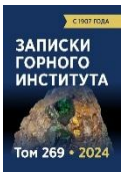
ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Исследование и обоснование комбинации процессов обогащения для получения чешуйчатого графита из техногенных углеродсодержащих пылей

Н.Н.Орехова✉, Н.В.Фадеева, Е.Н.Мусаткина
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова, Магнитогорск, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Орехова Н.Н., Фадеева Н.В., Мусаткина Е.Н. Исследование и обоснование комбинации процессов обогащения для получения чешуйчатого графита из техногенных углеродсодержащих пылей // Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 777-788. EDN UNUYXS

Аннотация. Важнейшая задача современного развития производства – обеспечение минерально-сырьевого сектора экономики ресурсами, входящими в перечень стратегического сырья, к числу которых относится чешуйчатый графит. Кроме природного сырья, источником его получения могут быть отходы металлургического производства, не вовлеченные в переработку. Разработка технологии обогащения металлургических пылей решит задачу получения высокочистого чешуйчатого графита с кристаллическим строением, близким к идеальному, и востребованному в сферах производства высокотехнологичных материалов. Позволит создать возобновляемую сырьевую базу графита и утилизировать отходы металлургического производства. Исследования включали изучение обогатимости пылей по крупности, магнитным и флотационным методами, влияния на показатели обогащения процессов дезинтеграции пыли. Исходя из установленных технологических свойств компонентов, входящих в состав пылей, для их разделения могут быть применены магнитный, флотационный и гравитационный методы обогащения в различной последовательности. Показано, что пыли различных участков имеют разную обогатимость данными методами, и это необходимо учитывать при разработке комплексной технологии их переработки. Степень обогатимости возрастает в ряду пылей доменного цеха (ДЦ) – электросталеплавильного цеха (ЭСПЦ) – кислородно-конвертерного цеха (ККЦ). На показатели разделения существенное влияние оказывает способ измельчения – при сухом помоле в центробежно-ударной мельнице с последующей пневмоклассификацией качество графитовых концентратов повышается на 22,7 % углерода для пыли ДЦ и на 13,48 % углерода для пыли ЭСПЦ. Показатели обогащения пыли ККЦ высокие при грубом измельчении стальной средой – массовая доля углерода 96,1 %.

***Ключевые слова*:** чешуйчатый графит; железографитовая пыль; дисперсный состав; вещественный состав; способ дезинтеграции; центробежно-ударная мельница; пневмоклассификация; магнитная сепарация; флотация; содержание углерода

Поступила: 24.04.2024 ***Принята: 24.09.2024*** ***Онлайн: 12.11.2024*** ***Опубликована: 12.11.2024***

Введение. Истощение минерально-сырьевой базы стратегических руд является реальным вызовом для российской экономики и стимулирует исследования по разработке технологических решений по вовлечению в переработку сложного, бедного и нетрадиционного минерального сырья [1, 2]. К 2025 г. ожидается существенное, более 700 %, увеличение мирового спроса на графит [3], связанное с глобальным переходом на экологически чистые источники энергии и использованием электромобилей [4]. Растущий спрос на минеральные графитовые ресурсы потребует значительных запасов качественного сырья. Наиболее ценным графитовым сырьем, идущим на производство сферического графита для литий-ионных аккумуляторных батарей и графита для суперкомпозитов, является чешуйчатый крупнокристаллический графит [5]. Доля такого сырья в общих запасах графитовых руд на территории России невелика [6] и требует значительных инвестиций в разведку новых месторождений и освоение разведанных запасов. Становится перспективной разработка технологий получения высокочистого чешуйчатого графита из металлургических пылей, которая позволит получить по сути постоянно возобновляемый источник ценного, высококачественного графита, имеющего кристаллическую решетку, близкую к идеальной, и кроме ресурсного вопроса решить экологические проблемы металлургического производства.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Ежегодное образование графитизированных пылей на металлургических предприятиях Урала оценивается в 10^5 т [7] и связано с переделом чугуна в сталь. Выход дисперсных железографитовых отходов составляет до 600 г/т чугуна [8]. Графит образуется при охлаждении чугуна в результате роста графитовых включений за счет атомов углерода аустенита или в результате прямого распада цементита [9]. Поскольку графитовая пыль не смачивается металлом, она подхватывается с его поверхности конвективным потоком воздуха и уносится. В типичных графитовых пылях доменного передела содержится углерод 15-25 мас.%, железо 25-50 мас.% и цинк 1-5 мас.% [10], в конвертерной пыли – углерод от 27,99 мас.% [9], а в пылях от плавки электродуговой печи – железо 30-45 мас.%, цинк 3-17 мас.% и свинец 1-7 мас.%. По сравнению с содержанием углерода в отечественных месторождениях чешуйчатого графита, графитовые пыли металлургического производства оказываются более богатым источником.

На протяжении последнего десятилетия наиболее значимые исследования металлургических графитизированных спелей проводились в Донецком национальном университете. Значительная часть из них – на пылях миксерного отделения конвертерного цеха металлургического комбината «Азовсталь». Изучались минералого-структурные особенности пылей [11-13], условия снижения выброса графита [14, 15], экологические проблемы [16], возможности получения чешуйчатого графита [11] и термографенита с магнитными свойствами [17].

Наиболее комплексные исследования металлургических графитизированных пылей проводятся в Китае, где производственные мощности образования киш-графита (КГ) относительно велики [18]. Киш-графит в Китае не используется эффективно, что приводит к колоссальным растратам ресурсов и загрязнению окружающей среды. Переработка и утилизация КГ привлекают все большее внимание исследователей. Исследования показали, что КГ имеет множество применений. Авторы статьи [19] получили хлопья КГ с содержанием углерода 97 % с помощью процесса просеивания, флотации, дробления, магнитной сепарации и травления соляной кислотой. Хлопья КГ были использованы для успешного получения графена в условиях микроволнового облучения. В работах [20, 21] извлекали хлопья КГ высокой чистоты с помощью интегрированного процесса разделения воздуха, флотации, ультразвука и магнитной сепарации, а приготовленный вспученный графит на основе КГ продемонстрировал превосходные адсорбционные свойства по отношению к маслу. В статье [18] КГ обогащали и очищали с помощью комплексных процессов сепарации, включая промывку водой, удаление пыли, магнитную сепарацию и кислотное выщелачивание. Этот продукт может быть использован в качестве катодного материала алюминиево-ионного аккумулятора [22]. С помощью механохимического шарового измельчения получен йодированый КГ, который продемонстрировал отличную электрокаталитическую активность для реакции восстановления кислорода [23]. Исследовав доменную пыль, КГ с высокой степенью графитизации, комплексной переработкой флотационно-кислотным выщелачиванием извлекли с малым размером частиц и получили графит чистотой 95,00 % [21]. Однако получение КГ с высоким содержанием углерода (>99,00 %) остается серьезной проблемой.

Для химического обогащения графитового концентрата с зольностью 10-14 %, полученного из графитсодержащей пыли Криворожского металлургического комбината, применен термохимический способ доводки концентратов флотации [24]. Полученный продукт имеет зольность до 1 %. Таким образом, комбинация различных методов рудоподготовки и обогащения – ключевой аспект процесса обогащения техногенного графитсодержащего сырья. Цель исследования – установление закономерностей разделения железографитовой пыли различных участков металлургического производства методами обогащения и определения их рациональной комбинации для получения чешуйчатого графита.

Методы. Исследовалась железографитовая пыль, отобранная на различных участках образования на металлургическом предприятии с полным циклом переработки железорудного сырья в сталь: в доменном (ДЦ), кислородно-конвертерном (ККЦ) и электросталеплавильном (ЭСПЦ) цехах. Отобранные пробы имеют визуальные отличия и отличия в вещественном и дисперсном составах, установленные методами ситового и лазерного гранулометрического анализа (Mastersizer 2000), магнитного анализа по классам крупности (ручным магнитом напряженностью 42,8 кА/м), распределения углерода по классам крупности (на анализаторе CS-144DR), оптическим анализом (установка Минерал С7 SIAMS Photolab в отраженном свете), химическим анализом,

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 777-788
© Н.Н.Орехова, Н.В.Фадеева, Е.Н.Мусаткина, 2024

электронной микроскопии (сканирующим электронным микроскопом (СЭМ) JEOL JSM-6490 LV во вторичных электронах), рентгенофазового (с использованием специальной приставки к СЭМ – энергодисперсионного спектрометра INCA Energy) и рентгеноспектрального анализов (дифрактометр XRD-7000 (Shimadzu)) [25]. Сравнительная характеристика отобранных проб представлена в табл.1, 2. На рис.1 приведены характеристики крупности исследуемых пылей и распределение в них частиц по размерам, определенные методом лазерной дифракции. Оптическое изучение проб показало, что частицы графита имеют плоскую неправильную округлую или близкую к гексагональной форму, с неровными или прямыми краями. Графитовые частицы с ровной, до зеркально-чистой, поверхностью встречаются редко. Поверхность большинства частиц содержит значительное количество сферических включений от мельчайших до достаточно крупных. Также имеются чешуйки, в структуру пластин которых включены сферические частицы. Кроме плоских частиц графита и сферических железосодержащих частиц имеется незначительное количество частиц неправильной формы преимущественно силикатного состава.

Исходя из технологических свойств компонентов, входящих в состав пылей, и материалов различных обзоров по методам обогащения графитизированного сырья [21, 23, 24] наиболее часто для разделения руд и пылей, содержащих графит, используют магнитную сепарацию, воздушную и гидравлическую классификацию и флотацию. Несмотря на высокую естественную гидрофобность крупночешуйчатого графита, для улучшения процесса флотации, повышения массовой доли и извлечения углерода используют коллектор (керосин) и пенообразователь (МИБК) [26-28]. Электрофлотацию применяют для поднятия в пену сверхтонкого графита, ультразвуковую флотацию – для одновременной очистки поверхности чешуек [4]. Указывается на различие флотации чешуек крупностью менее и более 150 мкм. Подчеркивается, что крупные частицы чешуйчатого графита плохо флотируются после повреждения их структуры и при переработке важно отделить крупные от мелких хлопьев. Но с флотацией мелкодисперсного графита связан ряд проблем, в том числе высокий расход коллектора и унос. Для классификации КГ после операции дезинтеграции перед флотацией применяется гидравлическая классификация, которая может быть не только подготовительной, но и обогатительной операцией. Классификация приводит к появлению дополнительных эффектов, способствующих обогащению графита. Отмечается, что частицы графита менее 150 мкм после гидравлической классификации потребляют на 34 % меньше кислоты в процессе выщелачивания [4].

Таблица 1

Вещественный состав исследуемых проб и технологические свойства компонентов пыли

Характеристика проб	Участки отбора проб		
	ДЦ (2022 г.)	ККЦ	ЭСПЦ
Цвет	Буровато-черный	Блестящий, графитово-черный	Блестящий, графитово-черный
Химический состав, мас.%			
Углерод	10,17	>30,0 (32,09)	>30,0 (38,05)
Железо	62,9	46,8	53,9
Вредные примеси (P, S, Zn)	0,036, 0,178, 0,119	<0,005, 0,041, 0,026	<0,005, 0,042, 0,027
ПМПП	10,4	31,0	30,3
Содержание сильномагнитной фракции, %	91,06	58,04	46,86
Минеральный состав железокислородных включений	Магнетит, гематит, графит	Графит, магнетит	Графит, вюстит
Гранулометрический состав			
D_{max}, мм	6-8	12-15	8-10
Класс –0,071 мм, %	50,6	11,7	18,1
Элементарная ячейка графита			
Идеальная: a = 2,4612, c = 6,7079, z = 4	a = 2,456, c = 10,044, z = 6	a = 2,462, c = 6,711, z = 4	a = 2,465, c = 6,721, z = 4
Тип кристаллической решетки	Нецентросимметричная ромбическая	Центросимметричная гексагональная и ромбическая	Центросимметричная гексагональная
Доля ромбического графита	>	>	>

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 2

Справочные свойства минералов

Минералы	Плотность, г/см^3	Удельная магнитная восприимчивость, 10^{-6} см^3/г	Удельное сопротивление, Ом/см	Флотационные свойства по М.А.Эйгелесу
Графит	2,08-2,23	От –2 до –10	$0{,}5\cdot10^{-4}$-$0{,}5\cdot10^{-2}$	Высокая природная гидрофобность
Магнетит	5,0-5,2	>20000, ферримагнетик	$0{,}5\cdot10^{-2}$-$0{,}5\cdot10^{-1}$	Флотируются собирателями катионного типа, карбоновыми кислотами и мылами; иногда необходима активация
Гематит	4,9-5,3	70-300	$0{,}5\cdot10$-$1\cdot10^{3}$	
Вюстит	5,88-5,97	Антиферромагнетик [29]		

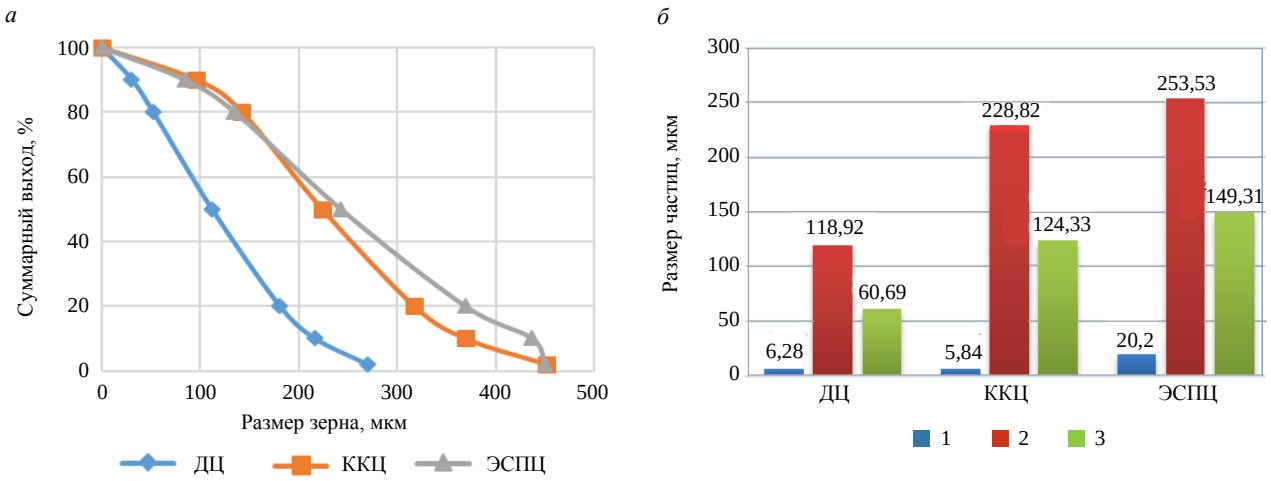


Рис.1. Характеристики крупности по результатам анализа на лазерном анализаторе:
а – суммарная характеристика крупности; *б* – числовые характеристики распределения частиц по размерам
1 – средний арифметический диаметр; 2 –средневзвешенный диаметр на массу и объем – средний диаметр Де Брукера;
3 – средневзвешенный диаметр на площадь поверхности – средний диаметр Саутера

Электросепарация, которая основана на разнице приобретенного заряда частицами с различной проводимостью и диэлектрическими свойствами в результате трения или в поле коронного разряда, применяется редко. Поскольку статическое электричество прямо пропорционально величине заряда поверхности частицы и напряженности силового поля, оно оказывает более существенное воздействие на тонкие легкие частицы графита в форме чипов (тонких пластин прямоугольной формы площадью от долей до нескольких квадратных сантиметров). Следовательно, частицы могут быть эффективно разделены [30].

Исследования на обогатимость проб различными методами осуществлялись в лабораториях рудоподготовки и обогащения полезных ископаемых Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И.Носова и на экспериментальном участке ЗАО «УралОмега» с измельчительным комплексом КИ-0,36. Программа включала изучение процессов дезинтеграции пыли, динамической пневмоклассификации, магнитной сепарации и пенной флотации пыли, измельченной в различных условиях и до различной крупности. Измельчение пыли осуществлялось в шаровых металлических и фарфоровых мельницах на рольганге и в центробежных мельницах измельчительного комплекса КИ-0,36 (ЗАО «УралОмега»). Режимные параметры шарового измельчения – размер шаров, соотношения твердой и жидкой фаз, время измельчения. В центробежно-ударной мельнице параметры регулировки – скорость вращения ротора мельницы, положение лопаток в верхней части мельницы, расход воздуха (по изменению положения заслонки на воздуховоде). Режим работы комплекса настроен для получения трех продуктов крупностью 0,5 мм, 0,315 мм и 0,1 мм. Во входящем в измельчительный комплекс КИ-0,36 динамическом классификаторе измельченный продукт разделяли по граничному зерну 0,071 мм. Частота вращения ротора динамического классификатора 3000 об/мин. Диаметр колеса – 0,4 м.

Закономерности разделения измельченной пыли магнитным методом исследовали на электромагнитном трубчатом анализаторе 298 СЭ-00.000ПС. Измененяемые параметры – способ

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 777-788
© Н.Н.Орехова, Н.В.Фадеева, Е.Н.Мусаткина, 2024

измельчения, крупность питания и напряженность магнитного поля. Исследование закономерностей пенной флотации проводили на лабораторной флотомашине механического типа по реагентному режиму, включающему подачу собирателя осветительного керосина и пенообразователя ВКП либо Т-80. Качество продуктов разделения оценивалось по содержанию в продуктах углерода и сильномагнитной фракции. Содержание углерода определялось на анализаторе SC-144DR сжиганием углерода в атмосфере кислорода до CO_2, сильномагнитных частиц – ручным магнитом, создающем поле напряженностью 42,8 кА/м.

Обсуждение результатов. Исследуемые пробы находятся в дисперсном состоянии, что позволяет рассмотреть возможность их обогащения по крупности без дополнительной дезинтеграции. Проведен анализ гранулометрического состава исследуемых проб и распределения углерода и сильномагнитной фракции по классам крупности (рис.2). Установлено, что в пробе ДЦ половину материала составляют частицы крупностью менее 0,071 мм и во всех классах крупности сильномагнитные частицы преобладают над частицами графита, извлечение углерода не превышает 28 %, а сильномагнитной фракции 50 %. При этом более 51 % углерода и более 72 % сильномагнитных частиц имеют размер меньше 0,1 мм. Полученные данные свидетельствуют о тесной ассоциации основных компонентов в данном образце пыли и об отсутствии заметного обогащения продуктов отсева по углероду и железу при отсеве какого-либо класса.

В пробе ККЦ графит преобладает в самом крупном классе (крупнее 1 мм) и существует закономерность увеличения содержания магнитной фракции и уменьшения содержания углерода от крупных классов к мелким. Извлечение углерода в классы крупности менее 0,25 мм не превышает 5 %. В мелких классах концентрируются сильномагнитные частицы, и для данной пробы при построении технологической схемы может быть целесообразна операция отсева мелких классов. При отсеве частиц менее 0,071 мм может быть получен железосодержащий продукт с выходом около 11 %, с содержанием железа в нем около 71,5 % в пересчете на магнетит, пригодный для рециклинга. Потери углерода с этим продуктом составят не выше 2 %.

В пробе ЭСПЦ преобладают сильномагнитные частицы в классах крупнее 1 мм и мельче 0,1 мм, в промежуточных классах – графит. Отсев самого крупного класса приведет к получению продукта низкого качества по железу (~40 %) и с потерей 18 % графита. При отсеве класса –0,071 мм качество

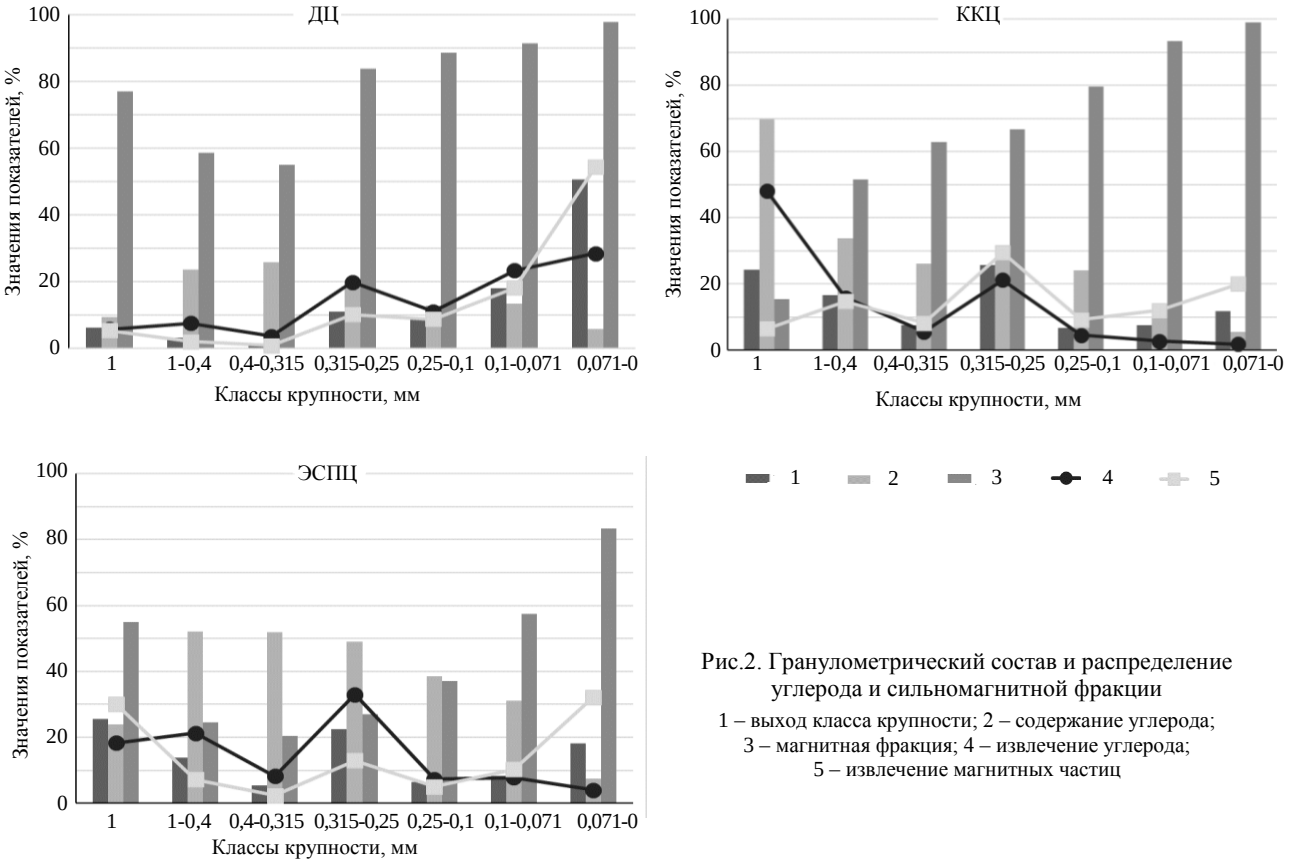


Рис.2. Гранулометрический состав и распределение углерода и сильномагнитной фракции

1 – выход класса крупности; 2 – содержание углерода; 3 – магнитная фракция; 4 – извлечение углерода; 5 – извлечение магнитных частиц

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

полученного продукта будет ниже требований, предъявляемых к качеству железных концентратов при переработке скарновых магнетитовых руд.

Оптико-микроскопический и электронно-микроскопический анализы проб показали [11, 31], что в свободном состоянии в пробе присутствуют в основном сферические частицы и частицы неправильной формы безуглеродного состава. Чешуйки графита редко бывают свободны от посторонних примесей, и основными загрязнителями являются сферические частицы, располагающиеся как на поверхности, так и в пространстве между чешуйками. Рентгеноспектральным анализом сферических частиц установлен их железо-кислородный состав. Размер сфер варьируется в широком диапазоне. Факт загрязнения чешуек графита железосодержащими сферическими частицами обуславливает наличие у графитовых частиц слабомагнитных свойств и их притягивание к сильному неодимовому магниту N30 (H = 725 кА/м). Удаление загрязняющих примесей возможно только после измельчения материала. Принимая во внимание ценность крупных чешуек графита, важно обеспечить баланс между сохранением чешуйчатого строения графитовых частиц и отделением от них частиц других фаз. Учитывая различия в содержании графита и железа в исходных пробах (табл.1, 2), характер распределения в пробах крупных и мелких частиц (см. рис.1), следует изучить закономерности измельчения проб различных участков их образования в стандартных лабораторных мельницах рольгангового типа.

Таблица 3

Влияние времени измельчения на крупность

Время измельчения, мин	Содержание класса –0,071 мм, %		
	ДЦ	ККЦ	ЭСПЦ
0	50,6	11,7	18,1
5	63,48	15,44	19,1
10	70,88	19,68	25,22
20	81,16	20,23	26,15

Режимы шарового измельчения железографитовой пыли – крупность шаров, соотношение твердой и жидкой фаз – подбирались в ходе поисковых исследований по режимам измельчения графитовой руды. Измельчающая среда представляла смесь металлических шаров крупностью 5, 7, 15 мм, соотношение фаз в мельнице при измельчении пыли ДЦ Т:Ж:Ш = 1:1:6, при измельчении пыли ККЦ и ЭСПЦ, из-за большего количества в них графитовых чешуек, Т:Ж:Ш = 1:1:12. В табл.3 приведены данные по влиянию времени измельчения на содержание в измельченных продуктах класса крупности 0,071 мм. С увеличением времени измельчения в пробе ДЦ прирост мелких частиц более значительный, чем в пробах ККЦ и ЭСПЦ. Макроскопически эти пробы содержат весьма крупные чешуйки графита и в большем количестве, чем в пробе ДЦ, о чем свидетельствует и больший вес пробы ДЦ. Имеет значение и измельчаемость графита мелющими телами. При переработке чешуйчатых графитовых руд и использовании в измельчении стержневых и шаровых мельниц графит концентрируется в крупных классах крупности [32]. Это обусловлено тем, что в данном типе измельчительного оборудования основное разрушающее усилие падающих или перекатывающихся мелющих тел по отношению к графитовым чешуйкам будет направлено преимущественно на плоскость чешуек, в которых действуют сильные ковалентные связи, а не по граням чешуек, скрепленных между собой слабыми молекулярными силами. Стержневые мельницы выбирают вместо других типов измельчения, когда руда склонна к налипанию. По сравнению с шаровым измельчением, стержневые мельницы обычно наносят меньше вреда размеру и форме чешуек. С целью сохранения размеров чешуек и слоистой структуры графита применяют измельчение с перемешиванием [33, 34] и струйное измельчение [4]. Перспективным направлением модернизации процессов измельчения является использование технологий, основанных на селективной дезинтеграции [35].

Основным параметром при выборе метода обогащения любого сырья кроме технологических свойств и крупности извлекаемых частиц является содержание извлекаемых компонентов или удаляемых загрязняющих примесей. При прочих равных условиях используют метод, извлекающий компоненты, содержащиеся в меньшем количестве. Исходя из этого, магнитная сепарация предпочтительнее для пробы ККЦ, флотация – для проб ДЦ и ЭСПЦ. Результаты исследования приведены в табл.4. Фоном выделены наиболее высокие достигнутые технологические показатели и эффективность обогащения мокрой магнитной сепарации исследуемых проб. Данным показателям соответствуют следующие рациональные параметры: для пылей ДЦ – крупность шарового измельчения до 81,16 % класса –0,071 мм и напряженность магнитного поля 88 кА/м, для ККЦ – крупность

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 777-788
© Н.Н.Орехова, Н.В.Фадеева, Е.Н.Мусаткина, 2024

шарового измельчения до 15,44 % класса –0,071 мм и сепарация при напряженности магнитного поля 88 кА/м; для ЭСПЦ – крупность шарового измельчения до 25,22 % класса –0,071 мм и напряженность магнитного поля 88 кА/м. При данных условиях мокрой магнитной сепарацией возможно получение графитового продукта высокой чистоты 96,1 % только из пробы ККЦ при грубом помоле. Показатели магнитного обогащения проб железографитовой пыли ДЦ и ЭСПЦ низкие, массовая доля углерода не выше 22 % для пробы ДЦ и 78 % для пробы ЭСПЦ. Содержание магнитной фракции в немагнитных продуктах уменьшается до 0,56 % и 1,1 % соответственно. Наиболее полное выделение свободных сильномагнитных частиц в магнитный продукт происходит при напряженности магнитного поля 88 кА/м.

Таблица 4

Влияние крупности измельчения и напряженности магнитного поля на показатели немагнитного (графитового) продукта

Время измельчения, мин	Напряженность, кА/м	ДЦ-2019*					ККЦ					ЭСПЦ				
		γ, %	β_C, %	ε_C, %	$\beta_{магн}$, %	E, %	γ, %	β_C, %	ε_C, %	$\beta_{магн}$, %	E, %	γ, %	β_C, %	ε_C, %	$\beta_{магн}$, %	E, %
5	56						39,9	85,7	81,5	4,34	71,7	68,2	58,0	81,2	20,07	25,3
	80						40,6	88,5	85,6	2,18	77,6	51,6	70,5	74,8	5,56	45,2
	88						43,4	96,1	99,2	0,7	96,2	42,0	78,4	67,7	1,1	50,1
10	56	41	9,23	74,0	6,31	34,8	42,4	86,3	87,0	2,24	76,9	60,6	66,4	82,6	12,72	42,9
	80	13,7	18,4	49,2	2,64	37,4	42,3	88,8	89,5	0,52	81,4	57,1	73,3	85,9	6,03	56,1
	88	14,6	22,2	63,3	0,56	51,3	33,9	89,6	72,4	0,3	66,4	53,7	78,7	86,8	2,02	64,5
20	56	36,4	11,3	80,5	15,8	46,5	42,4	78,8	79,5	5,17	64	62,9	70,0	90,5	27,04	53,8
	80	15,2	21,5	63,8	1,63	51,2	36,2	87,0	75,0	1,0	66,9	54,9	74,8	84,3	11,78	57,3
	88	16,9	20,4	67,5	0,78	53,3	36,0	88,7	76,0	0,34	69	46,5	76,3	72,8	2,51	51,3
Исходный продукт		100	5,11	100	87,5		100	42	100	58,0		100	48,7	100	46,9	

* Отбор проб в ДЦ осуществлялся дважды – в 2019 и 2022 годах; пробы немного отличаются по массовой доле углерода и сильномагнитной фракции.

Исследование флотации проведено при измельчении проб в течение 10 мин и при различном соотношении твердой и жидкой фаз. Условия флотации графитовой пыли по количеству содержащегося графита могут быть расценены как условия перечистных операций флотации графитовой руды, поэтому флотация велась в разбавленных пульпах. Результаты флотации исследуемых проб приведены в табл.5. Более высокие результаты по массовой доле углерода получены при флотации графита из проб ДЦ и ЭСПЦ. По сравнению с мокрой магнитной сепарацией качество графитовых продуктов вдвое выше для ДЦ, несколько ниже для ККЦ и примерно на том же уровне для ЭСПЦ при большем содержании сильномагнитной фракции. Более низкие показатели флотации по сравнению с магнитной сепарацией обусловили отказ от данного метода для пыли ККЦ.

Таблица 5

Влияние плотности пульпы на показатели пенного (графитового) продукта

Содержание твердого во флотации, %	ДЦ-2022					ККЦ					ЭСПЦ				
	γ, %	β_C, %	ε_C, %	$\beta_{магн}$, %	E, %	γ, %	β_C, %	ε_C, %	$\beta_{магн}$, %	E, %	γ, %	β_C, %	ε_C, %	$\beta_{магн}$, %	E, %
5	18,09	49,02	88,23	48,6	78	42,15	74,94	75,21	14,17	57	46,48	80,52	76,38	21,19	58,6
7,5	20,75	47,01	97,04	42,8	84,8	41,71	74,65	74,14	8,86	55,91	53,46	69,73	76,07	23,58	44,3
10	21,31	43,78	92,82	54,01	79,5	42,55	73,63	74,60	19,08	55,26	50,91	72,37	75,18	27,10	47,6
Исходный	100	10,05	100	91,06		100	42	100	58,04		100	49	100	46,86	

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Повышения качества флотационных концентратов достигают перечистками пенных продуктов. Однако, как показывает опыт переработки чешуйчатых графитовых руд на Тайгинской обогатительной фабрике, прирост качества от перечистки к перечистке небольшой, и даже в разбавленных пульпах высокие гидрофобные свойства графита обуславливают механический захват нефлотирующихся частиц и загрязнение ими концентрата. Кроме этого, в перечистном цикле предусматриваются операции доизмельчения, что обуславливает повышение энергозатрат.

Резервом повышения технологических показателей флотации и магнитной сепарации графитовой спели ДЦ и ЭСПЦ является использование в подготовительных операциях оборудования, обеспечивающего селективное отделение от чешуек загрязняющих их сферических частиц. Некоторые типы измельчительного оборудования могут привести к аморфизации графитов [31]. Различия в физико-механических свойствах железо-кислородных соединений и графитовых чешуек, а также характер их взаимосвязи [36] позволили предположить возможность их раскрытия между собой за счет разрушения ускоренных частиц свободным ударом. Такой способ разрушения реализуется при центробежно-ударном измельчении в мельнице с вертикальным валом, входящим в измельчительный комплекс КИ-0,36 ЗАО «УралОмега». В работе [37] показано, что за счет механоактивации и изменения структурно-морфологического состояния получаемых частиц использование такого оборудования при переработке техногенного сырья даст более высокие показатели, чем традиционное [31, 38]. Измельчительный комплекс имеет в составе динамический классификатор, работу которого настраивали на разделение по граничному зерну 0,071 мм с получением крупного и мелкого продуктов классификации. Показано, что разделение в классификаторе происходит не только по крупности, но и вещественному составу [39], а получаемые продукты классификации отличаются более узким гранулометрическим составом по сравнению с измельчением стальными и фарфоровыми мелющими телами [36].

Измельчению и классификации в измельчительном комплексе КИ-0,36 подвергались пыли ДЦ и ЭСПЦ. Крупные и мелкие продукты классификации предназначались для исследования на обогатимость магнитной сепарацией и флотацией. При подготовке проб к магнитной сепарации навески сухих продуктов смешивали с водой в стакане для равномерной подачи материала в трубчатый анализатор. В процессе подготовки проб установлено, что полученные продукты имеют различную смачиваемость водой. Продукты измельчения и классификации пыли ДЦ смачиваются водой лучше, чем продукты пыли ЭСПЦ. Это обусловлено меньшим содержанием в пробе ДЦ графита и соответственно меньшей агрегированностью частиц классификации пыли. Частицы продуктов измельчения и классификации пыли ЭСПЦ не смачивались водой при сколько угодно долгом времени перемешивания и оставались плавать на поверхности. На рис.3 приведены фотографии пыли ЭСПЦ, измельченной различными способами и классифицированной по крупности. Видно, что частицы пыли, измельченной в центробежной мельнице и классифицированные в динамическом классификаторе (рис.3, *б*, *в*), остаются сухими, по сравнению с пылью, измельченной в шаровой мельнице (рис.3, *а*). При такой плохой смачиваемости и отсутствии перемешивающих условий в магнитном анализаторе или любом другом магнитном сепараторе из-за сильной сухой агрегированности частиц процесс магнитной сепарации будет протекать не селективно. Поэтому было принято решение об отказе исследования мокрой магнитной сепарации для пыли ЭСПЦ после ее измельчения и классификации в комплексе КИ-0,36. Исследовалось изменение технологических



Рис.3. Фотографии взаимодействия пыли ЭСПЦ, измельченной в шаровой мельнице (*а*), из крупного (*б*) и мелкого (*в*) продуктов классификации в комплексе КИ-0,36 с водой

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 777-788
© Н.Н.Орехова, Н.В.Фадеева, Е.Н.Мусаткина, 2024

показателей мокрой магнитной сепарации пыли ДЦ, измельченной в центробежной мельнице до крупности 0,1 мм и классифицированной по классу крупности 0,071 мм (табл.6). Сравнение результатов с данными в табл.4 показывает, что показатели мокрой магнитной сепарации на продуктах классификации измельчительного комплекса КИ-0,36 сопоставимы с результатами сепарации после шарового измельчения. Низкая селективность магнитной сепарации обусловлена более высоким содержанием сильномагнитных железокислородных фаз, загрязнением чешуек графита магнитными сферами в пробе ДЦ, что приводит к неселективной магнитной флокуляции частиц. Для одних и тех же продуктов классификации обогащение флотацией позволяет получить графитовые продукты более высокого качества: массовая доля углерода выше на 4,4-22,7 % (табл.7). Одним из факторов повышения показателей флотации является флотация в узких классах крупности, которая достигается пневмоклассификацией. Таким образом, для пыли ДЦ более целесообразно разделение флотацией после центробежно-ударного измельчения и пневмоклассификации измельченного продукта. Из приведенных результатов видно, что подготовка пыли ЭСПЦ к флотации в измельчительном комплексе КИ-0,36 позволяет получить более высокие показатели, чем в шаровой мельнице (табл.7). Из пыли ЭСПЦ возможно получение графитового концентрата высокого качества (94 % углерода) при высоком извлечении углерода и отсутствии в продукте свободных сильномагнитных частиц.

Таблица 6

Сравнение технологических показателей мокрой магнитной сепарации на продуктах шарового и центробежного измельчения пыли ДЦ

Напряженность, кА/м	Продукты классификации									
	Крупный, выход 27,3 %					Мелкий, выход 72,7 %				
	Показатели немагнитного (графитового) продукта									
	γ, %	β_C, %	ε_C, %	$\beta_{магн}$, %	E, %	γ, %	β_C, %	ε_C, %	$\beta_{магн}$, %	E, %
56	17,24	15,9	66,8	2,56	51,7	42,6	11,7	69,3	78,64	28,8
80	19,1	17,32	80,9	4,43	64,4	34,4	19,8	94,6	37,53	64,9
88	17,5	19,15	81,9	0,23	67,1	28,4	22,68	89,5	2,47	65,8
Исходный продукт	100	4,09	100	98,35		100	7,19	100	71,1	

Таблица 7

Влияние способа измельчения на показатели пенного (графитового) продукта

Способ помола	$\beta^{-0,074\ мм}$, % ($\beta^{-0,04\ мм}$, %)	Выход, %	Массовая доля углерода, %	Извлечение углерода, %	Массовая доля магнитной фракции, %
ДЦ					
Металлическими шарами, 20 % тв.	81,16	17,27	28,7	97,02	27,1
Металлическими шарами 7,5 % тв.	81,16	20,75	47,01	97,04	42,8
Крупный продукт КИ-0,36, 20 % тв.	98,9 (89,35)	7,84	46,2	88,61	5,27
Мелкий продукт КИ-0,36, 20 % тв.	95,38 (91,3)	12,43	51,4	88,89	4,71
ЭСПЦ					
Металлическими шарами, 5 % тв.	19,1	46,48	80,52	76,38	21,19
Крупный продукт КИ-0,36, 5 % тв.	79,0	50,76	75,5	98,98	5,8
Мелкий продукт КИ-0,36, 2 % тв.	95,3	62,13	94	99,56	0

Проведенные исследования показывают, что пыли, образовавшиеся на разных участках металлургического передела, требуют индивидуальных технологических решений для получения из них чешуйчатого графита. Исследования на обогатимость пылей по крупности магнитным и флотационным методами доказали возможность получения продуктов, по качеству подходящих для использования в утилитарных целях (смазочный, литейный, карандашный графит). Для получения концентратов, по качеству удовлетворяющих требованиям высокотехнологичных материалов, они могут быть отправлены на доводку химическими и физико-химическими методами.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Заключение. Установлено, что различные условия формирования железографитовой пыли обуславливают наличие у компонентов пыли специфических технологических свойств – различия в гранулометрическом и химическом составе, содержании и фазовом составе железокислородных компонентов, кристаллического строения графита. Выявленные особенности обуславливают различную обогатимость железографитовой пыли различных участков образования разделением по крупности, магнитным и флотационным методами.

Выявлен различный характер распределения компонентов пыли по крупности, заключающийся в концентрировании железокислородного компонента в классе крупности менее 0,071 мм в пыли ККЦ по сравнению с пылями ДЦ и ЭСПЦ. Для пыли ККЦ использование предварительного обогащения исходного материала по крупности в технологической схеме позволит получить около 11 % кондиционного по железу концентрата (с содержанием железа в нем около 71,5 % в пересчете на магнетит), пригодного для рециклинга. В остальных пробах характер распределения компонентов свидетельствует о тесной взаимосвязи компонентов друг с другом и для их разделения необходима дезинтеграция.

Установлена лучшая обогатимость графитовой пыли участка ККЦ мокрой магнитной сепарацией по сравнению с пылями ДЦ и ККЦ и обогатимостью флотацией при грубом измельчении пыли металлической шаровой измельчающей средой. Рациональными параметрами мокрой магнитной сепарации являются крупность измельчения 15 % класса –0,071 мм и сепарация при напряженности магнитного поля 88 кА/м. Получен графитовый концентрат чистоты 96,1 % углерода при извлечении 99,2 %.

Пробы железографитовой пыли участков ДЦ и ККЦ лучше обогащаются флотацией по сравнению с обогащением мокрой магнитной сепарацией. При этом лучше обогащается флотацией графит из пробы ЭСПЦ – разница в качестве концентратов составляет 33,5 % при разнице в содержании сильномагнитной фракции 27,41 %. Лучшая обогатимость флотацией пыли ЭСПЦ обусловлена большим содержанием графита и центросимметричной гексагональной структурой чешуек графита в этой пробе. В пробе ДЦ возрастает доля графита с ромбической структурой, характеризующей дефектность строения чешуек, и имеющего более низкие флотационные свойства.

Качество получаемых флотационных графитовых концентратов зависит от способа их предварительного измельчения и использования перед флотацией операции классификации по крупности. В большей степени это проявляется при флотации пыли ЭСПЦ. Установлено, что сухой помол железографитовой пыли в мельницах центробежно-ударного измельчения и последующая пневмоклассификация измельченных продуктов обеспечивают получение продуктов с узким гранулометрическим составом и обуславливают увеличение флотационной активности графитовых частиц по сравнению с измельчением металлическими шарами. Близкие размеры графитовых частиц в питании флотации обеспечивают близость флотационных свойств частиц, имеющих различные смачиваемость по плоскостям и граням и соотношение площадей плоскостей и граней при различной крупности чешуек. Узкий диапазон крупности продуктов классификации графитовой пыли обеспечивает получение более высоких и стабильных показателей обогащения – при флотации пыли ЭСПЦ получен продукт чистотой 94 % углерода, при извлечении 99,56 %. Оптический анализ продукта показал, что в нем отсутствуют свободные частицы сильномагнитных железосодержащих примесей.

Проведенные исследования обогатимости графитовой пыли различных участков позволяют классифицировать пробы как легкообогатимые (ККЦ), среднеобогатимые (ЭСПЦ) и труднообогатимые (ДЦ).

Дальнейшие исследования свойств пыли различных участков металлургического производства и процессов их переработки будут направлены на повышение качества графитовых концентратов, удовлетворяющих требованиям производства углеграфитовых материалов для высокотехнологичных сфер его использования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A. et al.* Increase in Recovery Efficiency of Iron-Containing Components from Ash and Slag Material (Coal Combustion Waste) by Magnetic Separation // Minerals. 2024. Vol. 14. Iss. 2. № 136. DOI: 10.3390/min14020136

2. *Чантурия В.А., Николаев А.И., Александрова Т.Н.* Инновационные экологически безопасные процессы извлечения редких и редкоземельных элементов из комплексных руд сложного вещественного состава // Геология рудных месторождений. 2023. Т. 65. № 5. С. 402-415. DOI: 10.31857/S0016777023050040

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

3. *Черашев Д.В., Черашева О.Ю.* Рынок материалов для выпуска электротранспортных средств: тенденции и позиции РФ // Российский внешнеэкономический вестник. 2023. № 4. С. 88-108. DOI: 10.24412.2072-8042-2023-4-88-108

4. *Vasumathi N., Sarjekar A., Chandrayan H. et al.* A Mini Review on Flotation Techniques and Reagents Used in Graphite Beneficiation // International Journal of Chemical Engineering. 2023. Vol. 2023. Iss. 1. № 1007689. DOI: 10.1155/2023/1007689

5. *Александров А.И.* Целесообразность разработки месторождений графита в Якутии // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2013. Т. 9. № 47 (236). С. 31-36.

6. *Кононов В.А.* Графит: рынок, добыча, свойства, применение // Новые огнеупоры. 2021. № 3. С. 3-10. DOI: 10.17073/1683-4518-2021-3-3-10

7. *Перепелицын В.А., Яговцев А.В., Мерзляков В.Н. и др.* Перспективные техногенные минеральные ресурсы для производства огнеупоров // Новые огнеупоры. 2019. № 6. С. 12-16.

8. *Маслов В.А., Дубовкина М.Ю., Хлестова О.А.* Использование математических моделей снижения температуры чугуна с целью определения выхода углеродсодержащих отходов // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2011. Вып. 22. С. 41-44.

9. *Shu-Lung Kuo, Edward Ming-Yang Wu.* Analysis on certain physical and resourceful properties of kish graphite containing materials // Journal of Indian Chemical Society. 2020. Vol. 97. № 11b. P. 2490-2494. DOI: 10.5281/zenodo.5656771

10. *Lei Ye, Zhiwei Peng, Qing Ye et al.* Toward environmentally friendly direct reduced iron production: A novel route of comprehensive utilization of blast furnace dust and electric arc furnace dust // Waste Management. 2021. Vol. 135. P. 389-396. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.08.045

11. *Кравец В.А., Максимов В.Г.* Графитоулавливание и утилизация уловленной пыли // Збірник наукових праць ДонНАБА. 2017. № 1 (6). С. 1-5.

12. *Dan L., Maslov V., Trofimova L., Cios G.* The Formation, Properties and Use of Dispersed Iron-Graphite Metallurgical Waste // Journal of Casting & Materials Engineering. 2022. Vol. 6. № 4. P. 81-92. DOI: 10.7494/jcme.2022.6.4.81

13. *Бодряга В.В., Недопекин Ф.В., Белоусов В.В.* Экологическая проблема утилизации графитной спели при переливах чугуна // Безопасность в техносфере. 2018. Вып. 12. С. 154-163.

14. *Кравец В.А., Попов А.Л., Кравец С.В.* Физико-химические процессы, приводящие к выбросам в атмосферу при переливах чугуна // Збірник наукових праць ДонНАБА. 2015. № 1 (1). С. 4-10.

15. *Кузнецова Л.Н., Гавриш Ю.С., Петухов А.В.* Улавливание и удаление пыли из пылеочистных аппаратов в условиях нестационарного режима работы газоотводящего тракта // Экология и промышленность. 2014. № 3 (40). С. 24-29.

16. *Науменко В.Г., Яковлев С.И.* Возможные способы обогащения графитовой спели с целью улучшения экологии окружающей среды / Материалы республиканской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Современные машины и технологии обогащения полезных ископаемых». Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2018. С. 61-66.

17. *Маслов В.А., Пустовалов Ю.П., Трофимова Л.А., Дан Л.А.* Возможность получения термографенита с магнитными свойствами из дисперсных железографитовых отходов металлургии // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2017. Вып. 34. С. 24-30.

18. *Zhenshuai Wang, Xingyang Bao, Dai Zhang et al.* Application of purified kish flake graphite as a potential cathode material for high-performance aluminum ion batteries // Journal of Alloys and Compounds. 2023. Vol. 954. № 170197. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.170197

19. *Jung-Chul An, Hye Jeong Kim, Ikpyo Hong.* Preparation of Kish graphite-based graphene nanoplatelets by GIC (graphite intercalation compound) via process // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2015. Vol. 26. P. 55-60. DOI: 10.1016/j.jiec.2014.12.016

20. *Jihui Li, Ruochen Liu, Liqiang Ma et al.* Combining Multiple Methods for Recycling of Kish Graphite from Steelmaking Slags and Oil Sorption Performance of Kish-Based Expanded Graphite // ACS Omega. 2021. Vol. 6. Iss. 14. P. 9868-9875. DOI: 10.1021/acsomega.1c00591

21. *Tao Rong, Yaqiang Yuan, Haoqing Yang et al.* Investigation of the enrichment-purification process and electrochemical performance of kish graphite in dust from blast furnace tapping yard // Waste Management. 2024. Vol. 175. P. 121-132. DOI: 10.1016/j.wasman.2023.12.055

22. *Zhenshuai Wang, Dai Zhang, Xingyang Bao al.* Space-confined intercalation expansion strategy for simple and rapid synthesis of kish-based expanded graphite for aluminum ion batteries // Carbon. 2024. Vol. 223. № 119016. DOI: 10.1016/j.carbon.2024.119016

23. *In-Yup Jeon, Sun-Hee Shin, Sun-Min Jung et al.* One-Pot Purification and Iodination of Waste Kish Graphite into High-Quality Electrocatalyst // Particle & Particle Systems Characterization. 2017. Vol. 34. Iss. 9. № 1600426. DOI: 10.1002/ppsc.201600426

24. *Олейник Т.А., Дзюба О.И., Харитонов В.Н., Кулаков Е.А.* Химическое обогащение графитсодержащих продуктов // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-електромеханічна. 2007. Вып. 15 (131). С. 139-144.

25. *Фадеева Н.В., Орехова Н.Н., Колодежная Е.В., Ефимова Ю.Ю.* Особенности вещественного состава графитовых пылей различных участков металлургического производства / Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья. Материалы международной конференции «Плаксинские чтения – 2023», 2-5 октября 2023, Москва, Россия. М.: Спутник+, 2023. С. 186-189.

26. *Ying-Liang Chen, Wei-Ping Chiang, Ping-Yu Hsieh.* Recovery of Kish Graphite from Steelmaking Byproducts with a Multi-Stage Froth Flotation Process // Recycling. 2023. Vol. 8. Iss. 6. № 92. DOI: 10.3390/recycling8060092

27. *Jara A.D., Betemariam A., Woldetinsae G., Jung Yong Kim.* Purification, application and current market trend of natural graphite: A review // International Journal of Mining Science and Technology. 2019. Vol. 29. Iss. 5. P. 671-689. DOI: 10.1016/j.ijmst.2019.04.003

28. *Kangkang Sun, Yangshuai Qiu, Lingyan Zhang.* Preserving Flake Size in an African Flake Graphite Ore Beneficiation Using a Modified Grinding and Pre-Screening Process // Minerals. 2017. Vol. 7. Iss. 7. № 115. DOI: 10.3390/min7070115

29. *Свечников Н.Ю., Станкевич В.Г., Лебедев А.М. и др.* Спектры ЭПР и фотолюминесценции гладких пленок CD_x из токамака Т-10: влияние примеси железа // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2016. № 1. С. 21-33. DOI: 10.7868/S0207352816010182

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

30. *Ye Chen, Shilong Li, Shiru Lin et al.* Promising energy-storage applications by flotation of graphite ores: A review // Chemical Engineering Journal. 2023. Vol. 454. Part 1. № 139994. DOI: 10.1016/j.cej.2022.139994

31. *Баранов В.Н., Довженко Н.Н., Гильманшина Т.Р. и др.* Исследование зависимости качества природного скрытокристаллического графита от режимов подготовки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И.Носова. 2015. № 2. С. 54-59.

32. *Гильманшина Т.Р., Илларионов И.Е., Королева Г.А., Лыткина С.И.* Исследование измельчаемости природных скрытокристаллических графитов // Обогащение руд. 2018. № 4. С. 6-10. DOI: 10.17580/or.2018.04.02

33. *Fangyuan Ma, Dongping Tao, Youjun Tao, Shuyong Liu.* An innovative flake graphite upgrading process based on HPGR, stirred grinding mill, and nanobubble column flotation // International Journal of Mining Science and Technology. 2021. Vol. 31. Iss. 6. P. 1063-1074. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.06.005

34. *Hongxin Zhang, Hongchao Li, Ansheng Feng et al.* Application of stirred mill to upgrading of graphite concentrate by flotation // Canadian Metallurgical Quarterly. 2018. Vol. 57. № 2. P. 245-251. DOI: 10.1080/00084433.2017.1409934

35. *Александрова Т.Н., Чантурия А.В., Кузнецов В.В.* Минералого-технологические особенности и закономерности селективного разрушения железистых кварцитов Михайловского месторождения // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 517-526. DOI: 10.31897/PMI.2022.58

36. *Орехова Н.Н., Фадеева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Колодежная Е.В.* Исследование влияния способа дезинтеграции графитовой спели на ее дисперсный состав, форму частиц и показатели флотации // Обогащение руд. 2022. № 6. С. 44-51. DOI: 10.17580/or.2022.06.08

37. *Гаркави М.С., Орехова Н.Н., Горлова О.Е., Колодежная Е.В.* Применение механоактивации для получения целевых продуктов при переработке плавленого периклаза и ванадиевого шлака // Обогащение руд. 2020. № 6. С. 33-40. DOI: 10.17580/or.2020.06.06

38. *Гембицкая И.М., Гвоздецкая М.В.* Трансформация зерен технологического сырья при получении мелкодисперсных порошков // Записки Горного института. 2021. Т. 249. С. 401-407. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.9

39. *Фадеева Н.В., Орехова Н.Н., Колодежная Е.В., Нигматова Н.Н.* Исследование физико-химических закономерностей процесса флотации графитовой спели // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И.Носова. 2022. Т. 20. № 4. С. 37-46. DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-37-46

Авторы: **Н.Н.Орехова,** *д-р техн. наук, профессор, n_orehova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3507-5198 (Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова, Магнитогорск, Россия),* **Н.В.Фадеева,** *канд. техн. наук, доцент, https://orcid.org/0000-0001-9291-9927 (Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова, Магнитогорск Россия),* **Е.Н.Мусаткина,** *ассистент, https://orcid.org/0009-0000-6124-1770 (Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова, Магнитогорск, Россия)*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0