

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

Научная статья

УДК 62-665.4:621.928.89

DOI: 10.26730/1999-4125-2024-5-50-56

**ЗАВИСИМОСТЬ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ
ОТ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА****Черкасова Татьяна Григорьевна, Пилин Максим Олегович,
Тихомирова Анастасия Владимировна**

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

*для корреспонденции: ctg.htnv@kuzstu.ru

Аннотация.

Магнитная сепарация – эффективный метод переработки отходов углеобогащения. Проблема переработки отходов углеобогащения является актуальной задачей для современной горнодобывающей промышленности. Комплексная переработка, предполагающая полное использование отходов, становится все более востребованной. При этом отходы углеобогащения следует рассматривать как бедные руды, поскольку они содержат ценные компоненты в небольших количествах. Один из наиболее эффективных методов выделения железосодержащих компонентов из отходов углеобогащения – это магнитная сепарация. Этот метод широко применяется в горнодобывающей отрасли для обогащения различных руд, как металлических, так и неметаллических. В данной работе исследуется возможность применения магнитной сепарации для переработки отходов углеобогащения АО ЦОФ «БЕРЕЗОВСКАЯ» БФ-4, БФ-5.

Для проведения испытаний использовался сепаратор электромагнитного валового ЭВС-15/5, предназначенный для слабомагнитных руд. Эксперименты проводились при различной силе тока: 5А, 10А, 15А. В результате проведенных исследований, выполненных с помощью рентгенофлуоресцентного анализа на вакуумном волнодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре «СПЕКТРОСКАН МАКС-GVM», сделан вывод о том, что магнитная сепарация эффективно выделяет железосодержащие компоненты из отходов углеобогащения. Оптимальный режим переработки включает в себя: измельчение отходов углеобогащения до размера 0,032 мм; магнитную сепарацию при силе тока 10А. Данные исследования показывают, что магнитная сепарация позволяет эффективно выделять железосодержащие компоненты из отходов углеобогащения. Оптимальный режим переработки зависит от конкретного типа отходов. Применение магнитной сепарации позволяет повысить экономическую эффективность переработки отходов углеобогащения, так как позволяет извлечь ценные компоненты и снизить количество отходов, направляемых на захоронение. Дополнительные преимущества магнитной сепарации: экологическая чистота – метод не требует использования химических реагентов; высокая эффективность – позволяет извлечь значительную часть ценных компонентов; относительная простота в реализации. Таким образом, магнитная сепарация является эффективным и экологически чистым методом переработки отходов углеобогащения, позволяющим извлечь ценные компоненты и снизить

**Информация о статье**

Поступила:

19 июля 2024 г.

Одобрена после
рецензирования:

29 сентября 2024 г.

Принята к публикации:

10 октября 2024 г.

Опубликована:

24 октября 2024 г.

Ключевые слова:

угольные отходы, магнитная сепарация, углеобогащение, отходы

количество отходов, направляемых на захоронение.

Для цитирования: Черкасова Т.Г., Пилин М.О., Тихомирова А.В. Зависимость магнитных свойств отходов углеобогащения от гранулометрического состава // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 5 (165). С. 50-56. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-5-50-56, EDN: TYAJKI

Введение

В условиях непрерывного роста технического уровня угольной промышленности, механизации основных и вспомогательных процессов при добыче углей и ухудшении качества добываемой горной массы обогащение является обязательной стадией в производстве топлива, удовлетворяющего по своему качеству требованиям потребителей.

Особое значение приобретает углеобогащение в связи с развитием рыночных отношений, когда получают непосредственное экономическое выражение не только потребительская ценность угольных концентратов, но и полнота извлечения полезных компонентов в товарные продукты при минимальных материальных издержках на их получение.

Возросшее засорение добываемых углей породными фракциями обуславливает необходимость увеличения объема обогащения путем строительства новых фабрик, повышения мощности и технического перевооружения действующих предприятий и применения прогрессивных процессов, высокопроизводительных и эффективных аппаратов, позволяющих сократить потери горючей массы в отходах производства [1].

В большинстве своем техногенные отходы горнодобывающей промышленности – комплексные, содержат полезные и попутные компоненты, которые могут извлекаться в товарную продукцию. Запасы хвостов могут пополняться, если источником их является действующее предприятие (горно-обогатительный комбинат (ГОК), металлургический завод, ТЭС). Кроме того, требования охраны окружающей среды стимулируют необходимость освоения и утилизации техногенных образований. 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 [2–5]. 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 в том, 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) [6,7]. 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.) [5] 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.

Таблица 1. Элементный состав магнитной фракции образцов отходов углеобогащения
Table 1. The elemental composition of the magnetic fraction of carbon enrichment waste samples

Наим. образца	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Ni	Pb
М 0,2-5А	1,46	3,72	8,94	0,04	0,59	2,90	0,16	0,47	24,75	0,002	0,04
М 0,2-10А	1,48	4,37	10,45	0,04	0,74	3,19	0,21	0,40	21,16	0,003	0,03
М 0,2-15А	1,77	5,25	12,16	0,06	0,89	3,33	0,25	0,37	19,07	0,003	0,02
М 0,14-5А	0,93	4,39	9,58	0,04	0,65	2,39	0,21	0,34	19,39	0,005	0,04
М 0,14-10А	1,72	5,63	13,15	0,05	0,90	4,17	0,28	0,33	17,63	0,005	0,04
М 0,14-15А	1,77	6,58	15,33	0,05	1,06	4,25	0,32	0,25	14,29	0,003	0,03
М 0,032-5А	1,56	2,70	6,57	0,03	0,37	3,06	0,09	0,69	35,82	0,004	0,15
М 0,032-10А	1,72	3,37	7,94	0,04	0,50	3,42	0,13	0,54	28,39	0,002	0,09
М 0,032-15А	1,65	4,93	11,76	0,05	0,72	3,38	0,22	0,38	21,58	0,002	0,02

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 [7-9].

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 [11-17]. Магнитная сепарация не требует затрат реагентов, но для ее проведения необходимо измельчение исходного материала до оптимального гранулометрического состава и его рассев [9-15].

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

Метод испытаний

Объектом данного исследования являлись отходы углеобогащения АО «ЦОФ Березовская», г. Березовский.

Для исследования проводился отбор пробы, разной по гранулометрическому составу фракции – 0,032 мм, 0,14мм, 0,2 мм. Методом квартования отбиралось 100 г. исследуемого образца. Далее проводилось магнитное сепарирование на электромагнитном валовом сепараторе ЭВС-15/5 для слабомагнитных руд

при разной силе тока: 5А, 10А, 15А, подаваемого на электромагнит.

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 Таблице 1.

Обсуждение результатов

Оптимизация процесса магнитной сепарации отходов углеобогащения: анализ результатов и рекомендации.

Проведенные исследования по извлечению железосодержащих компонентов из отходов углеобогащения методом магнитной сепарации позволили получить ценные данные, которые помогут оптимизировать этот процесс. Таблица 1, отражающая результаты эксперимента, демонстрирует, что наибольшее извлечение железа наблюдается во фракции размером 0,032 мм при силе тока 5А. Это ключевой вывод, указывающий на оптимальную комбинацию параметров для максимального выделения железосодержащих компонентов. Примечательно, что данные по извлечению ферромагнитных минералов коррелируют с данными по никелю, другому ферромагнетику, что подтверждает эффективность выбранного метода для обоих металлов.

Анализируя результаты по другим фракциям (0,2 мм и 0,14 мм), можно заметить, что лучшие результаты также достигаются при минимальной силе тока, что свидетельствует о том, что

увеличение силы тока не всегда способствует повышению эффективности процесса. Наличие кремния и алюминия (алюмосиликатов) в магнитной фракции может быть обусловлено несколькими факторами. Для частиц размером 0,14–0,2 мм, возможно, наблюдается образование сростков минералов, включающих в себя не только железо, но и кремний с алюминием. С увеличением силы тока, возможно, происходит электростатическая активация частиц, это приводит к «налипанию» алюмосиликатов на магнитные частицы, что впоследствии приводит к их извлечению. Таким образом, рекомендуемым режимом магнитной сепарации отходов углеобогащения, исходя из результатов рентгенофлуоресцентного анализа, является измельчение материала до размера 0,032 мм с последующей сепарацией при силе тока 5А. Дальнейшее повышение силы тока нецелесообразно, так как это приведет к извлечению сопутствующих нежелательных примесей (пустой породы), снижая чистоту получаемого железа[18].

Важно отметить:

Различия в эффективности извлечения железа для разных фракций подчеркивают важность предварительного измельчения отходов до оптимального размера. Результаты показывают, что увеличение силы тока не всегда приводит к повышению эффективности извлечения железа, а может, наоборот, привести к извлечению нежелательных примесей. Для достижения наилучших результатов, возможно, потребуется комбинирование магнитной сепарации с другими методами обогащения, например, флотацией или гравитационным обогащением.

Основные результаты и выводы

1. Размер частиц 0,032 мм и сила тока 5А являются оптимальными для максимального извлечения железосодержащих минералов.

2. Измельчение материала до оптимального размера является ключевым фактором для достижения максимальной эффективности процесса.

3. Дополнительные исследования, направленные на изучение влияния других факторов, таких как тип магнитного поля, скорость потока материала и др., позволят еще больше оптимизировать процесс магнитной сепарации отходов углеобогащения.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чантурия В. А., Моляк А. Р. Техника и технология обогащения углей. Справочное руководство. Изд. 3-е, перераб. и доп. М. : Наука, 1995. 622 с.

2. Егоров В. Н., Анисимов А. В., Тарасов Н. А. [и др.] О кондиционировании угольной шихты для коксования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Носова Г. И. 2007. № 2(18). С.18–24.

3. Петухов В. Н., Саблин А. В., Лавриненко А. А., Юнаш А. А. Исследование флотуемости углей с различной минерализацией при использовании нового реагента-собирателя // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2008. № 2(22). С. 31–34.

4. Свечникова Н. Ю., Юдина С. В., Мамедалина Н. И. Анализ отходов флотационного обогащения угля // Теория и технология металлургического производства. 2015. № 1(16). С.19–22.

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

6. Панишев Н. В., Бигеев В. А., Галиулина Е. С. Перспективы утилизации хвостов углеобогащения и твердых отходов тепловых электростанций // Ресурс- и энергосберегающие технологии в черной металлургии. 2015. № 2(17). С. 69–77.

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

8. 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.

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

10. Еремин Н. И. Неметаллические полезные ископаемые. 2е изд., испр. и доп. М. : Изд-во МГУ; ИКЦ «Академкнига», 2007. 459 с.

11. Штольц А. К., Медведев А. И., Курбатов Л. В. Рентгеновский фазовый анализ. Методические указания к лабораторным работам по курсам «Физика твердого тела», «Материаловедение» и «Физические методы исследования материалов» для студентов дневной формы обучения физико-технического факультета. Екатеринбург, 2005. 24 с.

12. Ma X., Marques M., Gontijo C. Comparative studies of reverse cationic/anionic flotation of vale iron ore // International Journal of Mineral Processing. 2011.

13. De Mesquita I. M. S., Lins F. F., Torem M. I. Interaction of a hydrophobic bacterium strain in a hematite-quartz flotation system // International Journal of Mineral Processing. 2003. Vol. 71. № 1–4.

14. Mei G. J., Rao P., and Yu Y. F. Flotation separation of hematite and iron containing silicate using ammonium hexafluorosilicate depressant // Proceedings of XXIV International Mineral Processing

Congress, Science Press, Beijing. 2008. Vol. 1.

15. Yang H., Tang Q., Wang Ch., Zhang J. Flocculation and flotation response of Rhodococcus erythropolis to pure minerals in hematite ores // Minerals Engineering. 2013. Vol. 45.

16. Widy Rosita, I Made Bendiyasa, Indra Perdana, Ferian Anggara. Sequential particle-size and magnetic separation for enrichment of rareearth elements and yttrium in Indonesia coal fly ash // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2020. № 8. С. 1–10.

17. Jinhe Pan, Tiancheng Nie, Behzad Vaziri Hassas, Mohammad Rezaee, Zhiping Wen. Changchun Zhou Recovery of rare earth elements from coal fly ash by integrated physical separation and acid leaching // Chemosphere. 2020. № 248. С. 1–9.

18. Черкасова Т. Г., Пилин М. О., Тихомирова А. В. Влияние гранулометрического состава на магнитные свойства отходов углеобогащения АО ЦОФ «Березовская» // Уголь. 2024. №7. С. 38–41. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-7-38-41.

© 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

Пилин Максим Олегович – аспирант гр.НХа-241, старший преподаватель Института химических и нефтегазовых технологий ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», e-mail: pilinmo@kuzstu.ru

Тихомирова Анастасия Владимировна – кандидат химических наук, доцент, доцент Института химических и нефтегазовых технологий ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», e-mail: tav.htnv@kuzstu.ru

Заявленный вклад авторов:

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

Пилин Максим Олегович – концептуализация исследования, обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных, написание текста.

Тихомирова Анастасия Владимировна – обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DEPENDENCE OF THE MAGNETIC PROPERTIES OF CARBON ENRICHMENT WASTE ON THE GRANULOMETRIC COMPOSITION

Tatiana G. Cherkasova, Maxim O. Pilin, Anastasia V. Tikhomirova

T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

*for correspondence: ctg.htnv@kuzstu.ru



Article info

Received:

19 July 2024

Accepted for publication:

29 September 2024

Accepted:

Abstract.

Magnetic separation is an effective method of processing coal beneficiation waste. The problem of processing coal beneficiation waste is a pressing issue for the modern mining industry. Complex processing, which involves the full use of waste, is becoming increasingly popular. At the same time, coal beneficiation waste should be considered as poor ores, since it contains valuable components in small quantities. One of the most effective methods for extracting iron-containing components from coal beneficiation waste is magnetic separation. This method is widely used in the mining industry for the enrichment of various ores, both metallic and non-metallic. In this paper, we study the possibility of using magnetic separation for processing coal

10 October 2024

Published:

24 October 2024

Keywords: coal waste, magnetic separation, carbon enrichment, waste.

beneficiation waste of JSC TsOF "BEREZOVSKAYA" BF-4, BF-5. The tests were carried out using the EVS-15/5 electromagnetic gross separator designed for weakly magnetic ores. The experiments were carried out at different current strengths: 5A, 10A, 15A. As a result of the studies carried out using X-ray fluorescence analysis on the vacuum wave-dispersive X-ray fluorescence spectrometer "SPECTROSCAN MAX-GVM", it was concluded that magnetic separation effectively extracts iron-containing components from coal washing waste. The optimal processing mode includes: Grinding coal washing waste to a size of 0.032 mm. Magnetic separation at a current of 10 A. Research data show that: Magnetic separation allows for the effective extraction of iron-containing components from coal washing waste. The optimal processing mode depends on the specific type of waste. The use of magnetic separation allows for increasing the economic efficiency of coal washing waste processing, as it allows for the extraction of valuable components and the reduction of the amount of waste sent for disposal. Additional advantages of magnetic separation: Environmental friendliness - the method does not require the use of chemical reagents. High efficiency - allows for the extraction of a significant portion of valuable components. Relative simplicity in implementation. Thus, magnetic separation is an effective and environmentally friendly method of processing coal enrichment waste, allowing extracting valuable components and reducing the amount of waste sent to burial.

For citation: Cherkasova T.G., Pilin M.O., Tikhomirova A.V. Dependence of the magnetic properties of carbon enrichment waste on the granulometric composition. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024; 5(165):50-56. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-5-50-56, EDN: TYAJKI

REFERENCES

1. Chanturiya V.A., Molyavko A.R. *Texnika i texnologiya obogashheniya uglej. Spravochnoe rukovodstvo. Izd. 3-e, pererab. i dop. M.: Nauka; 1995. 622 s.*
2. Egorov V.N., Anisimov A.V., Tarasov N.A. [i dr.] *O konditsionirovanii ugol'noi shikhthy dlia koksovaniia. Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova. 2007; 2(18):18–24.*
3. Petukhov V.N., Sablin A.V., Lavrinenko A.A., Iunash A.A. *Issledovanie flotiruemostiuglei s razlichnoi mineralizatsiei pri ispol'zovanii novogo reagentasobiratel'ia. Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova. 2008; 2(22):31–34.*
4. Svechnikova N.Iu., Iudina S.V., Mamedalina N.I. *Analiz otkhodov flotatsionnogo obogashcheniia uglia. Teoriia i tekhnologiia metallurgicheskogo proizvodstva. 2015; 1(16):19–22.*
5. Kizil'shtein L.Ia., Dubov N.V., Shpitsgluz A.L. *Komponenty zol i shlakov TES. Moskva: Energoatomizdat; 1995. 176 p.*
6. Panishev N.V., Bigeev V.A., Galiulina E.S. *Perspektivy utilizatsii khvostov ugleobogashcheniia i tverdykh otkhodov teplovykh elektrostantsii. Resurso- i energosbe-regaiushchie tekhnologii v chernoi metallurgii. 2015; 2(17):69–77.*
7. Pelevin A.E. *Magnitnye i elektricheskie metody obogashcheniia. Ekaterinburg: Izd-vo UGGU; 2018. 296 p.*
8. Karmazin V.V., Karmazin V.I. *Magnitnye, elektricheskie i spetsial'nye metody obogashcheniia poleznykh iskopaemykh. T. 1. Moskva: Izd-vo Mosk. gos. gornogo un-ta; 2005. 669 p.*
9. Portnoi K.I., Timofeeva N.I. *Kislorodnye soedineniia RZM. Spravochnik. M: Metallurgii, 1986. 480 p.*
10. Eremin N.I. *Nemetallicheskie poleznye iskopaemye. 2e izd., ispr. i dop. Moskva: Izd-vo MGU; IKTS «Akademkniga»; 2007. 459 p.*
11. Shtol'cz, A. K., Medvedev, A. I., Kurbatov, L. V. *Rentgenovskij fazovyj analiz. Metodicheskie ukazaniya k laboratorny'm rabotam po kursam «Fizika tverdogo tela», «Materialovedenie» i «Fizicheskie metody issledovaniya materialov» dlya studentov dnevnoj formy obucheniya fiziko-tekhnicheskogo fakul'teta. Ekaterinburg, 2005.*
12. Ma X., Marques M., Gontijo C. *Comparative studies of reverse cationic/anionic flotation of vale iron ore. International Journal of Mineral Processing. 2011.*
13. De Mesquita IM. S., Lins F.F., Torem M.I. *Interaction of a hydrophobic bacterium strain in a hematite-quartz flotation system. International Journal of Mineral Processing. 2003; 71:1–4.*
14. Mei G.J., Rao P., Yu Y.F. *Flotation separation of hematite and iron containing silicate using ammonium hexafluorosilicate depressant. Proceedings of XXIV International Mineral Processing Congress, Science Press, Beijing. 2008; 1.*
15. Yang H., Tang Q., Wang Ch., Zhang J. *Flocculation and flotation response of Rhodococcus*

erythropolis to pure minerals in hematite ores. *Minerals Engineering*. 2013; 45.

16. Widya Rosita, I Made Bendiyasa, Indra Perdana, Ferian Anggara. Sequential particle-size and magnetic separation for enrichment of rareearth elements and yttrium in Indonesia coal fly ash. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2020; 8:1–10.

17. Jinhe Pan, Tiancheng Nie, Behzad Vaziri Hassas, Mohammad Rezaee, Zhiping Wen, Changchun

Zhou. Recovery of rare earth elements from coal fly ash by integrated physical separation and acid leaching. *Chemosphere*. 2020; 248:1–9.

18. Cherkasova T.G., Pilin M.O., Tikhomirova A.V., Belov R.A. Effects of particle size distribution on the magnetic properties of coal preparation wastes of Berezovskaya Central Processing Plant. *Ugol'*. 2024;(7):38-41. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-7-38-41.

© 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 – Dr. Sc. in Chemistry, Professor, Science director 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

Maxim O. Pilin – postgraduate, senior lecturer, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, e-mail: pilinmo@kuzstu.ru

Anastasia V. Tikhomirova – C. Sc. in Chemistry, Associate Professor, Associate Professor of the Institute of Chemical and Oil and Gas Technologies of the T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, e-mail: tav.htnv@kuzstu.ru

Contribution of the authors:

Tatiana G. Cherkasova – formulation of a research task, scientific management, conceptualization of research, conclusions.

Maxim O. Pilin – conceptualization of research, review of relevant literature, collection and analysis of data, writing a text.

Anastasia V. Tikhomirova – review of relevant literature, data collection and analysis.

All authors have read and approved the final manuscript.

