of vehicle reliability issues, during the implementation of the educational process, is determined by improving the quality of training specialists in the automotive industry and, as a result, improving the quality and safety of road traffic.

The author substantiates the importance of introducing mathematical models based on Markov processes in the course of monitoring and diagnostics of technical systems to predict the reliability criteria of a technical system: the probability of failure-free operation; failure rate and recovery; downtime and continuous operation; average operating time before the first failure; stationary values of the system availability coefficient, etc.

The issues of reliability of technical systems were considered by the author in unity with mathematical tools; the formulation and solution of problems was carried out on the basis of graph theory, matrix calculus methods for solving systems of linear algebraic equations, basic theorems of probability theory and mathematical statistics.

An algorithm for the implementation of interdisciplinary educational tasks for the control and diagnosis of a technical system is presented; models of technical tasks for the operation and maintenance of vehicles implemented on the basis of Markov processes are listed; a list of specific tasks for a step-by-step study of a technical system is compiled; an example of the compilation and subsequent solution of a system of linear algebraic equations for the case of a stationary value of the probability of states is analyzed.

For citation: Cherkasova T.G., Taskin A.V., Fedotov D.R., Barantsev D.A. Physical methods of enrichment of carbon enrichment waste from the central processing plant "Berezovskaya". *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024; 6(166):36-46. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-6-36-46, EDN: EFAOME

REFERENCES

1. Grechikhin, N.S., Bulychev, D.I., Azizyan, I.A. Mathematical methods of control and diagnostics of the state of the automotive industry/N.S. Grechikhin, D.I. Bulychev, I.A. Azizyan// In the collection: Science, technology, pedagogy of

higher education. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Moscow, 2022, p. 34-38.

2. Yahyaev, N.Ya, Korablin, A.V. Fundamentals of reliability theory: textbook for students. Higher education institutions. Prof. education. – M.: Publishing center "Academy", 2014. – 208 p.

3. Azizyan, I.A., Mironova, E.I. The importance of studying Markov processes during the study of mathematical models of a technical system at the stages of diagnosis and repair/I.A. Azizyan, E.I. Mironova//Repair. Restoration. Modernization, 2022, № 11, p. 16-19.
4. Potapova, N.V. Pedagogical science on the problem of developing students' supra-professional skills / Potapova N.V., Panina T.S. // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. – 2021. № 2, p.93-98.
5. Kushnarev, L. I. Towards consistently high quality of mechanical engineering products / L. I. Kushnarev, D. L. Sevostyanova // Repair. Recovery. Modernization. - 2022. – № 2. – p. 32-36.
6. Repair quality management. Training of specialists / N. V. Byshov, N. R. Kuze-lev, G. A. Nuzhdin, G. K. Rembalovich // Repair. Recovery. Modernization. – 2019. – № 9. –p. 37-43
7. Polovko, A.M., Gurov, S.V. Fundamentals of reliability theory. The workshop. – St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2006. – 560 p.
8. Ushakov, I.A. Course of the theory of reliability of systems: textbook. handbook for universities/I.A. Ushakov. – M.: Bustard, 2008. – 239 p
9. Belyaev, Y.K. Bogatyrev, V.A., Bolotin, V.V. Reliability of technical systems. – M.: Radio and Communications, 1985. – 608 p.
10. Gnedenko, B.V., Belyaev, Yu.K., Solovyov, A.D. Mathematical methods in the theory of reliability. – M.: Nauka, 1965. – 524 p.
11. Alon, N. Spencer, D. Probabilistic method: textbook. the manual. – M.: Binom, 2011. – 320 p.
12. Ushakov, I.A. Course of the theory of reliability of systems. – M.: Bustard, 2008. – 239 p.
13. Ostreikovskiy, V.A. Theory of reliability. – M.: Higher School, 2003. – 463 p.
14. Written, D.T. Lecture notes on probability theory, mathematical statistics and random processes. – M.: Iris Press, 2007. – 288 p.
15. Khripunova, M.B. Higher mathematics: textbook and workshop for universities. – Moscow: Yurait Publishing House, 2020. – 478 p.
16. Asaeva, T.A. A guide to performing laboratory work on a PC on the mathematical foundations of reliability theory. – Ryazan.: Ryazan Institute (f) Moscow State University, 2022. – 64 p.
17. Zaikovskiy, V. E. Automation of the risk management process is an important step towards digitalization of managerial decision-making / V. E. Zaikovskiy, A.V. Karev // Problems of risk analysis. - 2021. – Vol. 18. – 11. Alon, N. Spencer, D. Probabilistic method: textbook. the manual. – M.: Binom, 2011. – 320 p.
12. Ushakov, I.A. Course of the theory of reliability of systems. – M.: Bustard, 2008. – 239 p.
13. Ostreikovskiy, V.A. Theory of reliability. – M.: Higher School, 2003. – 463 p.
14. Written, D.T. Lecture notes on probability theory, mathematical statistics and random processes. – M.: Iris Press, 2007. – 288 p.
15. Khripunova, M.B. Higher mathematics: textbook and workshop for universities. – Moscow: Yurait Publishing House, 2020. – 478 p.
16. Asaeva, T.A. A guide to performing laboratory work on a PC on the mathematical foundations of reliability theory. – Ryazan.: Ryazan Institute (f) Moscow State University, 2022. – 64 p.
17. Zaikovskiy, V. E. Automation of the risk management process is an important step towards digitalization of managerial decision-making / V. E. Zaikovskiy, A.V. Karev // Problems of risk analysis. - 2021. – Vol. 18. – № 2. – pp. 52-59.
18. Sudakov, R.S. Tests of technical systems. — M.: Mechanical Engineering, 2014. – 272 p.
19. Dorokhov, A.N., Kemozhitsky, V.A., Mironov, A.N. Shestopalova, O.L. Ensuring the reliability of complex technical systems. – St. Petersburg: "Lan", 2012. – 352 p.
20. Vladimirov, A.F. Workbook on the application of the theory of random functions to the technical operation of cars [Electronic resource] / A.F. Vladimirov. – Ryazan, 2015. – 50 p.

© 2024 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 – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Scientific Supervisor of the Institute of Chemical and Oil and Gas Technologies of the T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, e-mail: ctg.htnv@kuzstu.ru

Andrey V. Taskin – Candidate of Chemical Sciences, Head of the Laboratory of Technologies for the use of secondary Resources "Far Eastern Federal University", e-mail: taskin@yandex.ru

Demyan R. Fedotov – Assistant at the Polytechnic Institute "Far Eastern Federal University"

Denis A. Barantsev – assistant at the Institute of Chemical and Oil and Gas Technologies of the T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, e-mail: kemche@yandex.ru

Contribution of the authors:

Tatyana G. Cherkasova – setting a research task, scientific management, conceptualization of research, conclusions, writing a text.

Andrey V. Taskin - setting a research task, scientific management, conceptualization of research, conclusions, writing a text.

Demyan R. Fedotov - scientific management, conceptualization of research, data collection and analysis.

Denis A. Barantsev - scientific management, review of the relevant literature, conceptualization of research, data collection and analysis, review of the relevant literature, conclusions, writing the text.

All authors have read and approved the final manuscript.

