

РАЗРАБОТКА И ПРОМЫШЛЕННАЯ АДАПТАЦИЯ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МАГНЕТИТ-ГЕМАТИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА ИЗ ТЕХНОГЕННОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ

А.В. Фомин¹, М.С. Хохуля¹

¹ Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия, e-mail: fomin5-49@mail.ru

Аннотация: Рассмотрены результаты исследований, направленных на разработку ресурсосберегающей технологии обогащения складированных хвостов, образованных в результате переработки руд Заимандровской группы месторождений. На основании выявленных закономерностей вещественного состава пробы хвостов показана целесообразность их предварительной классификации по классу крупности 0,63 мм, что обеспечило повышение массовой доли железа и снижение количества сростков ценных минералов в исходном питании, поступающем на обогатительный передел, при незначительных потерях рудных минералов с надрешетным продуктом грохочения. Выбраны и обоснованы компоновочные решения по аппаратурному оформлению гравитационного оборудования предлагаемой технологической схемы, включающей в себя три стадии винтовой сепарации, которая обеспечивает стабильное получение железорудного концентрата, как из рядового, так и из бедного исходного техногенного сырья. Произведена оценка перспектив применения магнитной сепарации в слабом поле для выделения магнетитового концентрата. В результате проведенных работ предложены два варианта ресурсосберегающих технологий переработки материала хвостохранилища: гравитационная и магнитно-гравитационная, которые обеспечили получение железорудного концентрата качеством 65% и 62% по железу общему при извлечении 59% и 62% по данному компоненту соответственно.

Ключевые слова: техногенные отходы обогащения, складированные хвосты, железистые кварциты, гематит, магнетит, гравитационное обогащение, винтовая сепарация, магнитная сепарация, грохочение, железорудный концентрат.

Для цитирования: Фомин А. В., Хохуля М. С. Разработка и промышленная адаптация ресурсосберегающей технологии получения магнетит-гематитового концентрата из техногенного железорудного сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 1. – С. 80–93. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_80.

Development and industrial adaptation of a resource-saving technology for magnetite–hematite concentrate production from manmade iron-ore feedstock

A.V. Fomin¹, M.S. Khokhulya¹

¹ Mining Institute, Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences,
Apatity, Russia, e-mail: fomin5-49@mail.ru

Abstract: The studies aimed at development of a resource-saving processing technology for Zaimandrovsky ore concentration tailings put into storage. Based on the revealed patterns of material composition of tailings samples, it is expedient to perform preliminary classification of the tailings by the size grade of 0.63 mm, which ensures the increase in the mass fraction of iron and the reduction in the aggregation of valuable minerals in the original feed of separation at minor ore loss with screen overflow. Layouts of the gravity preparation equipment for the proposed process flowsheet are selected and validated. The flowsheet includes three stages of spiral separation which ensures stable production of iron ore concentrate from both commercial-grade and low-grade manmade initial raw material. The prospects of weak-field magnetic separation for the magnetite concentrate production are assessed. As a result of the accomplished research, two versions of a resource-saving technology for processing of tailings are proposed: gravity separation and magnetic gravity separation. These technologies enabled production of iron ore concentrates with the iron contents of 65% and 62% at the recovery of 59% and 62%, respectively.

Key words: manmade tailings, tailings put in storage, ferruginous quartzite, hematite, magnetite, gravity separation, spiral separation, magnetic separation, screening, iron ore concentrate.

For citation: Fomin A. V., Khokhulya M. S. Development and industrial adaptation of a resource-saving technology for magnetite-hematite concentrate production from manmade iron-ore feedstock. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(1):80-93. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_80.

Введение

Переработка техногенных отходов железорудных производств с целью получения дополнительных объемов продукции является важным фактором интенсификации недропользования по причине повышения потенциала и эффективности использования собственного минерально-сырьевого комплекса без увеличения добычи первичного сырья, снижения совокупных издержек на производство, сокращения темпов развития сырьевой базы и мощностей по ее освоению. Таким образом, утилизация горнопромышленных отходов является мощным резервом повышения эффективности использования минеральных ресурсов [1].

В качестве примера возможного вовлечения в переработку железосодержащих хвостов можно привести выполненные исследования на пробах, отобранных с различных участков хвостохранилища

Лебединского ГОКа [2]. В результате проведения химического и гранулометрического анализов отобранных проб выявлено, что хвосты весьма неоднородны по содержанию железа и гранулометрическому составу. По мере удаления от точки сброса пульпы содержание железа общего в пробах снижается с 20,61% до 13,25%, а доля мелких фракций ($-0,071$ мм) возрастает с 40,54% до 72,5%. На основании изучения вещественного состава отходов обогащения была разработана технология их переработки. Она включает в себя две стадии мокрой магнитной сепарации с доизмельчением черного концентрата, а также использование трех стадий гравитационного обогащения хвостов, полученных после второй стадии магнитной сепарации. Обогащение железосодержащих хвостов по предложенному варианту схемы позволило получить концентрат с содержанием от 53,01% до 66,02% Fe_{общ.} в

зависимости от содержания данного компонента в исходном питании схемы. Извлечение по $Fe_{\text{общ}}$ составило 18–52%, а по $Fe_{\text{магн}}$ более 73%.

Проведены работы по изучению лежалых хвостов, размещенных на юге Красноярского края в хвостохранилище ОАО «Краснокаменский рудник» [3]. В разрезе намывной техногенной толщи хвостохранилища Краснокаменского рудника выделяется два горизонта. Верхний, мощностью до 10 м, характеризуется средним содержанием железа общего 17%. Рудная минерализация относится к гематит-магнетитовому типу. Нижний горизонт, в интервале от 10,0 до 30,0 м, характеризуется средним содержанием железа общего от 29 до 35%. Рудная минерализация в толще горизонта имеет магнетит-гематит-гетитовый состав. Исследованиями на обогатимость двух проб хвостов, отобранных из различных горизонтов, в качестве основных методов обогащения рекомендовано использовать комбинированную гравитационно-магнитную технологию.

В работе [4] изложены основные результаты лабораторных исследований по извлечению гематита из хвостов мокрой магнитной сепарации АО «Михайловский ГОК». Представленная для испытаний проба состояла из материала крупностью до 75% класса менее 0,045 мм с содержанием железа 26,7%. Основным рудным минералом в ней являлся тонкозернистый гематит, содержание которого составило более 30%, и он имел среднюю крупность зерна 30 мкм, причем только 22% гематита находилось в раскрытом состоянии. На основании проведенных исследований были рекомендованы две технологические схемы:

- флотационная, с доводкой флотационного концентрата высокоинтенсивной мокрой магнитной сепарацией, которая обеспечила выделение концентрата

с содержанием $Fe_{\text{общ}}$ до 64% при извлечении от исходного питания по данной форме железа 28,1%;

- магнитно-флотационная, с обратной катионной флотацией магнитной фракции, которая позволила выделить концентрат с содержанием 64,1% $Fe_{\text{общ}}$ при извлечении 29,4%.

В статье [5] рассматривается вопрос доизвлечения полезных компонентов из отходов производства на примере Камыш-Бурунского обогатительного комбината. Проведены исследования вещественного состава проб шламохранилища и пробы породного отвала комбината. Характеризуя минеральный состав проб шламохранилища, можно отметить преобладание в них слюдисто-глинистых фаз, кварца, карбонатов и полевых шпатов. Содержание магнетита в пробе составило около 1,68%, а железа в пересчете на Fe_2O_3 — 8,54%. Проба породного отвала комбината представлена оолитами, гидрогетитом, железосодержащим-хлоритом, а также кварцем и полевыми шпатами; содержание магнетита — 1,14%, железа в пересчете на Fe_2O_3 — 55%. Магнитное обогащение глубинных слоев шламохранилища позволило получить железосодержащие концентраты с содержанием железа до 58% и отвальные хвосты, содержащие менее 5% железа. Для обогащения отвального материала предлагается использовать гравитационно-промывочную технологию с выделением класса –0,4 мм, что позволит получить концентрат, содержащий около 58% железа. Произведена плавка полученного материала в лабораторной печи по технологии РОМЕЛТ с опытной отливкой чугуна.

За рубежом также интенсивно проводятся исследования по переработке отходов обогащения железных руд. В частности, в работе [6] анализируется возможность вовлечения в производство лежалых хвостов, расположенных в про-

винции Quadrilátero Ferrífero (Бразилия). Приведена характеристика пробы складированных хвостов отсадки, расположенных на северо-западе провинции: $d_{80} = 4$ мм, $d_{50} = 1,1$ мм; массовое содержание железа — 30,3%; основные минералы представлены кварцем, гематитом, гетитом, магнетитом, каолинитом и апатитом. Использование высокоинтенсивной магнитной сепарации позволило выделить концентрат с содержанием и извлечением $Fe_{\text{общ}}$ более 40% и 64% соответственно. Дальнейшая перемелка полученного черного концентрата, по мнению авторов, может быть выполнена при помощи магнитной сепарации в более слабом поле, обратной флотации; также как альтернативный вариант рассматривается вариант шихтовки полученного черного концентрата с богатыми концентратами.

Ряд работ в Китае посвящен использованию процесса пенной флотации [7], обратной анионной флотации кварца [8] и магнитной сепарации [9] с целью доизвлечения железа из складированных хвостов обогащения железных руд. Наиболее высоких показателей удалось достичь авторам работы [10]. Проба хвостов была отобрана в хвостохранилище в городском округе Anshan (Liaoning Province). Содержание SiO_2 в пробе составило 47,39%, Fe_2O_3 — 24,82%, CaO — 8,85%, Al_2O_3 — 7,42%. Основные минералы пробы были идентифицированы как кварц, гематит, кальцит, слюда и каолинит. Выделение гематита производилось при помощи обжиг-магнитного метода, измельчения и магнитной сепарации. Удалось выделить концентрат с содержанием железа 61,3% при извлечении 88,2%.

В статье [11] изучена возможность получения магнетитового концентрата из железорудных отходов месторождения Kesikköprü (Анкара, Турция). В ходе исследования использовались пробы

с хвостохранилища, содержащие 5,91% Fe_3O_4 . Минералогический анализ образца показал, что магнетит и гематит были основными рудными минералами, а актимолит, тремолит, эпидот, хлорит, кварц, кальцит и доломит идентифицированы как породные минералы. Используя низкоинтенсивный метод магнитной сепарации на лабораторном образце сепаратора Дэвиса, был получен концентрат, содержащий 65,95% Fe_3O_4 , из сырья с крупностью 100% — 106 мк с извлечением 86,21% Fe_3O_4 при индукции магнитного поля 0,1 Тл. Содержание и извлечение $Fe_{\text{общ}}$ составили 67,0% и 30,2% соответственно.

Большое число работ посвящено использованию отходов железндобывающих предприятий в производстве керамики [12], цемента [13], кирпича [14], закладочных смесей [15], пигментов [16] и нанопорошков [17].

Таким образом, доизвлечение железосодержащих минералов из складированных отходов обогатительных фабрик является перспективной и актуальной задачей вследствие снижения качества железных руд и запасов богатых руд [18], при одновременной необходимости увеличения объемов производимых железорудных концентратов. Переработка материала техногенных месторождений позволит снизить нагрузку на окружающую среду, что улучшит экологическую обстановку в горнодобывающем районе.

Подобная проблема актуальна и для Оленегорского ГОКа, перерабатывающего железистые кварциты Заимандровской группы месторождений: в связи с истощением минерально-сырьевой базы предприятию приходится рассматривать возможность вовлечения в эксплуатацию нетрадиционных источников минерального сырья, представленных материалом хвостохранилищ. На его территории расположено два хвостохранилища: основное и аварийное. Результаты

исследований по разработке технологии получения железорудного концентрата из материала основного хвостохранилища приведены в работе авторов [19]. Однако наиболее перспективным с точки зрения освоения является аварийное хвостохранилище — по причинам непосредственной близости к промышленной площадке (около 300 м), а также более высокого содержания ценных минералов по сравнению с материалом основного хвостохранилища. В результате ранее проведенных работ, итоги которых представлены в статье [20], была предложена магнитно-гравитационная технология обогащения данного техногенного сырья. Она предусматривает двухстадийную магнитную сепарацию с доизмельчением магнитной фракции первой стадии обогащения для выделения магнетитового концентрата.

Получение гематитового концентрата осуществляется с использованием трех операций винтовой сепарации, доизмельчением ее промпродукта и перемелыванием черновых концентратов на столе. Несмотря на достижение высоких технологических показателей обогащения (содержание $Fe_{\text{общ}}$ в концентрате 65,9%, извлечение $Fe_{\text{общ}}$ — 76,5%) при реализации предложенной схемы, она характеризуется рядом недостатков, а именно:

- использование двух ресурсоемких операций измельчения для раскрытия сростков ценных минералов в промежуточных продуктах обогащения приводит к существенному увеличению эксплуатационных затрат на переработку исходного сырья;

- разветвленность технологической схемы обуславливает высокие капитальные затраты на внедрение технологии и также требует значительных эксплуатационных затрат на обслуживание оборудования и перекачку продуктов обогащения;

- применение концентрационных столов должно обеспечиваться использованием для их размещения большой площади, учитывая их низкую удельную производительность, что совместно с установкой другого промышленного крупногабаритного оборудования создает определенные трудности аппаратурной компоновки в существующих корпусах обогатительного производства.

В связи с данными обстоятельствами была поставлена задача оптимизации технологии переработки хвостов с целью ее адаптации к существующим производственным условиям, а именно: сокращение технологической цепочки, отказ от использования мельниц и концентрационных столов.

Объекты и методы исследования

Исследования по обоснованию ресурсосберегающей технологии переработки железосодержащих отходов проводились на примере материала аварийного хвостохранилища дробильно-обогатительной фабрики АО «Олкон». Площадь, занимаемая данным хвостохранилищем, составляет около 250 га, а запасы песков находятся на уровне 8 млн т. В первые годы работы обогатительной фабрики, в период освоения новой технологии, в данное хвостохранилище складировались хвосты обогащения, богатые гематитом. С вводом в эксплуатацию основного хвостохранилища в аварийное хвостохранилище стали поступать смывные воды, переливы зумпфов, сливы отстойников, в том числе и с участка обезвоживания железорудного концентрата [21]. Гранулометрический состав и содержание оксидов железа в залежи неравномерные. При сбросе пульпы на рельеф более легкая и тонкая фракция уносится водой на значительное расстояние, а более крупная и тяжелая (рудные зерна магнетита, гематита, сростки рудных зерен с нерудными,

крупные вкрапленники, а также крупные — более 1 мм — нерудные зерна) оседает в непосредственной близости от места сброса хвостов. Эта общая закономерность не всегда выдерживается, поскольку напор пульпы и ее состав нестабильны. По этой причине наблюдается неравномерность в отложении легкой и тяжелой фракции по площади. На отдельных участках происходит переотложение легкой и тяжелой фракций из-за миграции русловых потоков по площади песков. В этих руслах и на прилегающей к ним территории происходит переувлажнение хвостов на глубину и их резкое обогащение оксидами железа.

По результатам исследования представительной пробы хвостов, отобранной бурением сети скважин на хвостохранилище, содержание различных форм железа в данном материале составило: 19,39% Fe_{общ.}; 10,42% Fe_{магн.} и 4,91% Fe_{гем.}. Гранулометрический состав пробы с содержанием в ней различных фаз железа представлен в табл. 1.

Полученные результаты показывают, что основная часть материала пробы представлена частицами крупностью

Таблица 1

Гранулометрическая и химическая характеристика средней пробы складированных хвостов из аварийного хвостохранилища
Granulometric and chemical characteristics of the average sample of stockpiled tailings from the emergency tailings dump

Классы крупности, мм	Выход, %	Содержание, %			Распределение, %		
		Fe _{общ.}	Fe _{магн.}	Fe _{гем.}	Fe _{общ.}	Fe _{магн.}	Fe _{гем.}
+1,6	3,0	7,58	2,39	1,21	1,2	0,7	0,7
-1,6+1,0	2,2	7,23	1,87	1,05	0,8	0,4	0,5
-1,0+0,63	4,2	6,82	1,46	0,73	1,5	0,6	0,6
-0,63+0,315	15,2	8,75	2,15	2,91	6,8	3,1	9,0
-0,315+0,2	27,6	12,57	4,6	4,02	17,9	12,2	22,6
-0,2+0,1	29,7	27,38	15,2	7,57	42,0	43,3	45,9
-0,1+0,071	7,9	37,44	26,67	7,6	15,2	20,2	12,2
-0,071	10,2	27,73	19,89	4,08	14,6	19,5	8,5
Итого:	100,0	19,39	10,42	4,91	100,0	100,0	100,0

–0,63+0,1 мм, выход которых составляет 72,5%. Значительная часть общего и магнитного железа в пробе распределена в классе крупности –0,315 мм: 89,7% и 95,2% соответственно. Гематитовое железо сконцентрировано в классе крупности –0,315+0,071 мм, по распределению в данную фракцию оно составило 80,6%. Следует также отметить довольно низкое распределение ценных компонентов в классе крупности +0,63 мм: 3,5% Fe_{общ.}; 1,7% Fe_{магн.} и 1,8% Fe_{гем.}, что свидетельствует о возможности вывода в голову процесса обогащения материала данной крупности в отвал при незначительных потерях железа с надрешетным продуктом грохочения.

По данным минералогического анализа, содержание магнетита в пробе составило 14,0%, а гематита — 7,8%. Основными породными минералами пробы являются: кварц с массовой долей 42,4% и силикаты, представленные полевыми шпатами (14,6%), амфиболами и пироксенами (16,2%) и слюдами (3,6%).

Результаты минералого-технологического изучения исходных хвостов в узких классах крупности по степени

Таблица 2

Степень раскрытия гематита и магнетита по узким классам крупности в пробе хвостов
The degree of liberation of hematite and magnetite by narrow size classes in the tailings sample

Классы крупности, мм	Выход, %	Содержание магнетита, %		Содержание гематита, %	
		свободный	в сростках	свободный	в сростках
+1,6	3,0	0	100	0	100
-1,6+1,0	2,2	0	100	30	70
-1,0+0,63	4,2	15	85	80	20
-0,63+0,315	15,2	55	45	90	10
-0,315+0,20	27,6	70	30	95	5
-0,20+0,10	29,7	85	15	95	5
-0,10+0,071	7,9	90	10	97	3
-0,071	10,2	95	5	98	2
Итого:	100,0	70	30	90	10

раскрытия в них магнетита и гематита приведены в табл. 2.

Представленные данные свидетельствуют о том, что общее содержание свободного магнетита в пробе составляет 70% и около 99% его распределено в материале мельче 0,63 мм; при этом содержание свободного гематита составляет 90%, а примерно 95% его находится в материале мельче 0,63 мм. Данный факт также указывает на целесообразность вывода из процесса обогащения материала крупностью более 0,63 мм, который представлен сростковой фракцией и требует доизмельчения.

Минеральный состав пробы определялся рентгенофазовым анализом на дифрактометре D2 Phaser, оценка степени раскрытия минеральных частиц производилась комбинированный методом (весовой, оптико-геометрический) с использованием стереоскопического микроскопа Leica MZ-6.

В ходе лабораторных опытов по гравитационному и магнитному обогащению исходных хвостов применялся винтовой шлюз ШВ-500, магнитные сепараторы МБС-Л и 120Т.

Результаты исследования и их обсуждение

На основании выявленных особенностей вещественного состава пробы хвостов, а именно: малое содержание и распределение ценных компонентов в класс крупности +0,63 мм, а также высокая доля сростковой фракции ценных минералов в нем, обосновано предварительное грохочение исходного питания по крупности 0,63 мм, что обеспечило повышение массовой доли железа в исходном материале на 1–2% с одновременным уменьшением доли сростков магнетита и гематита на 5–7% и удалением из процесса обогащения около 10% материала с надрешетным продуктом грохота, представленного непродуктивной сростковой фракцией. При этом потери $Fe_{\text{общ.}}$ с ним составили 3,6%, а для $Fe_{\text{магн.}}$ и $Fe_{\text{гем.}}$ данный показатель не превысил 2%.

В качестве основного способа разделения исходных хвостов предложено использование винтовой сепарации, которая характеризуется высокой удельной производительностью на единицу занимаемой площади, не потребляет до-

полнительных объемов электроэнергии и воды, что обуславливает низкие затраты на ее внедрение и эксплуатацию, а также соответствует принципу ресурсосбережения при переработке хвостов. В результате укрупненных лабораторных опытов по обогащению пробы массой около 200 кг была разработана гравитационная технология переработки складированного материала хвостохранилища, базирующаяся на введении трех стадий винтовой сепарации (рис. 1).

Несмотря на существенное сокращение числа технологических операций, предложенная технология переработки песков аварийного отстойника обеспечила получение магнетит-гематитового концентрата с приемлемыми качественно-количественными показателями: выход железорудного концентрата составил 21,2% при содержании $Fe_{общ.}$ в нем 65,3% и извлечении $Fe_{общ.}$, $Fe_{магн.}$ и $Fe_{гем.}$ 64,7%; 79,3% и 67,5% соответственно.

Введение дополнительных стадий винтовой сепарации в схему не привело к положительным результатам по причине накопления в промпродуктах сростков ценных минералов с пустой породой, а также минералов промежуточной плотности — амфиболов и пироксенов,

что не позволило выделить концентрат кондиционного качества.

Как отмечалось выше, при отработке песков аварийного хвостохранилища будет наблюдаться некоторый разброс по одержанию железа в исходном питании схемы в зависимости от расположения зоны ведения добычных работ — можно ожидать снижения массовой доли железа в песках аварийного хвостохранилища по мере удаления от места пульпосброса хвостов. Для оценки влияния на показатели разделения бедных партий песков были проведены дополнительные лабораторные эксперименты по винтовой сепарации материала с содержанием 12,3% $Fe_{общ.}$; 2,6% $Fe_{магн.}$ и 4,2% $Fe_{гем.}$, т.е. при снижении массовой доли общего и магнитного железа примерно в 2 и 4 раз соответственно. Гранулометрический состав пробы и степень раскрытия ценных минералов данного материала в целом соответствовали аналогичным характеристикам представительной пробы хвостов.

В результате проведенных исследований в лабораторных условиях была апробирована схема обогащения складированного материала аварийного хвостохранилища в случае поступления в

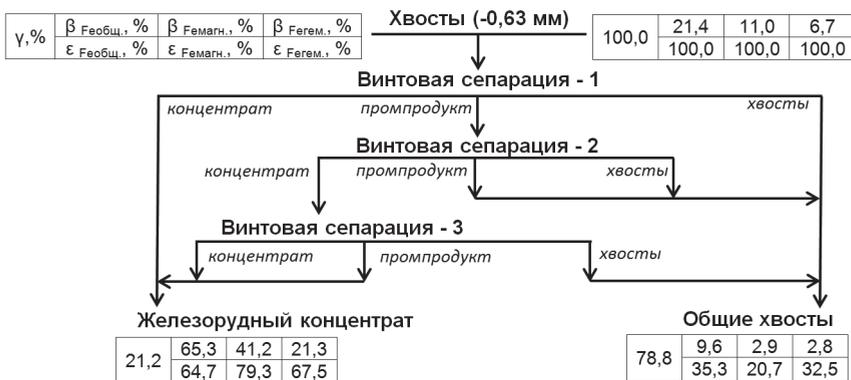


Рис. 1. Схема получения железорудного концентрата из материала хвостохранилища винтовой сепарацией

Fig. 1. Flowsheet for production of iron ore concentrate from the material of the tailing dump by means of spiral separation



Рис. 2. Результаты обогащения бедного материала хвостохранилища

Fig. 2. Results of separation of poor tailings material

переработку песков с низким содержанием ценных компонентов (рис. 2).

По представленным данным можно утверждать, что снижение качества исходного питания отрицательно отражается на качественно-количественных показателях получения итогового железорудного концентрата. Установлено, что при обогащении бедного материала ава-

рийного хвостохранилища массовая доля железа общего в выделяемом концентрате снижается на 5%, а извлечение из него всех форм железа — на величину от 19 до 36%.

С целью повышения извлечения ценных компонентов по разрабатываемой технологии было рассмотрено использование двухстадийной мокрой маг-

Таблица 3

Влияние напряженности магнитного поля на показатели магнитной сепарации хвостов крупностью менее 0,63 мм
Influence of the magnetic field strength on the indicators of magnetic separation of tailings with grain size less than 0.63 mm

Продукт	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
		Fe _{общ.}	Fe _{магн.}	Fe _{общ.}	Fe _{магн.}
Напряженность поля 1600 Э					
Концентрат ММС-1	36,7	35,09	29,99	63,71	99,37
Хвосты ММС-1	63,3	11,59	0,11	36,29	0,63
Концентрат ММС-2	31,4	39,03	34,82	60,63	98,71
Хвосты ММС-2	5,3	11,76	1,37	3,08	0,66
Исходные хвосты (-0,63 мм)	100,0	20,21	11,08	100,0	100,0
Напряженность поля 600 Э					
Концентрат ММС-1	18,0	59,56	55,42	52,19	89,62
Хвосты ММС-1	82,0	11,99	1,41	47,81	10,38
Концентрат ММС-2	17,0	62,31	58,40	51,49	89,06
Хвосты ММС-2	1,0	14,00	6,02	0,70	0,55
Исходные хвосты (-0,63 мм)	100,0	20,56	11,14	100,0	100,0

нитной сепарации (ММС) в голове процесса разделения без доизмельчения.

В ходе лабораторных исследований было установлено, что применение магнитных сепараторов со стандартным значением напряженности магнитного поля (около 1600 Э) не позволяет выделить концентрат кондиционного качества из исходного сырья – содержание железа общего в магнитной фракции не превысило 40%. Поэтому напряженность магнитного поля была понижена до значений на уровне 600 Э, что позволило в результате двух стадий магнитной сепарации получить концентрат качеством около 62% по железу общему. Влияние напряженности магнитного поля сепаратора на качество выделяемого магнетитового концентрата проиллюстрировано в табл. 3.

Гематитовый концентрат выделяется из немагнитной фракции первой стадии магнитной сепарации с использованием трех стадий разделения на винтовых аппаратах, аналогично схемам выше, что

позволило увеличить сквозное извлечение железа общего примерно на 14%, извлечение гематитового железа в итоговый концентрат составило около 50%.

В результате разделения хвостов по разработанной технологии получен железорудный концентрат с массовой долей железа общего около 62% при извлечении по данному компоненту 66,5% (рис. 3).

Использование магнитной сепарации в голове процесса разделения позволило увеличить извлечение магнитной формы железа до 92%, в то время как по гравитационной технологии при переработке аналогичной пробы хвостов этот показатель не превысил 80%.

Сравнивая показатели обогащения хвостов по гравитационной и магнито-гравитационной технологиям (см. рис. 1 и 3), следует также отметить снижение качества концентрата с 65% до 62% по железу общему, что можно связать с переходом в магнитную фракцию сростков магнетита с пустой породой [22].

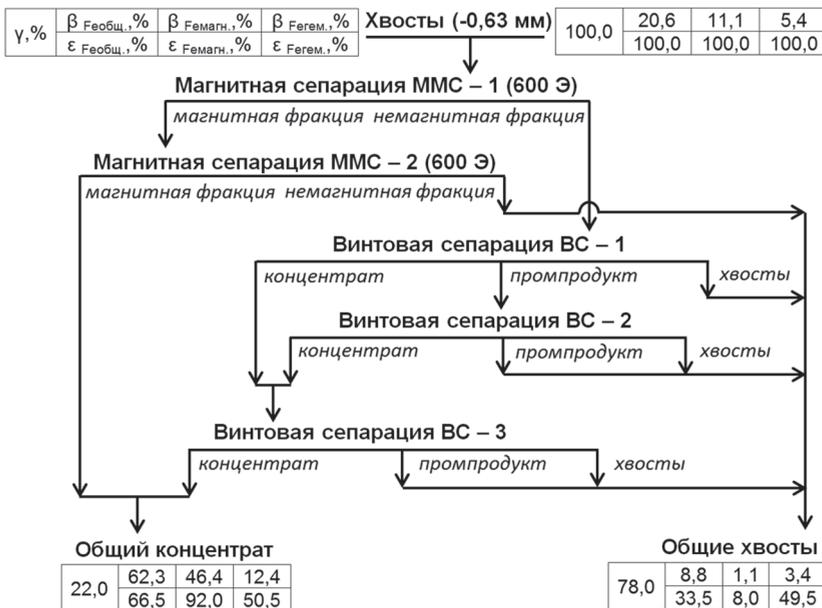


Рис. 3. Магнито-гравитационная схема переработки хвостов

Fig. 3. Magnetic gravity flowsheet for tailings processing

Полученные в ходе лабораторных исследований результаты были использованы при подготовке исходных данных (технологического регламента) для проектирования обогатительной установки по обогащению песков хвостохранилища с целью получения дополнительных объемов железорудного концентрата на действующем производстве. В настоящее время ведется разработка проектной документации, в зависимости от возможности компоновки оборудования в существующих корпусах фабрики будет принято решение о выборе конкретной схемы обогащения.

Заключение

В данной статье рассмотрены результаты лабораторных исследований, направленных на разработку ресурсосберегающей технологии переработки складированных отходов хвостохранилища дробильно-обогатительной фабрики АО «Олкон» с целью выделения из них железорудного концентрата.

В результате изучения особенностей вещественного состава пробы аварийного хвостохранилища обосновано введение предварительного грохочения исходного материала по крупности 0,63 мм, что обеспечит повышение содержания железа и доли раскрытых рудных зерен в питании схемы при незначительных потерях ценных минералов с надрешетным продуктом грохочения, которые представлены непродуктивной сростковой фракцией.

Установлено, что трехстадиальная винтовая сепарация представительной пробы хвостов крупностью менее 0,63 мм обеспечивает выделение готового маг-

нетит-гематитового концентрата с содержанием железа общего около 65% при извлечении по данному компоненту на уровне 65%.

Показано, что при вовлечении в переработку бедного материала хвостохранилища с пониженным содержанием магнетита по разработанной гравитационной технологии ожидается снижение качества концентрата до 60% железа общего, а извлечения — до 29%.

Произведена оценка перспектив применения магнитной сепарации в голове процесса разделения хвостов с целью повышения извлечения магнитной формы железа. Выявлено, что применение стандартной напряженности поля магнитной системы сепаратора не позволяет получить магнетитовый концентрат требуемого качества, что обуславливает необходимость снижения значения напряженности поля до уровня 600 Э.

Предложена магнитно-гравитационная схема переработки хвостов без использования процессов измельчения, которая обеспечила выделение железорудного концентрата с массовой долей железа общего около 62% и его извлечением 66,5%.

По результатам выполненных исследований предложено два варианта ресурсосберегающих схем переработки материала хвостохранилища: гравитационная и магнитно-гравитационная, которые характеризуются низкими капитальными и эксплуатационными затратами на их реализацию по причине отсутствия энергоемкого оборудования, а также компактностью компоновки для использования в существующих цехах обогатительной фабрики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дерягин А. А., Котова В. М., Никольский А. Л. Оценка перспектив вовлечения в эксплуатацию техногенных месторождений // Маркшейдерия и недропользование. — 2001. — № 1 (1). — С. 15–18.

2. Аргимбаев К. Р., Корнев А. В., Холодняков Г. А. Обоснование возможности вовлечения в переработку железосодержащих хвостов с последующим окускованием полученных концентратов // Записки Горного института. — 2013. — Т. 206. — С. 120–124.

3. Целюк Д. И., Жукова В. Е., Ожогина Е. Г., Якушина О. А., Целюк И. Н. Минералогические особенности хвостов мокрой магнитной сепарации железных руд и перспективы извлечения из них железа // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. — 2013. — Т. 6. — № 4. — С. 412–424.

4. Кретов С. И., Губин С. Л., Игнатова Т. В., Сентемова В. А., Безногова Ю. С. Испытания технологии получения гематитовых концентратов из хвостов обогатительной фабрики ОАО «Михайловский ГОК» // Обогащение руд. — 2007. — № 6. — С. 20–24.

5. Юшина Т. И., Крылов И. О., Валавин В. С., Сыса П. А. Исследование возможности получения железосодержащего продукта для технологии РОМЕЛТ из отходов производственной деятельности Камыш-Бурунского ГОКа // Горный журнал. — 2017. — № 7. — С. 68–72. DOI: 10.17580/gzh.2017.06.10.

6. Dauce P. D., de Castro G. B., Lima M. M. F., Lima R. M. F. Characterisation and magnetic concentration of an iron ore tailings // Journal of Materials Research and Technology. 2019, vol. 8, no. 1, pp. 1052–1059. DOI: 10.1016/j.jmrt.2018.07.015.

7. Hanumantha Rao K., Narasimhan K. S. Selective flocculation applied to Barsuan iron ore tailings // International Journal of Mineral Processing. 1985, vol. 14, pp. 67–75. DOI: 10.1016/0301-7516(85)90015-8.

8. Wang Y., Ren J. The flotation of quartz from iron minerals with a combined quaternary ammonium salt // International Journal of Mineral Processing. 2005, vol. 77, pp. 116–122. DOI: 10.1016/j.minpro.2005.03.001.

9. Song S., Lu S., Lopez-Valdivieso A. Magnetic separation of hematite and limonite fines as hydrophobic flocs from iron ores // Minerals Engineering. 2002, vol. 15, pp. 415–422. DOI: 10.1016/S0892-6875(02)00054-7.

10. Li C., Suna H., Baic J., Li L. Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings. Part 1. The recovery of iron from iron ore tailings using magnetic separation after magnetizing roasting // Journal of Hazardous Materials. 2010, vol. 174, pp. 71–77. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.09.018.

Литературу с п. 11 по п. 14 смотри в REFERENCES.

15. Смирнов А. А., Барановский К. В., Рожков А. А., Соломеин Ю. М. Отработка железорудного месторождения технологией с комбинированной закладкой // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 5-1. — С. 62–76. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_62.

16. Galvão J. L. B., Andrade H. D., Brigolini G. J., Peixoto R. A. F., Mendes J. C. Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints // Journal of Cleaner Production. 2018, vol. 200, pp. 412–422. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.313.

17. Darezereshki E., Darban A. K., Abdollahy M. Synthesis of magnetite nanoparticles from iron ore tailings using a novel reduction-precipitation method // Journal of Alloys and Compounds. 2018, vol. 749, pp. 336–343. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.03.278.

18. Трушко В. Л., Трушко О. В. Комплексное освоение железорудных месторождений на основе конкурентоспособных подземных геотехнологий // Записки Горного института. — 2021. — Т. 250. — С. 569–577. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.10.

19. Хохуля М. С., Фомин А. В., Алексеева С. А., Карпов И. В. Ресурсосберегающая технология получения гематитового концентрата из складированных хвостов обогатительного производства АО «Олкон» // Горный журнал. — 2020. — № 9. — С. 85–90. DOI: 10.17580/gzh.2020.09.12.

20. Khokhulya M., Fomin A., Alekseeva S. Recovery of magnetite-hematite concentrate from iron ore tailings // E3S Web of Conferences. 2021, vol. 247, article 01042. DOI: 10.1051/e3sconf/202124701042.

21. Лоцманов В. А., Дмитриенко А. Н., Киселева Т. М., Марков А. Ю. Опыт обогащения отвальных хвостов дробильно-обогащительной фабрики Оленегорского ГОКа // Горная промышленность. — 2003. — № 3. — С. 42–45.

22. Опалев А. С. Повышение качества магнетитовых концентратов на основе магнитно-гравитационной сепарации // Горный журнал. — 2020. — № 9. — С. 72–77. DOI: 10.17580/gzh.2020.09.10. 

REFERENCES

1. Deryagin A. A., Kotova V. M., Nikolsky A. L. Evaluation of the prospects for involving man-made deposits into processing. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2001, no. 1 (1), pp. 15–18. [In Russ].

2. Argimbaev K. R., Kornev A. V., Kholodnyakov G. A. Substantiation of the possibility of involving iron-containing tailings in processing with subsequent agglomeration of the obtained concentrates. *Journal of Mining Institute*. 2013, vol. 206, pp. 120–124. [In Russ].

3. Tselyuk D. I., Zhukova V. E., Ozhogina E. G., Yakushina O. A., Tselyuk I. N. Mineralogical and technological features of tailings of wet magnetic separation of iron ores and prospects for recovery of iron from them. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2013, vol. 6, no. 4, pp. 412–424. [In Russ].

4. Kretov S. I., Gubin S. L., Ignatova T. V., Sentemova V. A., Beznogova Yu. S. Testing of the technology for obtaining hematite concentrates from the tailings of the processing plant of OAO Mikhailovsky GOK. *Obogashchenie Rud*. 2007, no. 6, pp. 20–24. [In Russ].

5. Yushina T. I., Krylov I. O., Valavin V. S., Sysa P. A. Investigation of the possibility of production of iron-containing product for the ROMELT technology from processing wastes of the Kamysh-Burunsky GOK. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 7, pp. 68–72. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.06.10.

6. Dauce P. D., de Castro G. B., Lima M. M. F., Lima R. M. F. Characterisation and magnetic concentration of an iron ore tailings. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019, vol. 8, no. 1, pp. 1052–1059. DOI: 10.1016/j.jmrt.2018.07.015.

7. Hanumantha Rao K., Narasimhan K. S. Selective flocculation applied to Barsuan iron ore tailings. *International Journal of Mineral Processing*. 1985, vol. 14, pp. 67–75. DOI: 10.1016/0301-7516(85)90015-8.

8. Wang Y., Ren J. The flotation of quartz from iron minerals with a combined quaternary ammonium salt. *International Journal of Mineral Processing*. 2005, vol. 77, pp. 116–122. DOI: 10.1016/j.minpro.2005.03.001.

9. Song S., Lu S., Lopez-Valdivieso A. Magnetic separation of hematite and limonite fines as hydrophobic flocs from iron ores. *Minerals Engineering*. 2002, vol. 15, pp. 415–422. DOI: 10.1016/S0892-6875(02)00054-7.

10. Li C., Suna H., Baic J., Li L. Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings. Part 1. The recovery of iron from iron ore tailings using magnetic separation after magnetizing roasting. *Journal of Hazardous Materials*. 2010, vol. 174, pp. 71–77. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.09.018.

11. Güngör K., Atalay M. Ü., Sivrikaya O. Production of magnetite concentrate from iron ore tailings. *Proceedings of the XIV Balkan Mineral Processing Congress. Tuzla, Bosnia and Herzegovina*. 2011, vol. 1, pp. 331–337.

12. Fontes Wanna C., Franco de Carvalho, Jose M. Assessment of the use potential of iron ore tailings in the manufacture of ceramic tiles: From tailings-dams to «brown porcelain». *Construction and Building Materials*. 2019, vol. 206, pp. 111–121. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.052.

13. Tang C., Li K., Ni W. Recovering iron from iron ore tailings and preparing concrete composite admixtures. *Minerals*. 2019, vol. 9, no. 4, pp. 2–14. DOI: 10.3390/min9040232.

14. Li W., Lei G., Xu Y. The properties and formation mechanisms of eco-friendly brick building materials fabricated from low-silicon iron ore tailings. *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 204, pp. 685 – 692. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.309.

15. Smirnov A. A., Baranovsky K. V., Rozhkov A. A., Solomein Yu. M. Mining of an iron ore deposit by technology with a combined stowage. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 5-1, pp. 62 – 76. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_62.

16. Galvão J. L. B., Andrade H. D., Brigolini G. J., Peixoto R. A. F., Mendes J. C. Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints. *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 200, pp. 412 – 422. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.313.

17. Darezereshki E., Darban A. K., Abdollahy M. Synthesis of magnetite nanoparticles from iron ore tailings using a novel reduction-precipitation method. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018, vol. 749, pp. 336 – 343. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.03.278.

18. Trushko V. L., Trushko O. V. Integrated development of iron ore deposits based on competitive underground geotechnologies. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 250, pp. 569 – 577. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.10.

19. Khokhulya M. S., Fomin A. V., Alekseeva S. A., Karpov I. V. Resource-saving technology for hematite concentration from storage mill tailings at Olkon Mining and processing works. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 9, pp. 85 – 90. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.09.12.

20. Khokhulya M., Fomin A., Alekseeva S. Recovery of magnetite-hematite concentrate from iron ore tailings. *E3S Web of Conferences*. 2021, vol. 247, article 01042. DOI: 10.1051/e3sconf/202124701042.

21. Lotsmanov V. A., Dmitrienko A. N., Kiseleva T. M., Markov A. Yu. The experience of beneficiation of waste tailings of the processing plant of the Olenegorsky GOK. *Russian Mining Industry*. 2003, no. 3, pp. 42 – 45. [In Russ].

22. Opalev A. S. Improving quality of magnetite concentrates based on magnetic-gravity separation. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 9, pp. 72 – 77. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.09.10.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фомин Александр Владимирович¹ – канд. техн. наук,

e-mail: fomin5-49@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0366-7439,

Хохуля Михаил Степанович¹ – канд. техн. наук,

e-mail: m.hohulya@ksc.ru,

ORCID ID: 0000-0003-1409-8398,

¹ Горный институт Кольского научного центра РАН.

Для контактов: Фомин А.В., e-mail: fomin5-49@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.V. Fomin¹, Cand. Sci. (Eng.),

e-mail: fomin5-49@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0366-7439,

M.S. Khokhulya¹, Cand. Sci. (Eng.),

e-mail: m.hohulya@ksc.ru,

ORCID ID: 0000-0003-1409-8398,

¹ Mining Institute, Kola Scientific Centre

of Russian Academy of Sciences,

184209, Apatity, Russia.

Corresponding author: A.V. Fomin, e-mail: fomin5-49@mail.ru.

Получена редакцией 17.03.2023; получена после рецензии 05.06.2023; принята к печати 10.12.2023.

Received by the editors 17.03.2023; received after the review 05.06.2023; accepted for printing 10.12.2023.