УДК 622.765.061.22:67.04:67.08

ОПЫТ ПЕРЕРАБОТКИ ГРАФИТСОДЕРЖАЩЕЙ ПЫЛИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Н. В. ФАДЕЕВА¹, канд. техн. наук, доцент кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, natali_fadeeva@mail.ru; Н. Н. ОРЕХОВА^{1,2}, д-р техн. наук, профессор кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, ведущий научный сотрудник отдела горной экологии; О. Е. ГОРЛОВА¹, канд. техн. наук, доцент кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых
(¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия, Челябинская обл., г. Магнитогорск; ² ФГБУН “Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН”, Россия, г. Москва)

Аннотация. Графит является компонентом графитсодержащей пыли — одного из видов отходов, образующихся на металлургических предприятиях. С другой стороны, он является ресурсом, по которому промышленность России испытывает серьезный дефицит. Вовлечение графитсодержащих отходов в переработку может обеспечить решение актуальных вопросов ресурсного, экономического и экологического значения. Изучение проблемы утилизации графитсодержащих отходов показало отсутствие постоянной практики их переработки на отечественных металлургических предприятиях. Одним из немногочисленных примеров переработки графитсодержащей пыли на самом металлургическом предприятии может служить работа графитового участка на Магнитогорском металлургическом комбинате (ММК). На участке производилась переработка графитсодержащей пыли газоочистных сооружений кислородно-конвертерного цеха производительностью до 90 кг/ч с получением графитового концентрата флотацией и железного концентрата магнитной сепарацией. На кафедре обогащения полезных ископаемых Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова под руководством профессора В.Б. Чижевского на протяжении многих лет развивается теория флотации графита и ведутся исследования обогатимости труднообогатимых графитовых руд. На основании накопленного обширного опыта по совершенствованию реагентных режимов флотации графитовых руд было рекомендовано к использованию на графитовом участке ММК сначала реагента ВКП, затем — нового вспенивателя РАС — рафинированного алкиларилсульфоната натрия. При проведении промышленных испытаний расход вспенивателя РАС по сравнению с фабричным реагентным режимом был снижен вдвое при получении более высоких технологических показателей флотации. Опыт переработки графитсодержащей пыли металлургического производства мог бы быть использован как при возобновлении работы графитового участка на ММК, так и на других предприятиях отрасли для получения товарной продукции высокого качества, способной удовлетворить требования не только металлургического производства, но и производства современных углеродных материалов.

Ключевые слова: утилизация графитсодержащих отходов, графитсодержащая пыль, доменный графит, чешуйчатый графит, магнитная сепарация, флотационные реагенты, графитовый концентрат.

Ссылка для цитирования. Фадеева Н.В., Орехова Н.Н., Горлова О.Е. Опыт переработки графитсодержащей пыли металлургического производства // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 5. С. 632–639.

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-5-632-639

EXPERIENCE OF GRAPHITE-CONTAINING DUST OF METALLURGYCAL PLANTS PROCESSING

N. V. FADEEVA¹, PhD (Tech), Prof. Ass., Dpt "Geology, surveyor and minerals concentration", natali_fadeeva@mail.ru;

N. N. OREKHOVA^{1,2}, HD (Tech), Prof., Dpt of Geology, surveyor and minerals concentration, Leading research ass., Dpt of mining ecology; O. E. GORLOVA¹, PhD (Tech), Prof. Ass., Dpt of "Geology, surveyor and minerals concentration"

(¹ Magnitogorsk State Technical University after G.I. Nosov, Russia, Chelyabinsk rgn., Magnitogorsk;

² FGBUN "Institute of complex depths development after academician N.V. Mel'nikov", RAN, Russia, Moscow)

Abstract. Graphite is a component of graphite-containing dust – one of wastes, formed at metallurgical plants. From the other side, it is a scarce resource for the Russian industry. Involvement of graphite-containing wastes into processing can contribute to solving actual problems of resource, economic and ecological significance. Study of the graphite wastes utilization possibility showed an absence of constant practice of their processing at domestic metallurgical plants. The work of graphite department of Magnitogorsk steel-works (MMK) can be one of not numerous examples of the graphite dust processing at the same plant. At the department the processing of graphite-containing dust of accomplished, the dust being collected from 90 kg/h productivity gas cleaning systems of BOF shop. As a result of processing graphite concentrate obtained after flotation and iron powder – after magnetic separation. At the Department "Minerals enrichment" of the Magnitogorsk State Technical University after G.I. Nosov, the theory of graphite flotation is being elaborated under the direction of Professor V.B. Chizhevsky for many years. Besides study of graphite ores washability, which are difficult to be enriched is also carried out. Based on the gained extensive experience on perfection of reagent flotation modes for the graphite ores, it was recommended to use first VKP reagent at the MMK graphite department, and next – RAS foam formation agent, which is a refined sodium alkylarile-sulfonate. At the industrial tests, the RAS foam formation agent consumption was two times as lower comparing with industrial reagent mode, resulting in obtaining higher technological flotation indices. The experience of metallurgical plant graphite-containing dust processing can be used at both the MMK graphite department re-operation and at other plants of the industry for obtaining marketable products of high quality, that can meet requirements not only metallurgical plants, but also used for production of state-of-the-art carbon materials.

Key words: grafite-containing wastes utilization, graphite-containing dust, BF graphite, scale graphite, magnetic separation, flotation agents, graphite concentrate.

For citation. Fadeeva N.V., Orekhova N.N., Gorlova O.E. Experience of graphite-containing dust of metallurgical plants processing. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2019, vol. 75, no. 4, pp. 632–639. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-5-632-639

Графит в силу уникальности своих свойств используется в различных отраслях промышленности. Важнейшей сферой применения графита является металлургия: производство огнеупорных материалов, графито-керамических тиглей, коллоидных красок и лаков для покрытия постоянных литейных форм. Необходимость в обеспечении данным видом неметаллического сырья существенно возрастает в связи с развитой в Уральском регионе металлургической промышленностью. В целом потребность в кристаллическом графите российских предприятий — потребителей графитовой продукции составляет порядка 40–42 тыс. т, а добывается всего 6 тыс. т [1]. Минеральные ресурсы чешуйчатого кристаллического графита в России представлены только Тайгинским месторождением, Челябинская обл., на котором в лучшие годы добывалось около 14 тыс. т графита, однако эксплуатационная разведка не подтвердила промышленную графитизацию месторождения. В настоящее время природный чешуйчатый графит относится к сырью, по которому в стране имеется значительный дефицит и потребности в котором обеспечиваются импортом в основном из Украины и Китая (свыше 70 % мирового производства).

С другой стороны, графит является компонентом одного из видов отходов, образующихся на металлургических предприятиях, — графит-содержащей пыли или железографитовых отходов. Графитсодержащая пыль (спель) образу-

ется из выбросов в атмосферу при осуществлении перелива чугуна в миксерных отделениях, продувки чугуна и других процессов из насыщенного углеродом чугуна при его охлаждении. По данным НПО "Энергосталь", ресурсы графит-содержащих отходов на предприятиях черной металлургии стран СНГ оцениваются в количестве не менее 4 млн т [2]. Украинские исследователи оценивают собственные металлургические отходы в количестве, достаточном для переработки и обеспечения графитом не только собственных нужд, но и потребностей России [3]. По данным института "ВНИПИ Черметэнергоочистка", в ОАО "Азовсталь" при полной загрузке предприятия количество образующихся дисперсных железографитовых отходов составляет до 3 тыс. т/год [4]. В работе [5] запасы графитовой спели оцениваются порядка 10⁵ т, а на сталеплавильном заводе Tata в Скенторпе, Великобритания [6], объем образования отходов составляет 10 тыс. т/год.

Наибольшее количество углерода в отходах образуется при переработке чугуна, выход дисперсных железографитовых отходов в данном производстве составляет 400 (600) г/т чугуна [7, 8]. Компонентами пыли являются частицы чугуна, оксидов железа, шлака и графита. Доменный графит, выделяющийся из чугуна, обладает рядом ценных свойств, главные из которых — это размеры и форма частиц. Размеры чешуек графита существенно отражаются на его техни-

ческих свойствах. Чешуйчатые, реже пластинчатые частицы графита из графитовой пыли имеют поперечный размер 0,3–3,4 мм [9], плоскую форму и состоят из сросшихся гексагональных пластин. Его кристаллическая структура не отличается от структуры естественного графита [10, 11]. По своему качеству он может быть приравнен к чешуйчатому графиту, полученному из графитовых руд, а иногда и превосходит его, и поэтому графитсодержащая пыль может рассматриваться как вторичный ресурс получения этого ценного и дорогостоящего материала. Таким образом, вовлечение графитсодержащих отходов в переработку, обеспечит решение сразу нескольких вопросов экономического и экологического значения.

Железографитовые отходы металлургических предприятий изучены в работах, выполненных под руководством В.А. Маслова [2, 12–14] и В.А. Кравеца [15, 16], в них показано, что содержание углерода в графитовой пыли зависит от места ее отбора, операций, в которых она выделяется, и может изменяться от 11 % [3] до 20 %, а при применении пылеподавления азотом может содержать более 30 % углерода, при этом уменьшается среднемедианный размер частиц графита [16] и количество адсорбированного на графите железа [3]. По другим данным [9], содержание углерода в графитовой пыли может изменяться от 15 до 55 %, а железа — от 30 до 60 %. В работе [7]

указывается, что содержание железа в графитовой пыли составляет 51 %, причем металлического железа — менее 1 %, остальное — его минеральные формы. Распределение $Fe_{общ}$ по фракциям от $-1+0,063$ мм до $-0,05$ мм меняется от 14,9 до 36,73 %, Fe_2O_3 распределяется в пределах от 13,5 до 36,48 % [13]. Металлические составляющие сосредоточены в мелких фракциях, преимущественно менее 50 мкм, а во фракциях более 180 мкм практически отсутствуют. Графит, наоборот, содержится в крупной фракции и полностью отсутствует во фракциях менее 63 мкм [3].

Переработка графитсодержащей пыли может осуществляться с применением операций распада на фракции, магнитной и пневматической сепарации [7, 15, 16]. По схемам, показанным на рис. 1, из пыли с содержанием углерода около 15 % получают продукты с содержанием углерода 55 % после магнитной сепарации и 80 % после магнитной и пневматической сепарации [7]. В работах [12, 14] дополнительно предусматриваются высокотемпературная обработка и магнетизирующий обжиг в гравитационно-падающем слое для повышения уровня магнитных свойств и, вероятно, повышения показателей извлечения из отходов железа. Сведений о качестве магнитного продукта и его использовании в рассмотренных работах нет.

Рис. 1. Схема отделения пыли:
a — эксперимент № 1; *б* — эксперимент № 2; *M* — магнитный продукт; *N* — немагнитный продукт;
H — тяжелый; *L* — легкий продукт

Fig. 1. Diagram of dust separation:
a — experiment No. 1; *б* — experiment No. 2; *M* — magnetic product; *N* — non-magnetic product;
H — heavy; *L* — light product

Последующая переработка полученного концентрата может осуществляться на специализированных графитовых заводах совместно с ископаемой графитовой рудой, как например, в ОАО «Мариупольский графитовый комбинат «Маркограф» при производстве аккумуляторного, коллоидного графитов и графитовых смазок [12].

Получение товарного графита более высокого качества возможно с использованием флотационного и (или) термохимического методов обогащения, при этом флотация менее затратна и экологически чище. Флотационное обогащение графитовой пыли включает измельчение графитовой пыли для освобождения ее от захваченных частиц оксидов железа и металлического железа и флотацию с применением углеводородов. Флотационное обогащение может осуществляться на имеющихся обогатительных фабриках совместно с графитовой рудой, как это было опробовано на Завальевском графитовом комбинате [9], либо непосредственно на металлургических предприятиях, как на графитовом участке ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК). Участок для переработки графитосодержащей пыли газоочистных сооружений кислородно-конвертерного цеха ММК производительностью до 90 кг/ч существовал в структуре рудообогатительных фабрик (РОФ) горнообогатительного производства. Переработка пыли осуществлялась по технологической схеме, представленной на рис. 2. Железный концентрат по мере накопления отгружался на аглофабрику, графитовый концентрат — на склад готовой продукции, хвосты обогащения — в отстойник, из

которого осадок отгружался в отвал. Для получения графитового концентрата использовался простой реагентный режим, включающий подачу собирателя керосина и вспенивателя ВКП. Показатели флотации графитосодержащей пыли представлены в таблице.

Рис. 2. Схема переработки графитосодержащей пыли

Fig. 2. Diagram of graphite-containing dust processing

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ФЛОТАЦИИ ГРАФИТА

TECHNOLOGICAL INDICES OF GRAPHITE FLOTATION

Реагентный режим, г/т	Продукты	Выход, %	Зольность, %	Извлечение углерода ε, %
Фабричный реагентный режим				
Керосин–100 ВКП–51,1	Исходный	100	85,88	100
	Концентрат	14,18	11,7	88,7
	Хвосты	85,82	98,14	11,3
Предлагаемый реагентный режим				
Керосин–100 РАС–25,8	Исходный	100	85,88	100
	Концентрат	14,25	10,3	90,5
	Хвосты	85,75	98,4	9,5

Показатели флотационного обогащения графитовой пыли будут определяться главным образом физико-химическими свойствами поверхности графита и характером взаимодействия его с используемыми флотационными реагентами. Изучению этих вопросов посвящены обширные исследования, проводимые на кафедре обогащения полезных ископаемых Магнитогорского государственного технического университета им.

Г.И. Носова под руководством профессора В.Б. Чижевского. В результате этих работ определены наиболее флотоактивные для графита углеводороды и кислородсодержащие соединения [17], изысканы эффективные флотационные реагенты и способы флотации графитовых руд, закрепленные авторскими свидетельствами и позволившие не только повысить технологические показатели флотации, но и вовлечь в перера-

ботку труднообогатимые сорта руд. Обширный опыт по совершенствованию реагентных режимов флотации графитовых руд позволил рекомендовать к использованию на графитовом участке сначала реагент ВКП, затем — новый вспениватель РАС — рафинированный алкиларилсульфонат натрия. Основанием для испытаний стали лабораторные исследования, показавшие, что оптимальный расход нового реагента в 3 раза меньше по сравнению с реагентом ВКП. Реагент РАС относится к классу анионных поверхностно-активных веществ и представляет собой соль ароматической сульфокислоты, его получают рафинированием сульфокислот керосиновых фракций с последующей нейтрализацией их содой в водной среде. Это негорючий, не взрывоопасный и нетоксичный продукт. В соответствии с ГОСТ 12.1.007 по степени воздействия на организм человека РАС относится к четвертому классу опасности. Благодаря тому, что углеродные атомы боковой цепи расположены линейно и не разветвлены, молекулы 4-додецилбензолсульфоната натрия способны подвергаться биодegradации [18]. Реагент ВКП является кубовым остатком ректификации продуктов синтеза 2-этилгексанола из масляного альдегида и, в отличие от РАС, содержит органические соединения различных классов: 2-этилгексанол, этилгексаналь, масляный альдегид, кротоновый альдегид, бутанол, дибуталь, тяжелые органические соединения, в том числе димеры и тримеры 2-этилгексанола, ацетали C_{12} – C_{24} , циклические кислородсодержащие соединения типа лактонов и сложные эфиры муравьиной и масляной кислот.

Технологические показатели флотации с использованием реагента РАС сравнивались с показателями работы графитовой установки в смежный период с использованием керосина и ВКП. В период испытаний расход керосина был принят постоянным — 100 г/т. Оптимальный расход вспенивателя ВКП составлял 51,1 г/т, расход РАС изменялся от 10 до 100 г/т.

Промышленные испытания показали, что подача РАС в количестве 10 г/т обеспечивает получение концентрата с зольностью 9,8 % при извлечении углерода в концентрат 87,6 %. Повышение расхода вспенивателя РАС до 100 г/т приводило к увеличению извлечения углерода в концентрат до 92,4 %, но и к резкому увеличению его зольности — до 13,2 %.

При расходе РАС 25,8 г/т обеспечивались удовлетворительные показатели и по качеству графитового концентрата, и по извлечению углерода. При этом расход вспенивателя по сравнению с фабричным реагентным режимом снижа-

ется вдвое. Технологические показатели флотации графита, полученные в результате промышленных испытаний, представлены в таблице.

Более высокие технологические показатели, полученные при использовании РАС, — пониженный его расход, малая токсичность и низкая стоимость — свидетельствовали о перспективности его использования для флотации графита, и рафинированный алкиларилсульфонат натрия был рекомендован к промышленному использованию на графитовом участке РОФ.

Действие реагента РАС при флотации графита связано со снижением устойчивости трехфазной пены и увеличением скорости синерезиса, приводящим к интенсификации процессов вторичного обогащения в пенном слое [19]. Вторичная концентрация ценных компонентов в пенном слое обеспечивает и высокую селективность процесса флотации в колонных машинах [20] — флотационном оборудовании, обеспечивающем низкие материальные затраты на переработку за счет возможности создания малооперационных, менее энергоемких технологий и занимающих небольшие производственные площади.

Реструктуризация цеха РОФ в свое время привела к упразднению графитового участка. Возобновление переработки графитсодержащей пыли после проведения необходимых исследований, с использованием современного размольного и обогатительного оборудования позволило бы в настоящее время получать продукт более высокого качества.

В работе [1] показано, что использование для измельчения графита мельниц с керамической или резиновой футеровкой или керамических мелющих тел вместо металлических позволит сохранить размер чешуек графита крупнее 0,2 мм и использовать его для производства, например, суперсовременных композитов. Для флотационного обогащения возможно применение колонных флотомашин [21, 22], преимуществами которых являются не только высокая производительность оборудования, низкий расход электроэнергии, небольшие капитальные затраты, большой аэрируемый объем, но и повышение селективности процесса флотации за счет большей, чем обычно, роли процессов вторичной концентрации в пенном слое [19, 20].

Графитовый концентрат, получаемый на графитовом участке, по своему качеству в соответствии с ГОСТ 17022–81 [23] относился к литейному и элементному графиту марок ГЛ-1, ГЭ-2, ГЭ-4, но с доработкой технологии ассортимент выпускаемой продукции мог бы быть расширен.

Выводы

1. В настоящее время имеется значительный запас отходов металлургического производства в виде графитсодержащей пыли, которая, несмотря на различные изыскания, подтверждающие перспективность ее переработки, накапливается в отвалах, загрязняя окружающую среду легкоразвешиваемыми компонентами.

2. Качество доменного графита (графитовой спели) не уступает природному, наиболее дорогому чешуйчатому графиту, по которому в стране имеется существенный дефицит.

3. Переработка графитсодержащей пыли обусловлена входящими в ее состав компонентами и их свойствами, включает такие операции, как сортировка по крупности, магнитное обогащение, флотация, пневматическое обогащение и обезвоживание и не представляет особых затруднений. В результате организации производства по переработке графитовой пыли может быть получен широкий спектр возможных марок графита: литейный, коллоидный, аккумуляторный, смазочный.

4. Существуют реальные возможности повышения технологических показателей переработки графитсодержащей пыли с использованием современного измельчительного и обогащательного оборудования, флотационных реагентов и расширения области использования полученных графитовых концентратов вплоть до производства из них современных углеродных материалов. Вовлечение графитсодержащей пыли металлургического производства в переработку позволит предприятиям черной металлургии решить многие ресурсные, экологические и экономические вопросы, такие как: обеспеченность собственным высококачественным графитовым сырьем металлургических предприятий и других углеграфитовых производств, сокращение потерь с отходами железа, утилизация отходов производства и сохранение качества окружающей среды, получение дополнительной прибыли от реализации продукции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Назаренко Л.Н., Бузунова Т.А., Шихов Н.В. Особенности обогащения графитовых руд Тополихинского участка месторождения "Союзное" с целью получения крупночешуйчатого концентрата // Материалы XXI Междунар. научно-технич. конф. "Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья". — Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2016. С. 37–41.
2. 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. Вип. 22. С. 41–44.
3. Бодряга В.В., Недопекин Ф.В., Белоусов В.В. Экологическая проблема утилизации графитной спели при переливах чугуна // Безопасность в техносфере: сб. статей / науч. ред. В.М. Колодкин. — Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2018. С. 154–163.
4. Южаков Б.А., Маслов В.А. Исследование физико-химических и технологических свойств дисперсных железографитовых отходов ОАО "Азовсталь" // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 1998. Вип. 6. С. 30–34.
5. Перепелицын В.А., Юксеева И.В., Остряков Л.В. Техногенное сырье Урала для производства огнеупоров // Огнеупоры и техническая керамика. 2009. № 6. С. 50–53.
6. Frost R. The Recovery of Kish Graphite from Secondary Sources // Thesis submitted to the University of Birmingham for the Degree of Master of Research. School of Chemical Engineering. College of Engineering and Physical Sciences. December 2014.
7. Karklit A.K., Aboskalov A.N. Graphite from metallurgical dust // Огнеупоры и техническая керамика. 1998. № 9. Р. 27–29.
8. Толочко А.И., Савин В.И., Супрун Ю.М., Хайрутдинов Р.М. Утилизация пылей и шламов в черной металлургии. — Челябинск: Металлургия, Челябинское отд-е, 1990. — 152 с.
9. Олейник Т.А., Дзюба О.И., Харитонов В.Н., Кулаков Е.В. Химическое обогащение графитсодержащих продуктов // Наукові праці ДонНТУ. 2007. Вип. 15 (131). Серія: Гірничо-електромеханічна. С. 139–144.
10. Шулепов С.В. Физика углеграфитовых материалов. — М.: Металлургия, 1972. — 256 с.
11. Островский В.С., Виргильев Ю.С., Костиков В.И., Шипков Н.Н. Искусственный графит. — М.: Металлургия, 1986. — 272 с.
12. Маслов В.А., Трофимова Л.А., Дан Л.А. Новое направление переработки дисперсных железографитовых отходов металлургического производства // Вісник Приазовського державного технічного університету. 2008. Вип. 18. С. 32–36.
13. Маслов В.А., Трофимова Л.А., Дан Л.А. Особенности подготовки к переработке дисперсных железографитовых отходов отделения десульфурации // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2010. Вип. 20. С. 144–148.
14. Маслов В.А., Трофимова Л.А., Дан Л.А. Исследование и анализ магнетизирующего обжига дисперсных ЖГО в гравитационно-падающем слое // Вісник Приазовського державного технічного університету. 2007. Вип. 17. С. 93–96.
15. Кравец В.А., Темнохуд В.А., Насанова Ю.В. Исследование графитсодержащей пыли металлургических заводов // Сборник научных трудов Донецкого национального технического университета — 2012. Сер.: Металлургия.

[Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://steeltimes.ru/conferences/sbornikistatey/2012/donntu2012met/donntu2012met.php>.

16. Кравец В.А., Максимов В.Г. Графитоулавливание и утилизация уловленной пыли // *Збірник наукових праць ДонНАБА*. 2016. Вип. 2 (3). С. 12–15.
17. Чижевский В.Б., Фадеева Н.В., Гмызина Н.В. Влияние состава и свойств реагентов на флотацию графита // *Изв. вузов. Горный журнал*. 2018. № 3. С. 82–89.
18. Эткинс П. Молекулы / Пер. с англ. — М.: Мир, 1991. — 216 с.
19. Чижевский В.Б., Фадеева Н.В. Изучение действия вспенивателя РАС при флотации графита // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2003. № 4. С. 37–41.
20. Чижевский В.Б., Фадеева Н.В., Куранов П.В. Процессы вторичного обогащения графита в пенном слое и влияние на них реагентов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2003. № 8. С. 160–162.
21. Рубинштейн Ю.Б. Применение колонной флотомашин для получения малозольных концентратов // *Кокс и химия*. 1993. № 5. С. 3–6.
22. Кунакбаев В.Р. Исследование флотации графита в колонных машинах с эжекторными аэраторами: дис. ... канд. техн. наук. — Магнитогорск, 1995. — 164 с.
23. ГОСТ 17022–81. Графит. Типы, марки и общие технические требования.

Поступила 29 марта 2019 г.

REFERENCES

1. Nazarenko L.N., Buzunova T.A., Shikhov N.V. *Osobennosti obogashcheniya grafitovykh rud Topolikhinskogo uchastka mestorozhdeniya "Soyuznoe" s tsel'yu polucheniya krupnocheshuichatogo kontsentrata* [Features of the enrichment of graphite ores in the Topolinsky area of the Soyuznoe deposit in order to produce large-scale concentrate]. *Materialy XXI Mezhdunar. nauchno-tekhnich. konf. "Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogenogo syr'ya"* [Proc. of the XXI Intern. scientific and technical conf. "Scientific bases and practice of processing ores and technogenic raw materials"]. Ekaterinburg: Fort Dialog-Iset', 2016, pp. 37–41. (In Russ.).
2. Maslov V.A., Dubovkina M.Yu., Khlestova O.A. The use of mathematical models to reduce the temperature of hot metal to determine the yield of carbon-containing waste. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*, 2011, no. 22, pp. 41–44. (In Ukr.).
3. Bodryaga V.V., Nedopekin F.V., Belousov V.V. *Ekologicheskaya problema utilizatsii grafitnoi speli pri perelivakh chuguna* [The environmental problem of utilization of graphite sang during hot metal castings]. *Bezopasnost' v tekhnosfere: sb. statei* [Safety in the technosphere: Sat. articles]. Kolodkin V.M. ed. Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2018, pp. 154–163. (In Russ.).
4. Yuzhakov B.A., Maslov V.A. Study of the physicochemical and technological properties of dispersed iron graphite wastes of OJSC Azovstal. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*, 1998, no. 6, pp. 30–34. (In Ukr.).
5. Perepelitsyn V.A., Yukseeva I.V., Ostryakov L.V. Man-caused raw materials of the Urals for the production of refractories. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 2009, no. 6, pp. 50–53. (In Russ.).
6. Frost R. The Recovery of Kish Graphite from Secondary Sources. *Thesis submitted to the University of Birmingham for the Degree of Master of Research. School of Chemical Engineering. College of Engineering and Physical Sciences*, December 2014.
7. Karklit A.K., Aboskalov A.N. Graphite from metallurgical dust. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 1998, no. 9, pp. 27–29. (In Russ.).
8. Tolochko A.I., Savin V.I., Suprun Yu.M., Khairutdinov R.M. *Utilizatsiya pylei i shlamov v cherno metallurgii* [Utilization of dusts and sludges in ferrous metallurgy]. Chelyabinsk: Metallurgiya. Chelyabinskoe otdelenie, 1990, 152 p. (In Russ.).
9. Oleinik T.A., Dzyuba O.I., Kharitonov V.N., Kulakov E.V. Chemical enrichment of graphite-containing products. *Наукові праці ДонНТУ. Серія: Гірничо-електромеханічна*, 2007, no. 15 (131), pp. 139–144. (In Ukr.).
10. Shulepov S.V. *Fizika uglegrafitovykh materialov* [Physics of carbon-graphite materials]. Moscow: Metallurgiya, 1972, 256 p. (In Russ.).
11. Ostrovskii V.S., Virgil'ev Yu.S., Kostikov V.I., Shipkov N.N. *Iskusstvennyi grafit* [Artificial graphite]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 272 p. (In Russ.).
12. Maslov V.A., Trofimova L.A., Dan L.A. New direction of processing dispersed iron graphite wastes of metallurgical production. *Вісник Приазовського державного технічного університету*, 2008, no. 18, pp. 32–36. (In Ukr.).
13. Maslov V.A., Trofimova L.A., Dan L.A. Features of preparation for the processing of dispersed iron graphite wastes from the desulfurization department. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*, 2010, no. 20, pp. 144–148. (In Ukr.).
14. Maslov V.A., Trofimova L.A., Dan L.A. Study and analysis of magnetizing roasting of dispersed IGW in a gravitational-falling layer. *Вісник Приазовського державного технічного університету*, 2007, no. 17, pp. 93–96. (In Ukr.).
15. Kravets V.A., Temnokhud V.A., Nasanova Yu.V. *Issledovanie grafitosoderzhashchei pyli metallurgicheskikh zavodov* [Study of graphite-containing dust of metallurgical plants]. *Sbornik nauchnykh trudov Donetskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universitetu. Ser. Metallurgiya*, 2012. Electronic resource. Available at: <https://steeltimes.ru/conferences/sbornikistatey/2012/donntu2012met/donntu2012met.php>. (In Russ.).
16. Kravets V.A., Maksimov V.G. Graphite collection and disposal of dust. *Збірник наукових праць ДонНАБА*, 2016, no. 2 (3), pp. 12–15. (In Russ.).

17. Chizhevskii V.B., Fadeeva N.V., Gmyzina N.V. Effect of composition and properties of reagents on flotation of graphite. *Izvestiya VUZov. Gornyi zhurnal*, 2018, no. 3, pp. 82–89. (In Russ.).
18. Etkins P. *Molekuly* [Molecules]. Moscow: Mir, 1991, 216 p. (In Russ.).
19. Chizhevskii V.B., Fadeeva N.V. Study of the effect of the blowing agent RAS in graphite flotation. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*, 2003, no. 4, pp. 37–41. (In Russ.).
20. Chizhevskii V.B., Fadeeva N.V., Kuranov P.V. The processes of secondary enrichment of graphite in the foam layer and the effect on them of reagents. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, 2003, no. 8, pp. 160–162. (In Russ.).
21. Rubinshtein Yu.B. The use of flotation column for low-ash concentrates production. *Koks i khimiya*, 1993, no. 5, pp. 3–6. (In Russ.).
22. Kunakbaev V.R. *Issledovanie flotatsii grafita v kolonnykh mashinakh s ezhektornymi aeratorami: dis. ... kand. tekhn. nauk* [The study of graphite flotation in column machines with ejector aerators. Cand. Sci. Diss.]. Magnitogorsk, 1995, 164 p. (In Russ.).
23. *GOST 17022–81. Grafit. Tipy, marki i obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [State Standard 17022–81. Graphite. Types, grades and general technical requirements]. (In Russ.).

Received March 29, 2019