

УДК 62-665.4:621.928.89 © Т.Г. Черкасова✉, М.О. Пилин, А.В. Тихомирова, 2024

UDC 62-665.4:621.928.89 © T.G. Cherkasova ✉, M.O. Pilin, A.V. Tikhomirova, 2024

ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия
✉ e-mail: ctg.htnv@kuzstu.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU), Kemerovo, 650000, Russian Federation
✉ e-mail: ctg.htnv@kuzstu.ru

Исследование магнитных свойств отходов углеобогащения АО ЦОФ «Березовская»*

Studies of magnetic properties of coal processing wastes from the Berezovskaya Central Processing Plant

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-6-40-44>

ЧЕРКАСОВА Т.Г.

Доктор химических наук, профессор,
научный руководитель
Института химических
и нефтегазовых технологий
ФГБОУ ВО «Кузбасский
государственный технический
университет им. Т.Ф. Горбачева»,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: ctg.htnv@kuzstu.ru

ПИЛИН М.О.

Старший преподаватель
Института химических
и нефтегазовых технологий
ФГБОУ ВО «Кузбасский
государственный технический
университет имени Т.Ф. Горбачева»,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: pilinmo@kuzstu.ru

Одним из важных направлений реализации новой угольной политики в России является преобразование отрасли из сырьевой в отрасль по добыче и глубокой переработке угля. При глубокой переработке угля образуется значительное количество отходов, которые пагубно влияют не только на человека, но и на окружающую его среду. Комплексная переработка отходов углеобогащения подразумевает полное их использование, при этом отходы стоит рассматривать как бедные руды в связи с низким содержанием редких ценных компонентов. Это требует, в свою очередь, одновременно перерабатывать большие объемы отходов для концентрирования содержания редких и редкоземельных элементов (РиРЗЭ). Одним из способов выделения железо-содержащих компонентов из минеральной части отходов являются методы магнитной сепарации. В данной работе применялась методика сухой ступенчатой магнитной сепарации. Исследовался образец смеси отхода углеобогащения АО ЦОФ «БЕРЕЗОВСКАЯ» БФ-4, БФ-5 (порода АО ЦОФ «Березовская», пгт. Березовский, Кузбасс). По итогам проведенных исследований сделан вывод о том, что магнитную фракцию необходимо выделять при силе тока 5 А, используя многократную сепарацию, увеличивая размер частиц, чтобы исключить эффект «налипания».

Ключевые слова: угольные отходы, магнитная сепарация, углеобогащение, отходы.

Для цитирования: Черкасова Т.Г., Пилин М.О., Тихомирова А.В. Исследование магнитных свойств отходов углеобогащения АО ЦОФ «Березовская» // Уголь. 2024;(6):40-44. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-6-40-44.

Abstract

One of the important directions for the implementation of the new coal policy in Russia is the transformation of the industry from a raw material industry to an industry for the extraction and deep processing of coal. During deep processing

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 075-15-2022-1194).



Научно-образовательный
центр «Кузбасс»

of coal, a significant amount of waste is generated, which has a detrimental effect not only on humans, but also on the environment.

Complex processing of coal processing waste implies their full use, while the waste should be considered as low-grade ore due to the low content of valuable components. This, in turn, requires the processing of large volumes of waste at a time. One of the methods for isolating the mineral part of iron-containing components is magnetic separation methods.

In this work the technique of dry stepwise magnetic separation was used. A sample of a mixture of coal preparation waste from Central Processing Plant "Berezovskaya.

Keywords

Coal waste, magnetic separation, coal preparation, waste.

For citation

Cherkasova T.G., Pilin M.O., Tikhomirova A.V. Studies of magnetic properties of coal processing wastes from the Berezovskaya Central Processing Plant. *Ugol'*. 2024;(6):40-44. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-6-40-44.

Acknowledgements

The research was financially supported by a grant from the Russian Ministry of Education and Science (Agreement No. 075-15-2022-1194).

ТИХОМИРОВА А.В.

Канд. хим. наук, доцент,
доцент Института химических
и нефтегазовых технологий
ФГБОУ ВО «Кузбасский
государственный технический
университет имени Т.Ф. Горбачева»,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: tav.htnv@kuzstu.ru

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных направлений реализации новой угольной политики в России является преобразование отрасли из сырьевой в отрасль по добыче и глубокой переработке угля. Такая направленность призвана повысить уровень конкурентоспособности угольной промышленности, что даст толчок существенному развитию угледобывающих территорий, получению различной продукции из угля (кокс, полукокс, активированный уголь, сорбенты, смолы, углеродные волокна, моторное топливо, горный воск и др.) [1, 2].

В угледобывающих странах выход твердых отходов при открытой добыче составляет 3-5 т, при шахтной – 0,2-0,3 т на 1 т добываемого угля или сланца. При обогащении углей выход хвостов составляет 0,15–0,35 т/т угля [3, 4, 5, 6]. По ориентировочным расчетам, только с отходами обогащения в России ежегодно теряется до 4 млн т угля. Для обогащения углей применяют гравитационные и флотационные методы, причем в первом случае используют более крупный материал, что предопределяет значительное различие в гранулометрическом составе отходов этих обогатительных процессов.

Содержание углерода в отходах обогащения (ω) составляет примерно от 3 до 25-26% (по другим источникам – 5-20%). Зольная часть состоит преимущественно из оксидов SiO_2 , Al_2O_3 и Fe_2O_3 (>90%), и только отдельные месторождения углей и сланцев содержат повышенное количество оксида кальция. Зольность отходов обогатительных фабрик находится примерно в пределах от 70 до 88%, сернистость – от 1 до 4,5%. Сложность использования отходов обогащения не только в том, что они отличаются друг от друга по физико-химическим свойствам, но и тем, что они собираются в больших количествах в отвалах и трудно оттуда извлекаются.

Породы вскрыши, отличающиеся высоким содержанием минеральных веществ, могут быть использованы для энергетических целей после предварительного обогащения с получением кондиционного по зольности продукта. Есть возможность их применения в небольших количествах в смеси с малозольными углями для получения водно-угольных суспензий или для сжигания в специальных топочных устройствах (топки с кипящим слоем) [7]. Также они могут применяться как закладочный материал и для рекультивации земель, а шахтные – для закладки шахтного пространства. Так, вскрышные породы некоторых карьеров (Канско-Ачинского, Минусинского и др.) [6] могут применяться без селективной отработки слагающих литологических разностей как сырье для производства пористых заполнителей для легких бетонов, керамических стеновых материалов, при строительстве дамб и других инженерных сооружений.

Комплексная переработка отходов углеобогащения подразумевает полное их использование, при этом отходы стоит рассматривать как бедные руды

в связи с низким содержанием ценных компонентов. Это требует, в свою очередь, одновременно перерабатывать большие объемы отходов. Одним из способов выделения железосодержащих компонентов из минеральной части являются методы магнитной сепарации.

Магнитные методы обогащения применяют при переработке различных металлических и неметаллических полезных ископаемых и других видов сырья. При этом, если в руде содержатся минералы, имеющие магнитные свойства, то на стадии разработки схемы обогащения обязательно рассматривают возможность применения магнитного метода [8].

Магнитное обогащение основано на комбинированном действии сил – магнитных, тяжести и трения. На качество и эффективность магнитного обогащения влияют такие факторы, как размеры частиц магнитного материала, скорость подачи, толщина потока на магните, свойства балластных материалов в потоке, объем отсепарированной магнитной фракции, напряженность магнитного поля и другие [9]. Магнитная сепарация не требует затрат реагентов, но для ее проведения необходимо измельчение исходного материала до оптимального гранулометрического состава и его рассев. [10,11].

В данной работе рассматривалась методика сухой ступенчатой магнитной сепарации, исследовался образец смеси отхода углеобогащения АО ЦОФ «БЕРЕЗОВСКАЯ» БФ-4, БФ-5 (порода АО ЦОФ «Березовская» пгт. Березовский, Кузбасс).

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Цель исследования: определение магнитных свойств отходов углеобогащения АО ЦОФ «Березовская». Использовалась аппаратура: весы HR – 250 AZG, сепаратор электромагнитный валовой ЭВС-15/5. Указанные приборы должны отвечать требованиям соответствующих технических условий.

Проведение испытаний

Испытания проводились ступенчатым способом при раз-ной силе тока: 5 А, 10 А, 15 А, подаваемого на электромагнит. Масса отхода – 100 г с размером частиц 0,032 – 1 мм. Результаты магнитной сепарации приведены в *табл. 1*.

Определение элементного состава магнитной фракции отходов проведено на вакуумном волнодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре «СПЕКТРОСКАН МАКС-GVM» (производство ООО НПО «СПЕКТРОН» г. Санкт-Петербург) с напряжением на аноде рентгеновской трубки 40 кВт и мощностью рентгеновской трубки 160 Вт, предназначенном для определения содержаний химических элементов от Na до U в различных веществах. Результаты представлены в *табл. 2*.

Также для определения минералогического состава полученных образцов проводился рентгенофазовый анализ. Дифрактограммы сняты на дифрактометре Колибри фирмы Буревестник (*табл. 3, 4, 5, 6, 7, рис. 1, 2, 3, 4, 5*) с шагом около 0,02 в интервале 5-80°, 2θ с вращением 60 об./мин и выдержкой 1 с в точке. Эксперимент выполнен при стандартных условиях с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения. Напряжение на трубке – 40 кВт, ток – 30 мА. Результаты представлены в *табл. 3, 4, 5, 6, 7*, где X – массовая доля в млн⁻¹, ±Δ – погрешность измерения.

Таблица 1

Определение массовой доли отходов после ступенчатой магнитной сепарации

Determination of the waste weight fraction after stage magnetic separation

Образец	Сила тока, А	Масса фракции, г	Массовая доля фракции, ω %
Смесь отходов БФ4, БФ5	5	0,90	0,90
	10	2,85	2,82
	15	5,35	5,15

Таблица 2

Рентгенофлуоресцентный анализ смеси отходов углеобогащения

X-ray fluorescence analysis of a mixture of coal preparation wastes

Элемент	Исходник	НМ	5 А	10 А	15 А
Mg, %	1,445	1,222	1,567	1,730	1,404
Al, %	10,597	10,950	9,709	9,960	10,207
Si, %	29,906	29,950	27,805	28,605	27,926
S, %	0,047	0,045	0,061	0,050	0,043
K, %	2,756	2,556	2,494	2,562	2,464
Ca, %	0,792	0,540	1,383	1,410	1,023
Ti, %	0,523	0,460	0,457	0,452	0,461
V, %	0,011	0,010	0,012	0,011	0,010
Cr, %	0,001	0,001	0,001	0,001	-0,001
Mn, %	0,039	0,025	0,116	0,101	0,057
Fe, %	2,391	1,788	6,233	5,054	3,043
Co, %	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001
Ni, %	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003
Cu, %	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Zn, %	0,003	0,007	0,014	0,004	0,001
Sr, %	0,013	0,015	0,030	0,012	0,007
Ba, %	0,037	0,031	0,051	0,043	0,040

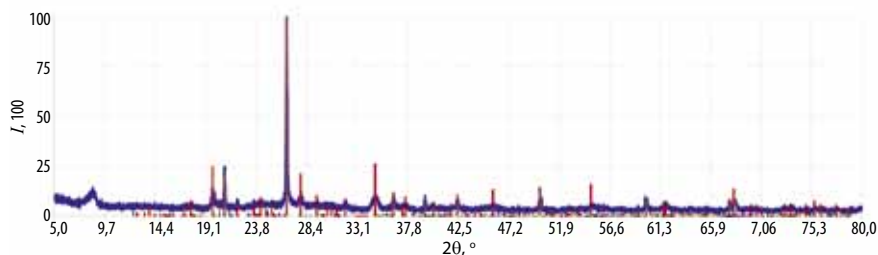


Рис. 1. Дифрактограмма валового состава исходного образца

Fig. 1. An XRD pattern of the bulk composition of the initial sample

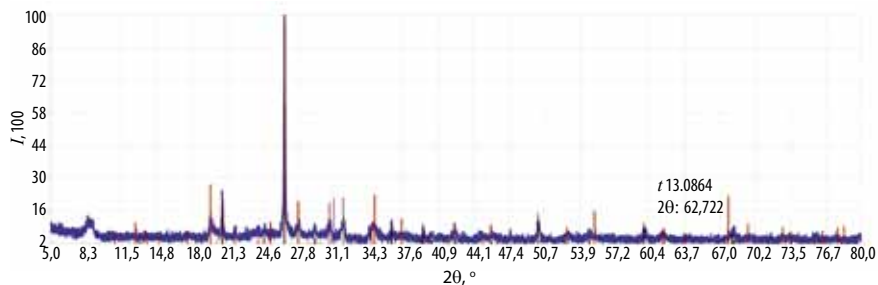


Рис. 2. Дифрактограмма валового состава образца после сепарирования при силе тока 5 А

Fig. 2. An XRD pattern of the sample's bulk composition after separation with 5A current

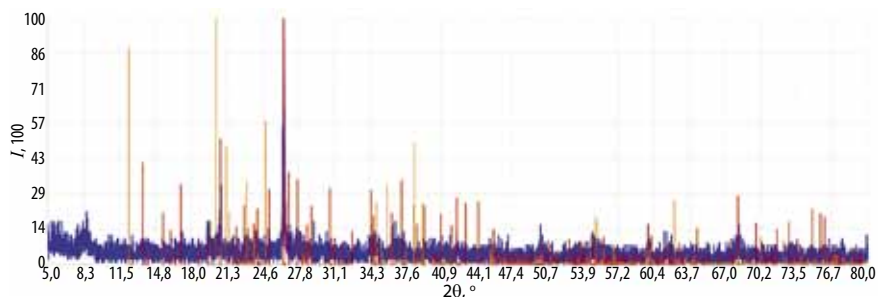


Рис. 3. Дифрактограмма валового состава образца после сепарирования при силе тока 10 А

Fig. 3. An XRD pattern of the sample's bulk composition after separation with 10A current

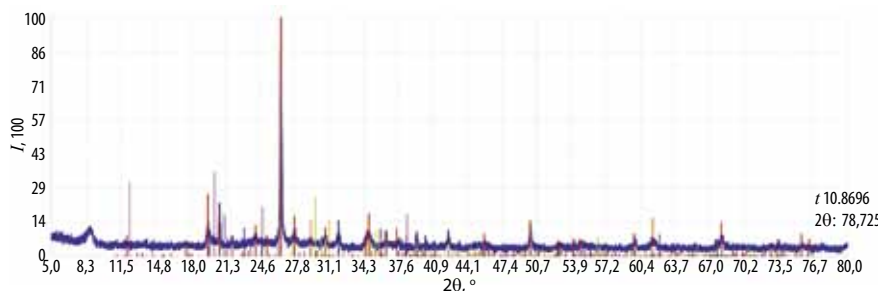


Рис. 4. Дифрактограмма валового состава образца после сепарирования при силе тока 15 А

Fig. 4. An XRD pattern of the sample's bulk composition after separation with 15A current

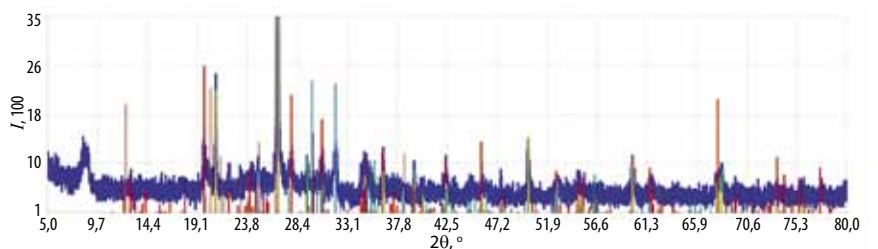


Рис. 5. Дифрактограмма валового состава немагнитного образца

Fig. 5. An XRD pattern of the bulk composition of the non-magnetic sample

Таблица 3

Результаты рентгенофазового анализа отходов углеобогащения (исходный образец)

Results of X-ray phase analysis of coal preparation waste (initial sample)

Фаза	Содержание (ω,%)
Quartz	83,75
Calcite	2,50
Siderite	6,15
Dolomite	3,67
Alunite	0,58
Augite	0,92
Kaolinite	2,43

Таблица 4

Результаты рентгенофазового анализа отходов углеобогащения (5 А)

Results of X-ray phase analysis of coal preparation waste (5 A)

Фаза	Содержание (ω,%)
Quartz	65,33
Calcite	2,72
Siderite	11,81
Dolomite	14,02
Alunite	1,60
Augite	2,56
Kaolinite	1,96

Таблица 5

Результаты рентгенофазового анализа отходов углеобогащения (10 А)

Results of X-ray phase analysis of coal preparation waste (10 A)

Фаза	Содержание (ω,%)
Quartz	49,33
Calcite	7,41
Siderite	7,27
Dolomite	7,67
Alunite	12,06
Augite	1,10
Kaolinite	15,17

Таблица 6

Результаты рентгенофазового анализа отходов углеобогащения (15 А)

Results of X-ray phase analysis of coal preparation waste (15 A)

Фаза	Содержание (ω,%)
Quartz	0,69
Calcite	след.
Siderite	след.
Dolomite	след.
Alunite	след.
Augite	след.
Kaolinite	99,07

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты рентгенофазового исследования показывают, что все образцы содержат в среднем более 50% кварца и алюмосиликатов различного состава вне зависимости от режимов магнитной сепарации, что согласуется с результатами рентгенофлуоресцентного анализа. На всех дифрактограммах присутствует характерный угол 2θ , равный $26,7^\circ$ с пиком интенсивности 3,32-3,35 Вт, который характерен для кварца, также прослеживается содержание алунита, авгита и каолинита (различные алюмосиликаты). При повышении силы тока массовое содержание каолинита составляет 99,07% и, вероятно, что железо, которое содержится в образцах, идет в связке с данным минералом в аморфной форме, и прибор не может определить его, так как рентгенофазовый не определяет аморфное состояние минералов.

Вышеуказанный фактор говорит либо о том, что алюмосиликаты находятся в агломератах с магнитными частицами (сидерит), либо из-за слишком сильного измельчения исходного сырья присутствует эффект «налипания» частиц пустой породы на магнит. Поэтому выход магнитной фракции по железу, согласно результатам рентгенофлуоресцентного анализа, составляет всего лишь 25%. Массовое содержание сидерита ($FeCO_3$), согласно рентгенофазовому анализу, в исходном отходе составляет около 6%. Данный минерал выделяется из отхода уже при $I = 5$ А, и дальнейшее повышение силы тока нецелесообразно, так как это не приводит к существенному выделению сидерита в магнитную фракцию, а скорее наэлектризовывает алюмосиликаты. Об этом говорят результаты исследования немагнитной фракции, в которой осталось достаточно много железосодержащего минерала. Ожидаемого гематита в пустой породе не обнаружено. Таким образом, магнитную фракцию необходимо выделять при силе тока 5 А, используя многократную сепарацию, увеличивая размер частиц, чтобы исключить эффект «налипания».

Список литературы • References

1. Долгосрочная программа развития угольной промышленности России на период до 2030 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1846> (дата обращения: 15.05.2024).
2. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 г. [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_144190/ (дата обращения: 15.05.2024).
3. О кондиционировании угольной шихты для коксования / В.Н. Егоров, А.В. Анисимов, Н.А. Тарасов и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. № 2. С. 18-24. Egorov V.N., Anisimov A.V., Tarasov N.A. et al. On coal charge conditioning for coking. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2007;(2):18-24. (In Russ.).
4. Исследование флотуемости углей с различной минерализацией при использовании нового реагента-собирателя / В.Н. Пе-

Таблица 7

Результаты рентгенофазового анализа отходов углеобогащения (немагнитная фракция)

Results of X-ray phase analysis of coal preparation waste (non-magnetic fraction)

Фаза	Содержание (ω,%)
Quartz	51,76
Calcite	5,51
Siderite	11,91
Dolomite	0,93
Alunite	7,55
Augite	12,20
Kaolinite	10,14

тухов, А.В. Саблин, А.А. Лавриненко и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2008. № 2. С. 31-34. Petukhov V.N., Sablin A.V., Lavrinenko A.A., Yunash A.A. Studies into flotation ability of coals with different mineralisation using a new collecting agent. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2008;(2):31-34. (In Russ.).

5. Свечникова Н.Ю., Юдина С.В., Мамедалина Н.И. Анализ отходов флотационного обогащения угля // Теория и технология металлургического производства. 2015. № 1. С.19-22. Svechnikova N.Yu., Yudina S.V., Mamedalina N.I. Analysis of flotation waste coal. *Teoriya i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2015;(1):19-22. (In Russ.).

6. Кизильштейн Л.Я., Дубов Н.В., Шпицглюз А.Л. Компоненты зол и шлаков ТЭС. М.: Энергоатомиздат, 1995. 176 с.

7. Панишев Н.В., Бигеев В.А., Галиулина Е.С. Перспективы утилизации хвостов углеобогащения и твердых отходов тепловых электростанций // Ресурсо- и энергосберегающие технологии в черной металлургии. 2015. № 2. С. 69-77. Panishev N.V., Bigeev V.A., Galiulina E.S. Perspectives of utilization of coal enrichment as well as thermoelectric plants wastes. *Resurso-i energosberegaiushchie tekhnologii v chernoi metallurgii*. 2015;(2):69-77. (In Russ.).

8. Пелевин А.Е. Магнитные и электрические методы обогащения. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2018. 296 с.

9. Кармазин В.В., Кармазин В.И. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. Т. 1. М.: Изд-во Моск. гос. горного ун-та, 2005. 669 с.

10. Портной К.И., Тимофеева Н.И. Кислородные соединения РЗМ. Справочник. М: Металлургия, 1986. 480 с.

11. Еремин Н.И. Неметаллические полезные ископаемые. М.: Изд-во МГУ; ИКЦ «Академкнига», 2007. 459 с.

Authors Information

Cherkasova T.G. – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Science director of the Institute of Chemical and Oil and Gas Technologies of the T.F. Gorbachev State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: ctg.htnv@kuzstu.ru

Pilin M.O. – Senior lecturer of the Institute of Chemical and Oil and Gas Technologies of the T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: pilinmo@kuzstu.ru

Tikhomirova A.V. – PhD (Chemistry), Associate Professor, Associate Professor of the Institute of Chemical and Oil and Gas Technologies of the T.F. Gorbachev State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: tav.htnv@kuzstu.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 2.05.2024
 Поступила после рецензирования: 16.05.2024
 Принята к публикации: 26.05.2024

Paper info

Received May 2, 2024
 Reviewed May 16, 2024
 Accepted May 26, 2024