

УДК 622.7

**ПРОЦЕСС ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗА В КОНЦЕНТРАТ
ИЗ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Ф. Ган¹, К. Пенг¹, Б. Янг²

¹Юньнаньский профессиональный институт энергетических технологий,
E-mail: gfr3316@126.com, 65001, г. Цюйцзин, провинция Юньнань, Китай

²Куньминский университет науки и технологий,
650000, г. Куньмин, провинция Юньнань, Китай

Рассмотрены железосодержащие хвосты обогащения и технология сепарации подвесным вибрационным конусным концентратом. Определены наиболее подходящие технологические параметры оборудования для обогащения экспериментальных образцов. Обнаружен новый способ повторного обогащения твердых отходов, содержащих ценные элементы.

Твердые отходы горного производства, железосодержащие хвосты обогащения, извлечение железа, подвесной вибрационный конусный концентрат

DOI: 10.15372/FTPRPI20200418

Инвестиции Китая в формирование инфраструктуры горнодобывающей промышленности увеличиваются, как и потребность в полезных ископаемых [1]. Продолжительное время из-за низкой эффективности обогащения руды на некоторых горных предприятиях многие ценные элементы, содержащиеся в хвостах обогащения и твердых отходах, не извлекались и не использовались. В Китае насчитывается около 10 млрд т таких твердых отходов с большим количеством различных ценных элементов [2, 3].

В качестве примера рассмотрим железосодержащие хвосты обогащения с весовым содержанием железа 13.0–21.5%. Это огромные потери полезного ископаемого [4]. Неправильная утилизация твердых отходов может привести к экологическим проблемам, загрязнению почвы и воды, что негативно влияет на здоровье населения и окружающую среду [5]. Изменение способа обработки отходов позволит получить из них много ценных элементов [6].

При обогащении железосодержащей руды необходимо разделить железосодержащую фракцию и фракцию пустой породы для получения концентрата с высоким содержанием железа [7]. Наиболее часто используется измельчение, благодаря которому размер частицы породы

Работа выполнена при поддержке Департамента образования Китая (проект № 2018JS670) и Юньнаньского профессионального института энергетических технологий (проект № 2016ZZXA07).

составляет от 100 до 19 мкм [8]. Такие магнитоактивные минералы, как магнетит, концентрируются магнитной сепарацией. Далее применяется гравитационное обогащение для концентрации магнитонеактивных железосодержащих минералов [9]. Традиционные технологии гравитационного обогащения способны эффективно концентрировать крупнофракционные частицы железосодержащего минерала размером более 74 мкм. Тем не менее эффективность извлечения мелкофракционных частиц размером менее 74 мкм неудовлетворительна, в результате чего неизвлеченные железосодержащие минералы остаются в хвостах обогащения и пустой породе [10–12]. Из-за низкой эффективности традиционного обогащения ценные минералы с размером частиц менее 74 мкм не могут быть извлечены и становятся твердым отходом горного производства, что представляет собой значительные потери ресурсов [13].

Некоторые исследовательские группы с целью повышения эффективности извлечения и использования мелкофракционных железосодержащих магнитонеактивных минералов выполнили большой объем работ и внесли вклад в решение данной проблемы. Типовой процесс переработки заключается в технологии сепарации магнетизирующим обжигом. В [14] для получения железного концентрата с весовым содержанием железа 61.3 % и долей извлечения 88.2 % данная технология применена для повторного обогащения железосодержащих отходов. В [15] с помощью центрифуги получен железный концентрат с весовым содержанием железа 62.32 % и долей извлечения 65.02 %. В [16] использована выборочная флокуляция для получения железного концентрата с весовым содержанием железа 65.32 % и долей извлечения 62.08 %. Несмотря на то, что указанные подходы показали неплохие результаты, они характеризуются высокими эксплуатационными затратами, неустойчивостью технологического процесса, негативным влиянием на окружающую среду и т. д.

Цель настоящей работы — анализ характеристик железосодержащих хвостов обогащения с типовых шахт Китая и выявление причины низкой эффективности извлечения ценных минералов из хвостов обогащения. Описан новый низкзатратный, устойчивый, энергоэффективный и экологичный процесс переработки железосодержащих хвостов обогащения до сырьевого материала для производства железного концентрата с содержанием железа, соответствующего или превышающего стандарты китайской промышленности. Для повторного обогащения хвостов применялся подвесной вибрационный конусный HVC-концентратор. Проанализированы и оптимизированы факторы, влияющие на показатели обогащения.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Материалом исследования служили хвосты обогащения сырой руды после измельчения, магнитной сепарации и гравитационной сепарации, полученные из железорудной шахты “The Kunming Iron and Steel Group Dahongshan” (Китай). Химический состав образцов:

Компонент	Fe	Sn	Cu	CaO	Mg ₂ O	Na ₂ O	K ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂
Содержание, %	17.81	0.05	0.09	3.53	3.78	2.35	0.93	11.06	58.76

Основным элементом, содержащимся в образце, является железо с весовым содержанием 17.81 %, т. е. повторное обогащение целесообразно ввиду относительно высокого его содержания. Для определения формы железа в образцах хвостов обогащения и распределения железа по размеру частиц выполнен фазовый и фракционный анализы образца (табл. 1 и 2).

ТАБЛИЦА 1. Фазовый анализ образца, %

Показатель	Фаза железа				
	Магнетит	Гематит	Лимонит	Пирит	Итого железа
Весовое содержание железа	0.63	11.68	4.87	0.63	17.81
Доля распределения	3.53	65.58	27.33	3.56	100.00

Железо в образцах хвостов обогащения содержится в форме гематита и лимонита. В совокупности они дают 92 % весового содержания железа. Фазовый анализ показал, что традиционная магнитная сепарация не способна эффективно извлечь магнитонеактивный гематит.

ТАБЛИЦА 2. Фракционный анализ образца, %

Размер частицы, мкм	Доля частиц в материале	Содержание железа	Доля распределения железа
+ 74	14.87	8.02	6.70
- 74 + 37	23.80	17.57	23.48
- 37 + 19	22.56	19.77	25.04
- 19	38.77	20.57	44.78
Сырой материал	100.00	17.81	100.00

При уменьшении размера частиц увеличивается содержание железа в образце, т. е. традиционное гравитационное обогащение не способно эффективно извлечь мелкофракционные частицы, вследствие чего железосодержащие материалы с мелкофракционными частицами относят к пустым породам, которые становятся отходами. В каждом испытании экспериментальный образец обогащен с помощью HVC-концентратора (рис. 1).

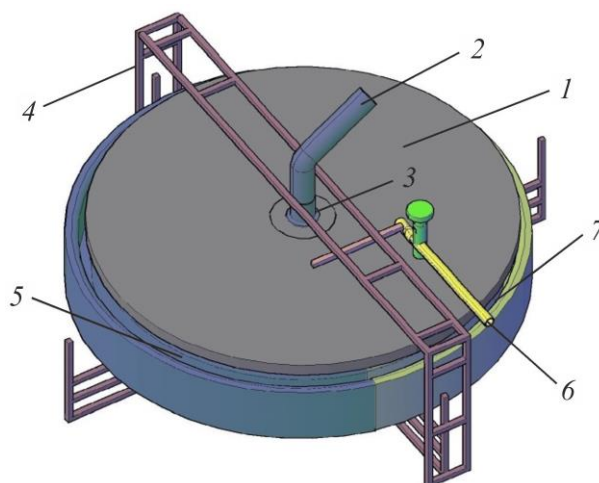


Рис. 1. Структурная схема HVC-концентратора: 1 — поверхность сортировочной плиты, основной узел; 2 — питающая труба; 3 — питатель; 4 — рама; 5 — желоб хвостов обогащения; 6 — сливные шланги; 7 — концентрационный желоб

Установка для гравитационного обогащения разработана в Куньминском университете науки и технологий (Китай) и используется для отделения мелкофракционных материалов. Ее преимущества заключаются в энергоэффективности, эксплуатационной устойчивости, низким влиянием на окружающую среду и т. д. Во время эксплуатации HVC-концентратора мате-

риал сначала помещается в миксерный барабан с максимальным объемом 50 л, затем в барабан добавляется некоторое количество воды. Концентрация полученной пульпы регулируется объемом добавляемой воды. После полного перемешивания пульпы она проходит через трубу 2, установленную на дне миксерной бочки в НВС-концентраторе. Поток пульпы полностью контролируется управляющим клапаном, расположенным между миксерным барабаном и трубой. Как только установка начинает работать, пульпа поступает через питатель 3 на поверхность сортировочной плиты. В процессе обогащения сортировочная плита осуществляет два типа движения (вращение против часовой стрелки и возвратно-поступательное колебание в горизонтальной плоскости). Благодаря вибрации на поверхности сортировочной плиты материал диспергирует. Частицы с низкой и средней плотностью поступают в желоб хвостов обогащения 5, а с высокой плотностью (ценные минералы) осаждаются на поверхности сортировочной плиты. При вращении сортировочной плиты минералы с высокой плотностью двигаются к сливным шлангам 6. В процессе слива под воздействием потока воды минералы с высокой плотностью поступают в концентрационный желоб 7.

НВС-концентратор, при условии достижения аналогичных показателей обогащения другими методами, обладает очевидными преимуществами. Он энергоэффективнее установки магнетизирующего обжига, его энергопотребление составляет 2.5 кВт. При этом энергопотребление установки магнетизирующего обжига в 3–5 раз превышает таковое НВС-концентратора. С точки зрения экологичности НВС-концентратор также обладает преимуществами. По сравнению с флокуляционной флотацией, где необходимо добавлять в воду большое количество химикатов и подвергать ее глубокой очистке, в НВС-концентраторе вода применяется для осаждения, концентрирования и фильтрации на пресс-фильтре, что делает такую воду пригодной для повторного использования. Повторное использование воды для гравитационного обогащения очень развито в Китае. Так как концентрат поступает в сливную область и смывается водой, НВС-концентратор обладает большей производительностью на единицу площади и большей устойчивостью при аналогичных показателях обогащения по сравнению с вибростолом.

Основные факторы, влияющие на эффективность работы НВС-концентратора, — концентрация пульпы, суточная подача материала, частота вибрации и период вращения сортировочной плиты. После погружения сырьевого материала в НВС-концентратор на выходе получают концентрат и хвосты обогащения. В результате измерения веса концентрата и анализа содержания в нем железа рассчитываются наиболее важные показатели обогащения: весовое содержание железа и доля извлечения железосодержащих элементов.

Для понимания влияния факторов на обогащение и определения оптимальной конструкции установки используется метод изменения одного фактора при постоянстве остальных. Выбранные факторы и их значения представлены ниже:

Концентрация пульпы, г/л	100	150	200	250	300
Суточная подача материала, т/сут	10	15	20	25	30
Период вращения сортировочной плиты, с	160	190	220	250	280
Частота вибрации сортировочной плиты, Гц	5	5.3	5.8	6.1	6.5

Для каждого фактора выбраны пять значений, при анализе одного из них значения остальных не изменяются. Значение каждого фактора испытывается один раз, после чего измеряется и анализируется концентрат. Количество материала для каждого испытания составляет 30 кг.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние концентрации пульпы. В реальном процессе гравитационного обогащения частицы руды не могут двигаться в горизонтальной плоскости. Происходит взаимодействие между частицами ценного минерала и частицами пустой породы. Необходимо рассмотреть концентрацию пульпы как параметр, влияющий на эффективность НВС-концентратора. При фиксации остальных параметров концентрация пульпы растет, что приводит к увеличению доли извлечения ценных элементов в концентрате и снижению их весового содержания. Эксперимент направлен на изучение влияния концентрации пульпы образцов на показатели обогащения с помощью НВС-концентратора. В данном эксперименте концентрация пульпы составляла 100, 150, 200, 250, 300 г/л. Каждое значение испытывалось один раз, остальные факторы (суточная подача материала, период вращения и частота вибрации сортировочной плиты) не менялись и равнялись 20 т/сут, 220 с, 5.8 Гц соответственно. Результаты испытаний показаны на рис. 2.

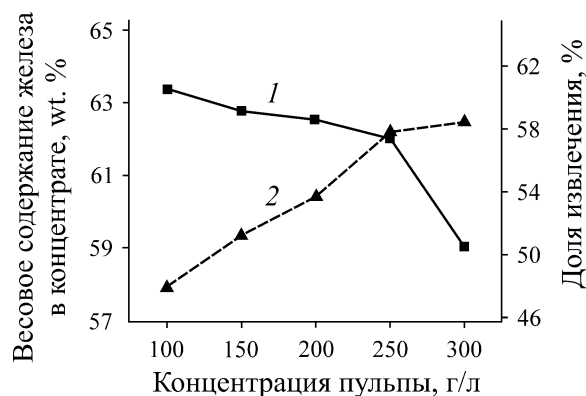


Рис. 2. Влияние концентрации пульпы на показатели обогащения: 1 — весовое содержание железа в концентрате; 2 — доля извлечения

С ростом концентрации пульпы от 100 до 300 г/л содержание железа в концентрате уменьшается, доля извлечения железосодержащих элементов показывает восходящий тренд. При фиксированной подаче материала (20 т/сут) и меньшей концентрации пульпы (100 г/л) производительность НВС-концентратора увеличивается вследствие повышения содержания воды. В этом случае пульпа быстро протекает по поверхности сортировочной плиты, а железосодержащие элементы с высокой плотностью не осаждаются на ее поверхности, а с легкостью вымываются, становясь хвостами. Это приводит к низкой доле извлечения ценных минералов. При увеличении концентрации пульпы до 300 г/л скорость ее потока уменьшается. Осаждение полностью выполняется, но некоторое количество пустых минералов с низкой плотностью осаждаются на плите вместе с железосодержащими элементами с высокой плотностью, т. е. весовое содержание железа в концентрате демонстрирует нисходящий тренд.

В диапазоне концентрации пульпы 250–300 г/л увеличение доли извлечения плавно снижается (рис. 2). Это говорит о том, что эффект повышения доли извлечения не имеет ярко выраженного характера в рамках данного диапазона. Оптимальные показатели обогащения для образца достигаются при концентрации пульпы 250 г/л. При концентрации пульпы 300 г/л весовое содержание железа в концентрате резко уменьшается. Это происходит из-за слишком большой концентрации пульпы, при этом количество воды уменьшается, что приводит к сни-

жению скорости потока пульпы по поверхности сортировочной плиты и изменению потока на ламинарный. В процессе сепарации пустая порода осаждается на поверхности сортировочной плиты, повышая содержание загрязняющих включений в концентрате и значительно снижая содержание железа в нем.

Влияние суточной подачи материала. В реальном процессе обогащения суточная подача — ключевой фактор продуктивности оборудования. Обогащительные предприятия предпочитают использовать оборудование с высокой производительностью и высокой эффективностью. В HVC-концентраторе с увеличением объема перерабатываемого материала сокращается время на обогащение единицы материала, что приводит к уменьшению весового содержания ценного элемента в конечном продукте, а также увеличению в нем загрязняющих включений. При увеличении подачи материала скорость потока пульпы растет, в результате некоторая доля ценных элементов с высокой плотностью вымывается сливной водой, что уменьшает долю извлечения. Данный эксперимент направлен на изучение изменений показателей обогащения при разных значениях подачи материала. Концентрация пульпы принята равной 250 г/л, как и в предыдущем испытании. Скорость потока пульпы составляла 0.46, 0.69, 0.93, 1.16 и 1.39 л/с, что соответствует суточной подаче 10, 15, 20, 25, 30 т/сут. Период вращения и частота вибрации сортировочной плиты приняты равными 220 с и 5.8 Гц, т. е. являются средними. Результаты испытаний приведены на рис. 3.

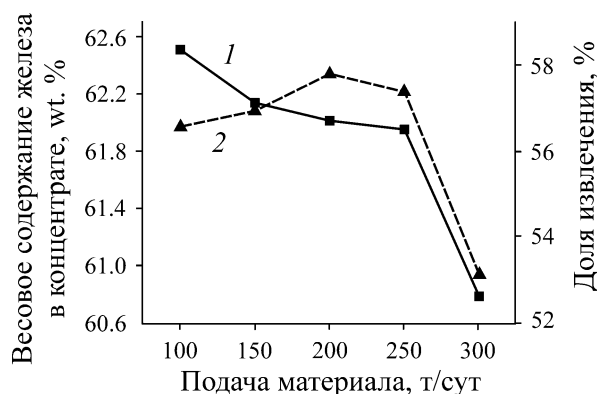


Рис. 3. Влияние суточной подачи материала на показатели обогащения: 1 — весовое содержание железа в концентрате; 2 — доля извлечения

При увеличении подачи материала с 10 до 25 т/сут изменение весового содержания и доли извлечения не имело ярко выраженного характера. Однако при достижении подачи материала 30 т/сут весовое содержание и доля извлечения резко уменьшились до 60.78 и 53.11 % соответственно. Таким образом, для каждого материала существует своя максимальная суточная подача. Так как HVC-концентратор осуществляет разделение фракций, то пульпа должна оставаться на сортировочной плите в течение необходимого времени. Если подача слишком большая, то пульпа находится на плите недостаточно времени, в результате чего некоторые частицы руды не успевают отделиться и смываются водой, понижая показатели обогащения. Для каждого материала существует фиксированное значение максимальной суточной подачи. Если превысить это значение, то результаты обогащения будут неудовлетворительными. С учетом требуемых показателей обогащения и фактической производительности установки оптимальное значение суточной подачи материала составляет 25 т/сут.

Влияние периода вращения сортировочной плиты. Во время работы НВС-концентратора основной процесс разделения фракций происходит на сортировочной плите, т. е. материал разделяется на концентрат и хвосты и направляется в соответствующий собирающий желоб. Период вращения сортировочной плиты определяет время, за которое осуществляется обработка материала. Если период вращения слишком большой, то время, в течение которого материал остается на плите, также будет велико и ценные минералы с высокой плотностью смоются в желоб для хвостов, снижая показатели обогащения. Если период вращения плиты слишком короткий, то времени на разделение будет недостаточно и доля содержания пустой породы в концентрате увеличится, приведет к снижению содержания ценного элемента. Различным материалам соответствуют определенные периоды вращения сортировочной плиты. Подходящий период вращения сортировочной плиты определяется соотношением элементов с высокой и низкой плотностью. В ходе эксперимента проверено влияние следующих периодов вращения (160, 190, 220, 250, 280 с) на показатели обогащения. Концентрация пульпы и суточная подача материала установлены на значениях 250 г/л и 25 т/сут, как оптимальных и полученных в предыдущих испытаниях, частота вибрации — 5.8 Гц — среднее значение данного фактора. Результаты испытаний представлены на рис. 4.

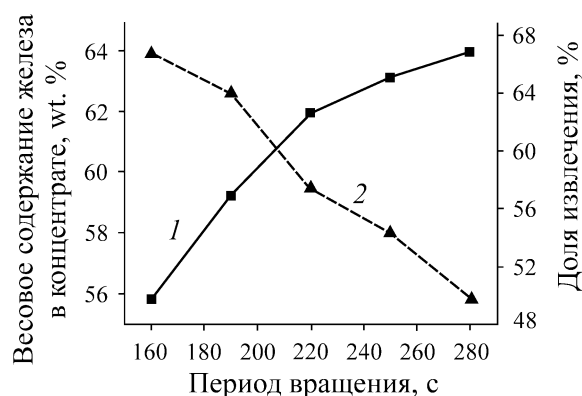


Рис. 4. Влияние периода вращения сортировочной плиты на показатели обогащения: 1 — весовое содержание железа в концентрате; 2 — доля извлечения

С увеличением периода вращения весовое содержание железа в концентрате увеличивается, кривая доли извлечения показывает нисходящий тренд. Экспериментальный образец полностью разделен на концентрат и хвосты при увеличении периода вращения. Увеличение периода вращения повысило весовое содержание ценного элемента в концентрате. Тем не менее некоторые частицы с высокой плотностью смыты в хвостовой желоб, уменьшив долю извлечения. При периоде вращения 220 с весовое содержание железа составляет 61.95 %, доля извлечения 57.38 %. Эти показатели оптимально сочетаются. Можно заключить, что такой период вращения является подходящим для данного образца материала.

Влияние частоты вибрации. Частота вибрации сортировочной плиты — важный параметр работы НВС-концентратора. Амплитуда частоты вибрации определяет характер движения частиц на плите. Железосодержащие частицы с высокой плотностью и частицы пустой породы с низкой плотностью, содержащиеся в пульпе, отделяются друг от друга на сортировочной плите благодаря вибрации. Когда плита колеблется, частицы пустой породы с низкой плотностью диспергируются и вымываются водой, а частицы с высокой плотностью не смываются

при данной частоте и оседают на поверхности плиты. Подходящая частота вибрации должна определяться на основе параметров экспериментального образца (плотность, размер частиц, разность между плотностями ценного минерала и пустой породы). Если частота вибрации слишком велика, то наблюдается большой интерламинарный сдвиг частиц. В результате минералы излишне диспергированы, что приводит к вымыванию частиц с высокой плотностью совместно с частицами пустой породы и снижению показателей обогащения. Если частота вибрации слишком мала, то частицы материала не отделяются друг от друга и в концентрате окажется значительная часть пустой породы.

Проведены испытания влияния пяти значений частоты вибрации (5.0, 5.3, 5.8, 6.1 и 6.5 Гц) на показатели обогащения. Другие факторы установлены в оптимальных значениях, полученных в предыдущих испытаниях (концентрация пульпы 250 г/л, суточная подача материала 25 т/сут, период вращения 220 с). Результаты испытаний представлены на рис. 5.

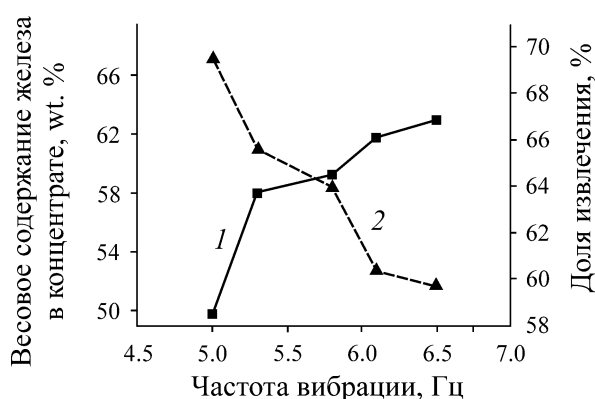


Рис. 5. Влияние частоты вибрации сортировочной плиты на показатели обогащения: 1 — весовое содержание железа в концентрате; 2 — доля извлечения

При увеличении частоты вибрации сортировочной плиты содержание железа в концентрате увеличивается, доля извлечения уменьшается, т. е. боковое движение частиц усиливается и слой минерала становится более рыхлым. В этом случае пустая порода быстро смывается водой, часть интенсивно вибрирующих железосодержащих частиц также смывается водой, снижая долю извлечения. При частоте вибрации 6.1 Гц весовое содержание железа достигает 61.75 %, доля извлечения — 60.31 %. При повышении частоты вибрации свыше 6.1 Гц, доля извлечения железа из материала резко уменьшается. Таким образом, частота вибрации, равная 6.1 Гц, является подходящей для данного образца.

ВЫВОДЫ

При анализе твердых отходов горного производства установлено, что содержание железа в исследуемом образце относительно высоко. Основными причинами того, что железосодержащие минералы вошли в состав отходов, является магнитонеактивность и слишком малый размер частиц данных элементов. Традиционными процессами невозможно эффективно обогащать магнитонеактивные мелкофракционные минералы. После тестовых обогащений с помощью НВС-концентратора в различных условиях определены оптимальные параметры для исследуемого образца (концентрация пульпы 250 г/л, суточная подача материала 25 т/сут, период враще-

ния сортировочной плиты 220 с, частота вибрации сортировочной плиты 6.1 Гц). Получен концентрат с весовым содержанием 61.75 % и долей извлечения 60.31 %. HVC-концентратор обладает значительной эффективностью гравитационного обогащения мелкофракционных материалов с размером частиц $-74 + 20$ мкм и низким энергопотреблением (2.5 кВт), т. е. на 1 т материала необходимо 2.4 кВт электроэнергии, другие эксплуатационные затраты также низки. Ввиду того, что в смывающую воду не добавляется химикаты, ее можно использовать повторно, что оказывает меньшее влияние на окружающую среду.

Авторы выражают благодарность руководству шахты “Kunming Iron and Steel Group” за предоставление образцов, а также Куньминскому институту металлургии за выполнение аналитической работы по определению химического состава и фазового анализа предоставленных образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang L., Bai W., Yu J., Ma L., Ren J., Zhang W., and Cui Y. Critical mineral security in China: an evaluation based on hybrid MCDM methods, *Sustain.*, 2018, Vol. 10, No. 11. — P. 4114.
2. Zheng B., Zhang D., Liu W., Yang Y., and Yang H. Use of basalt fiber-reinforced tailings for improving the stability of tailings dam, *Materials.*, 2019, Vol. 12, No. 8. — P. 1306.
3. Zhang S., Xue X., Liu X., Duan P., Yang H., Jiang T., Wang D., and Liu R. Current situation and comprehensive utilization of iron ore tailing resources, *J. Min. Sci.*, 2006, Vol. 42, No. 4. — P. 403–408.
4. Wei S. L., Guo Y. L., Ya X., and Qi F. H. The properties and formation mechanisms of eco-friendly brick building materials fabricated from low-silicon iron ore tailings, *J. Clean. Prod.*, 2018, Vol. 204, No. 17. — P. 685–692.
5. Ju W. J., Hwang S. K., Jho E. H., and Nam K. Determining the reuse of metal mine wastes based on leaching test and human health risk assessment, *Environ. Eng. Res.*, 2018, Vol. 24, No. 1. — P. 82–90.
6. Sabarinathan P., Annamalai V. E., Kumar S. S., and Kennedy A. X. A study on recovery of alumina grains from spent vitrified grinding wheel, *J. Mater. Cycles. Waste. Manag.*, 2018, Vol. 21, No. 1. — P. 156–165.
7. Liu L., Tan Q., Liu L., and Cao J. Comparison of different comminution flowsheets in terms of minerals liberation and separation properties, *Min. Eng.*, 2018, Vol. 125, No. 6. — P. 26–33.
8. Chimwani N., Glasser D., Hildebrandt D., Metzger M. J., and Mulenga F. K. Determination of the milling parameters of a platinum group minerals ore to optimize product size distribution for flotation purposes, *Min. Eng.*, 2013, Vol. 43–44, No. 4. — P. 67–78.
9. Lan Z., Li X., Liu S., Wang W., and Zhang M. A Review on the beneficiation of ultra-lean iron ores, *The 3rd Int. Conf. on Advanced Eng. Mater. and Tech.*, 2013. <https://www.scientific.net/AMR.753-755.44>, Online available since 2013/Aug/30.
10. Ozcan O. and Celik I. B. Beneficiation routes for upgrading iron ore tailings with a teetered bed separator, *Sep. Sci. Technol.*, 2016, Vol. 51, No. 17. — P. 2844–2855.
11. Zhang S., Xue X., Liu X., Duan P., Yang H., and Jiang T. Current situation and comprehensive utilization of iron ore tailing resources, *J. Min. Sci.*, 2006, Vol. 42, No. 4. — P. 403–408.

12. **Yang Y. H., Wei Z., Cao G., Yang Y., Wang H., Zhuang S., and Lu T.** A case study on utilizing geotextile tubes for tailings dams construction in China, *Geotext. Geomembr.*, 2019, Vol. 47, No. 2. — P. 87–192.
13. **Liu L., Liang Y., Song Q., and Li J.** A review of waste prevention through 3R under the concept of circular economy in China, *J. Mater. Cycles. Waste. Manag.*, 2017, Vol. 19, No. 4. — P. 1314–1323.
14. **Li C., Sun H., Bai J., and 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, *J. Hazard. Mater.*, 2010, Vol. 174, No. 1. — P. 71–77.
15. **Chen L., Ren N., and Xiong D.** Experimental study on performance of a continuous centrifugal concentrator in reconcentrating fine hematite, *Int. J. Min. Pro.*, 2008, Vol. 87, No. 1. — P. 9–16.
16. **Kumar R. and Mandre N. R.** Characterization and beneficiation of iron ore tailings by selective flocculation, *Trans. Indian. Inst. Met.*, 2015, Vol. 69, No. 7. — P. 1459–1466.

Поступила в редакцию 23/IV 2020

После доработки 05/VII 2020

Принята к публикации 09/VII 2020