

А.А. ШИРЯЕВ

(Украина, Кривой Рог, ООО "НПП Горняк"),

Ю.Л. ГРИЦАЙ, В.С. ВОЗНЮК

(Украина, Кривой Рог, ООО "НПП "Укрэкология"),

В.В. БОТВИННИКОВ

(Украина, Желтые воды, ОАО "Восток руда")

**СОЗДАНИЕ СЕПАРАТОРОВ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ
С ПОВЫШЕННОЙ ИНДУКЦИЕЙ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ СУХОГО
МАГНИТНОГО ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗО-
И МАРГАНЦЕВОРУДНОГО СЫРЬЯ**

Целесообразность обогащения криворожских руд подземной добычи, особенно кусковых, была установлена В.И. Кармазиным еще в 1955 г [1].

Первые испытания были проведены в промышленных условиях на индукционно-роликовых сепараторах типа ДК-НИГРИ и СКО, разработанные В.И. Кармазиным, В.С. Деркачем и В.В. Крутием. Однако технология сухого магнитного обогащения в те годы не получила дальнейшего развития из-за отсутствия надежной и экономичной конструкции магнитного сепаратора для разделения слабо- и среднемагнитных материалов.

Дальнейшим развитием обогащения руд подземной добычи было принятие решения в 1963 г о разработке технологии и строительства Криворожского рудоподготовительного комбината производительностью 50 млн. т в год. [2].

Сегодня после приватизации шахт и рудников Криворожского бассейна, а также отсутствие государственных инвестиций в развитие горнорудной промышленности строительство единого рудоподготовительного комбината представляется маловероятным.

В настоящее время богатые железные руды подземной добычи Криворожского бассейна с содержанием железа 54-56% на дробильно-сортировочных фабриках (ДСФ) шахт подвергаются частичному обогащению методом грохочения со сбросом крупной некондиционной фракции (хвостов) с содержанием железа 39-46% и выделением товарной руды с содержанием железа 57-61% в количестве около 15 млн т год.

Появление на рынке постоянных магнитов с высокой энергией состава неодим-железо-бор (Nd-Fe-B) с приемлемой ценой способствовало разработке новых конструкций магнитных систем и сепараторов для сухого обогащения гематит-мартитовых руд.

Наиболее просто реализуемым и экономичным путем увеличения производства товарной руды является вовлечение в добычу руд пониженного бортового содержания железа с последующим сухим обогащением.

Физические и механические свойства основных типов руд и пород в Криворожском бассейне отличаются достаточно широкими пределами колебаний. Данные табл. 1 показывают четкую дифференциацию основных физических свойств руд и пород.

Физико-механические свойства разновидностей руд и пород шахт и карьеров Криворожского бассейна

Разновидность	Дробимость, %	Удельная работа разрушения, Дж/кг	Коэффициент крепости по Протодяконову	Содержание железа, %	Магнитная восприимчивость, $\times 10^{-8}$ м ³ /кг	Истинная плотность, кг/м ³
Руда богатая пористая	33-60	18-52	3-6	57-63	403-11	4163-4542
Руда дисперсно-гематитовая (красковая)	54-79	28-73	4-8	51-54	139-240	4045-4356
Кварцит (роговик) мартитовый	61-90	37-128	5-12	40-42	183-295	3578-3946
Кварцит гематит-мартитовый (джеспилит)	81-92	78-151	10-15	45-50	104-205	2407-3642
Кварцит (роговик) мартит-дисперсно-гематитовый	48-90	27-129	4-12	28-34	84-176	3212-3457
Сланцы, малорудные и безрудные слои	84-95	47-207	6-17	14-23	5-86	2703-2845

Процесс сухой магнитной сепарации окисленных руд основан на магнитных и гравитационных свойствах разделяемых кусков, т. е. на значениях удельной магнитной восприимчивости и истинной плотности, как функции массы куска. Последний фактор при сухой сепарации слабомагнитных руд имеет большее значение, чем для сепарации сильномагнитных материалов.

Полученные данные подвергнуты обработке с применением методов статистического анализа в математическом редакторе MathCAD-2001 с построением кривых распределения [3]. Для примера на рис. 1 и 2 приведены результаты статистического анализа в графической форме в виде гистограмм и кривых, описывающих закон распределения признака для мартитового кварцита, кварцитовых слоев и жильного кварца.

Магнітна і електрична сепарація

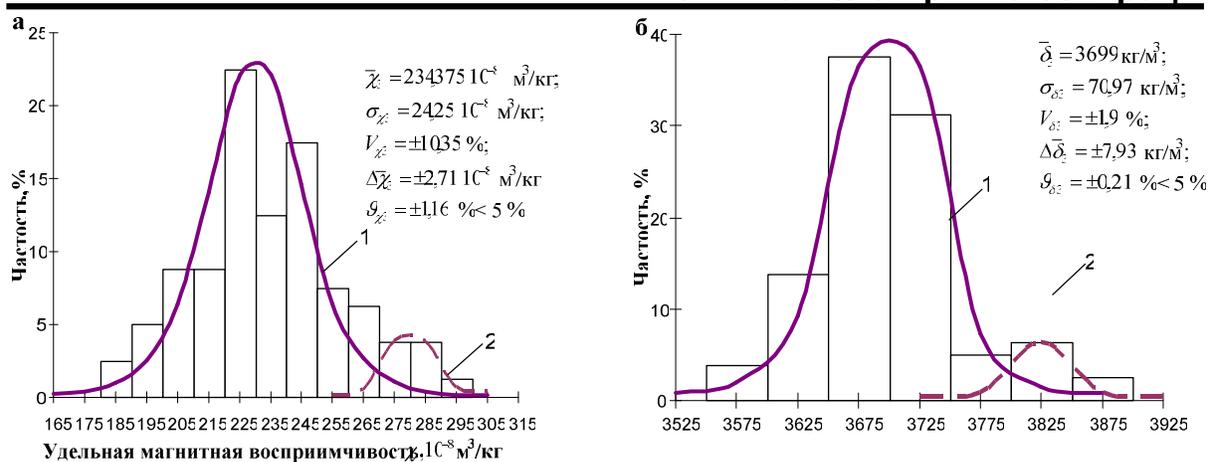


Рис. 1. Гистограммы и кривые распределения физических свойств тонкослоистого железослюдко-мартитового кварцита:
 а – удельная магнитная восприимчивость; б – истинная плотность;
 1 – основная разновидность; 2 – выщелоченный аналог

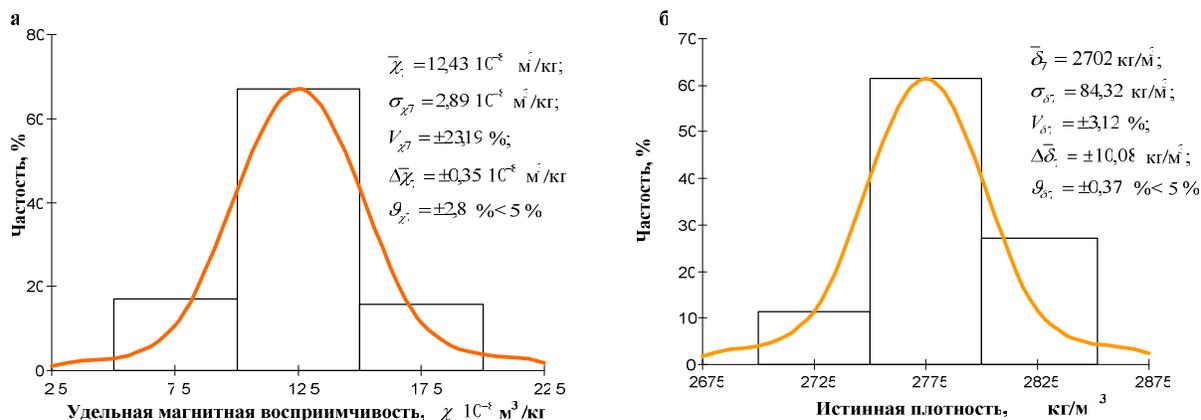


Рис. 2. Гистограммы и кривые распределения физических свойств малорудных кварцевых слоев и жильного кварца:
 а – удельная магнитная восприимчивость; б – истинная плотность

Данные определения магнитных и гравитационных свойств подтверждают возможность разделения руды и пустой породы по этим свойствам. Средневзвешенные значения вариационных рядов удельной магнитной восприимчивости и истинной плотности использованы в дальнейших расчетах и являются основными признаками разновидностей, идентифицирующими характер их поведения в процессе сухой магнитной сепарации.

Для оценки технологических магнитных свойств слабомагнитных окисленных железных и других руд разработан анализатор ручной магнитный лабораторный АРС-1, с помощью которого изучена обогатимость исходных руд по разновидностям, классам крупности и руды в исходной крупности 100-0 мм, дробленной до 10-0 мм (рис. 3).

Магнітна і електрична сепарація

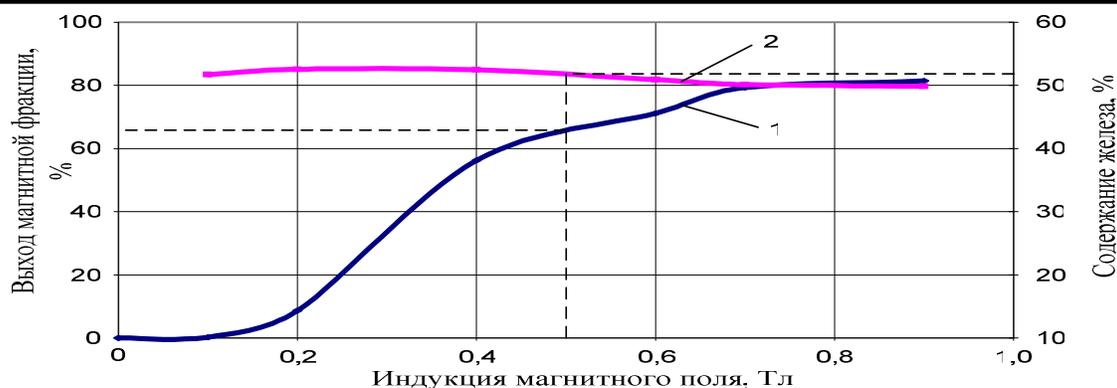


Рис. 3. Залежність виходу магнітної фракції (1) і вмісту заліза (2) від величини магнітної індукції (магнітний аналіз вихідної руди -100+0 мм)

Сравнение суммарных результатов магнитных анализов, выполненных по разновидностям и классам крупности указывает на возможность повышения содержания железа в аглокаде на 6-7%.

Наиболее широкое распространение для изготовления магнитов получили группы материалов Nd-Fe-B и Dy-Fe-B, которые обеспечивают получение магнитных полей с индукцией до 1 Тл и выше [4]. Состав и технология производства этих материалов определяют характеристику изготовленных магнитных элементов.

Колеблемость магнитных характеристик магнитных элементов из сплавов Nd-Fe-B следующая: остаточная магнитная индукция, от 1,27 до 1,08 Тл; коэрцитивная сила по индукции, от 828 до 995 кА/м; коэрцитивная сила по напряженности, от 955 до 2388 кА/м; магнитная энергия, от 280 до 400 кА/м.

Учитывая магнитные свойства сепарируемого сырья, разрабатывались магнитные системы из сплава Ne-Fe-B с увеличенной эффективностью магнитного потока. Увеличение магнитного потока возможно за счет геометрических размеров магнита, проводимости рабочего зазора, снижения потока рассеяния системы и использования магнитов с высокой удельной энергией.

Возможным фактором, обуславливающим величину полезного потока, является конструкция магнитной системы. На основании теоретических расчетов, графических построений форм магнитного поля и экспериментальных конструкций, было предложено семь магнитных систем, для которых определены величины магнитных индукций.

В качестве дополнительных магнитных элементов проверялось использование магнитных ферритов бариевого и стронциевого состава, а также магниты из сплава Ne-Fe-B.

Зависимость индукции от расстояния до полюса для магнитной системы приведены на рис. 4. Полученная зависимость имеет нелинейный характер. По этой причине геометрические соотношения системы и ее конструкцию необходимо выбирать с учетом указанного фактора.

С появлением современных магнитов на основе сплавов Ne-Fe-B и Sm-Co стало возможным создание более простых и эффективных магнитных систем с

Магнітна і електрична сепарація

индукцией магнитного поля от 0,6-08 Тл на поверхности.

Продолжая принципы, заложенные В.И. Кармазиным, нами была разработана конструкция магнитных блоков, позволяющих собрать открытую магнитную систему на постоянных магнитах для барабанного магнитного сепаратора с индукцией на поверхности обечайки, 0,45-0,6 Тл.

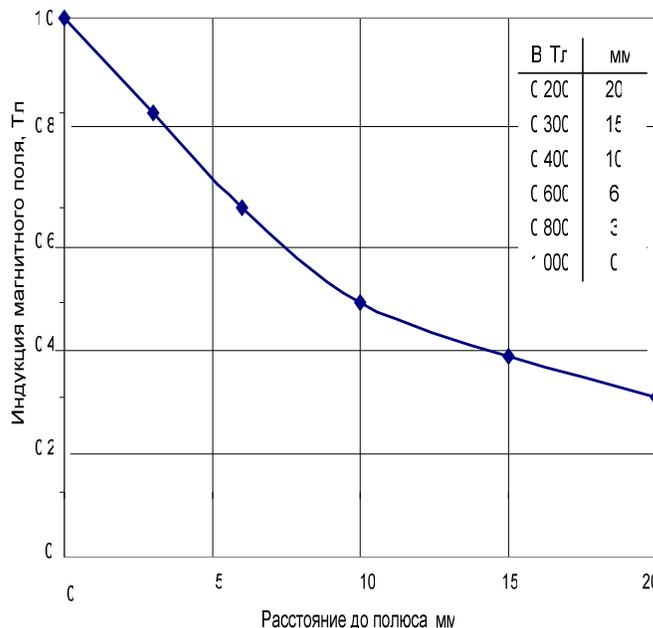


Рис. 4. Зависимость индукции магнитного поля от расстояния до полюса

В основу разработки предложенной конструкции барабанного магнитного сепаратора была положена физическая модель массопереноса слабомагнитных материалов под действием отклоняющего магнитного поля при криволинейном движении в зоне разделения. Расчет значения критерия Ханкока-Луйкена по результатам магнитных анализов подтвердил, что для сухой магнитной сепарации гематит-мартитовых руд оптимальной является индукция магнитного поля на поверхности барабана в пределах 0,45-0,5 Тл.

По результатам изучения физических свойств рудных разновидностей, технологических свойств материала, непосредственно влияющих на процесс разделения, таких как влажность, содержание глинистой составляющей и частиц пластинчатой формы крупнее 10 мм, а так же механических сил действующих на слабомагнитные и немагнитные частицы в отклоняющем магнитном поле при их криволинейном движении была разработана физико-математическая модель разделительного массопереноса.

Решение системы дифференциальных уравнений с использованием современной вычислительной техники позволило определить траектории движения частиц различных минерально-текстурных рудных разновидностей в рабочей зоне барабанного магнитного сепаратора и разделительные числа для каждой из этих разновидностей. Была исследована степень влияния режимных параметров, таких как частота вращения барабана, положение разделительного шибера,

Магнітна і електрична сепарація

крупность исходного питания и др. на показатели сухой магнитной сепарации гематит-мартитовых руд. Результаты вычислений были представлены в виде уравнений для нахождения выхода магнитного продукта и массовой доли железа в нем, что позволило прогнозировать результаты сухой магнитной сепарации гематит-мартитовых руд различных шахт Криворожского бассейна по результатам их рудоразборки [5].

Конструкция магнитного блока, которая применена при создании магнитной системы высокоинтенсивного магнитного барабанного сепаратора, приведена на рис. 5.

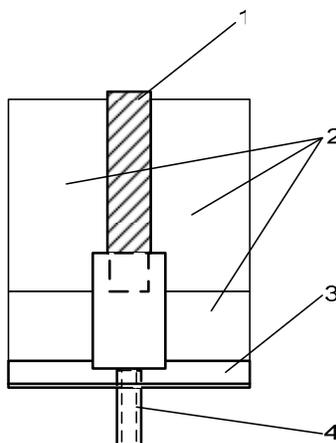


Рис. 5. Магнитный блок

1 – концентратор; 2 – магниты; 3 – магнитопровод; 4 – шпилька

В целом магнитная система барабанного сепаратора для обогащения слабомагнитных материалов по своей конструкции практически имеет те же конструктивные элементы, что и в барабанных магнитных сепараторах для разделения сильномагнитных руд [6]. Она состоит из неподвижных цапф, секторов и магнитопроводного ярма. Цапфы и сектора также выполнены из магнитопроводной стали. На ярме крепятся рядами магнитные блоки. Каждый ряд состоит из блоков одинаковой полярности.

Ряды чередуются по полярности: N, S, N, S, ... и т.д. На промышленном модуле барабанного сепаратора ПБСС-90/110 используются магнитные блоки, основными элементами которых являются магниты из сплава Nd-Fe-B, характеризующиеся значением удельной энергии 360-370 кДж/м³. Магнитные элементы имеют размеры 50×50×18 и 50×50×20 мм. Основанием блоков является магнитопроводная пластина прямоугольной формы. Между основными магнитными элементами располагается магнитопроводный концентратор толщиной 10 мм. Для уменьшения потерь магнитного потока между блоками устанавливаются магнитные элементы клиновидной формы.

Магнитная система имеет по длине 14 основных магнитных блоков и два расслабляющих полюса из сплава Fe-Ba. Угол охвата основной магнитной системой составляет 110° и всей магнитной системы – 135°.

Величины индукции магнитного поля на поверхности барабана сепаратора определялись магнитометром КРМ-Ц-Т и колеблются в пределах 0,496-0,705 Тл

Магнітна і електрична сепарація

(без расслабляющих блоков). Среднее значение магнитной индукции, рассчитанное по 224 точкам, составляет 0,579 Тл.

Конструкция барабанного магнитного сепаратора представлена на рис. 6 [7]. Конструкция шибера может быть двух типов, такой как показан на рис. 6 или он располагается ниже барабана и перемещается горизонтально.

Новым техническим решением при изготовлении обечаек барабанов магнитных сепараторов является применение стеклопластика вместо традиционной "немагнитной" нержавеющей стали, позволяющее исключить нагревание магнитной системы, потерю величины магнитной индукции, снизить потребляемую электроприводом мощность на 30-40% и достичь величины магнитной индукции на поверхности барабана 0,65 Тл.

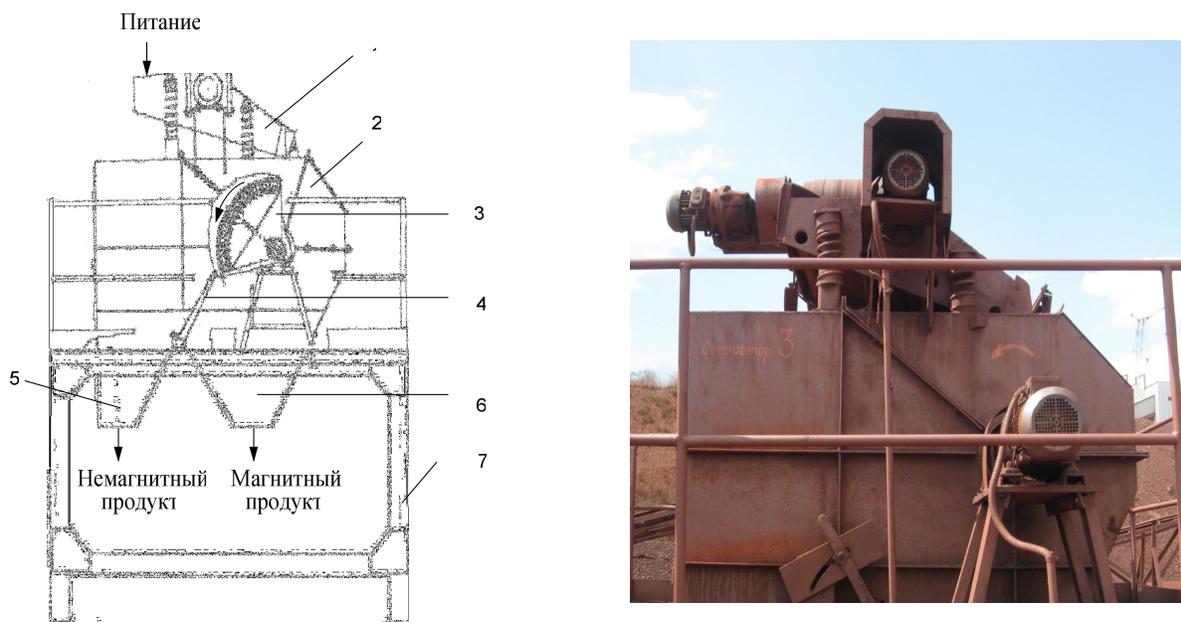


Рис. 6. Схема и общий вид устройства магнитного барабанного сепаратора ПБСС-90/110 для сухого обогащения слабомагнитных руд

- 1 – вибрационный питатель; 2 – корпус; 3 – барабан с магнитной системой;
4 – шибер; 5 – приемник немагнитного продукта;
6 – приемник магнитного продукта; 7 – рама.

Техническая характеристика магнитного барабанного сепаратора

Размеры барабана, мм:

диаметр	900
длина	1100
Крупность обогащаемой руды, мм	30-0
Производительность, т/ч	20-30
Индукция магнитного поля на поверхности барабана	0,5-0,65
Частота вращения, мин ⁻¹	40-60
Номинальная мощность привода, кВт:	
барабана	6,5
вибропитателя	1,0
Угол охвата магнитной системы с расслабляющими магнитами, град	135

Магнітна і електрична сепарація

Магнитный барабанный сепаратор ПБСС-90/110 работает следующим образом. Исходное питание с помощью вибрационного питателя подается равномерно на лоток, а затем на барабан получающий вращение от привода. Под действием механических сил и отклоняющей силы со стороны магнитной системы в сепараторе образуется веер минеральных частиц, который делится шибером на два продукта: магнитный и немагнитный. Немагнитный продукт разгружается в отдельные приемники материала, плавное регулирование выхода и качества магнитного продукта достигается изменением частоты вращения барабана.

По результатам исследований технологии сухого магнитного обогащения отходов от переработки богатых окисленных железных руд на дробильно-сортировочных фабриках шахт "Артем-1", им. Фрунзе, "Юбилейная", карьеров "Южный", "Северный" и др., разработаны технологические рекомендации, спроектированы и построены 5 технологических комплексов (ТК) с годовой производительностью по исходному сырью 1,41 млн т в год. Выпуск товарной продукции в виде аглоруды достигнут 0,394 млн т в год при содержании железа в товарной аглоруде около 54%.

Один из таких комплексов введен в эксплуатацию в 2005г [8]. Он был первоначально установлен на промплощадке шахты "Юбилейная" ОАО "Суша Балка", а затем демонтирован и установлен в карьере "Южный" ШУ "Арселор Миттал Кривой Рог".

Технологическая схема (рис. 7) при переработке кусковой части руды шахты Артем включает три операции грохочения, две операции дробления и две операции сухой магнитной сепарации.

Выделение крупных хвостов за счет избирательного дробления позволяет повысить содержание железа в питании сухой магнитной сепарации на 3,5 - 4,5%. Сухая магнитная сепарация осуществляется при индукции магнитного поля 0,5 Тл на барабанных магнитных сепараторах ПБСС-90/110.

В результате сухой магнитной сепарации в два приема получаем конечный магнитный продукт, являющийся товарной аглорудой, и хвосты сухой магнитной сепарации.

Технологическая схема комплекса с применением избирательного дробления позволяет из кусковой руды шахты Артем при производительности 61,85 т/ч и содержании железа в ней 47,0% получать 25,27 т/ч аглоруды с содержанием железа 56,0% и кремнезема 17,5%.

При работе технологического комплекса в 6300 ч в год и коэффициенте использования оборудования КИО=0,72 производительность его по исходной руде составляет 389,655 тыс. т в год. Выпуск товарной агломерационной руды составляет 159,201 тыс.т в год.

Магнітна і електрична сепарація

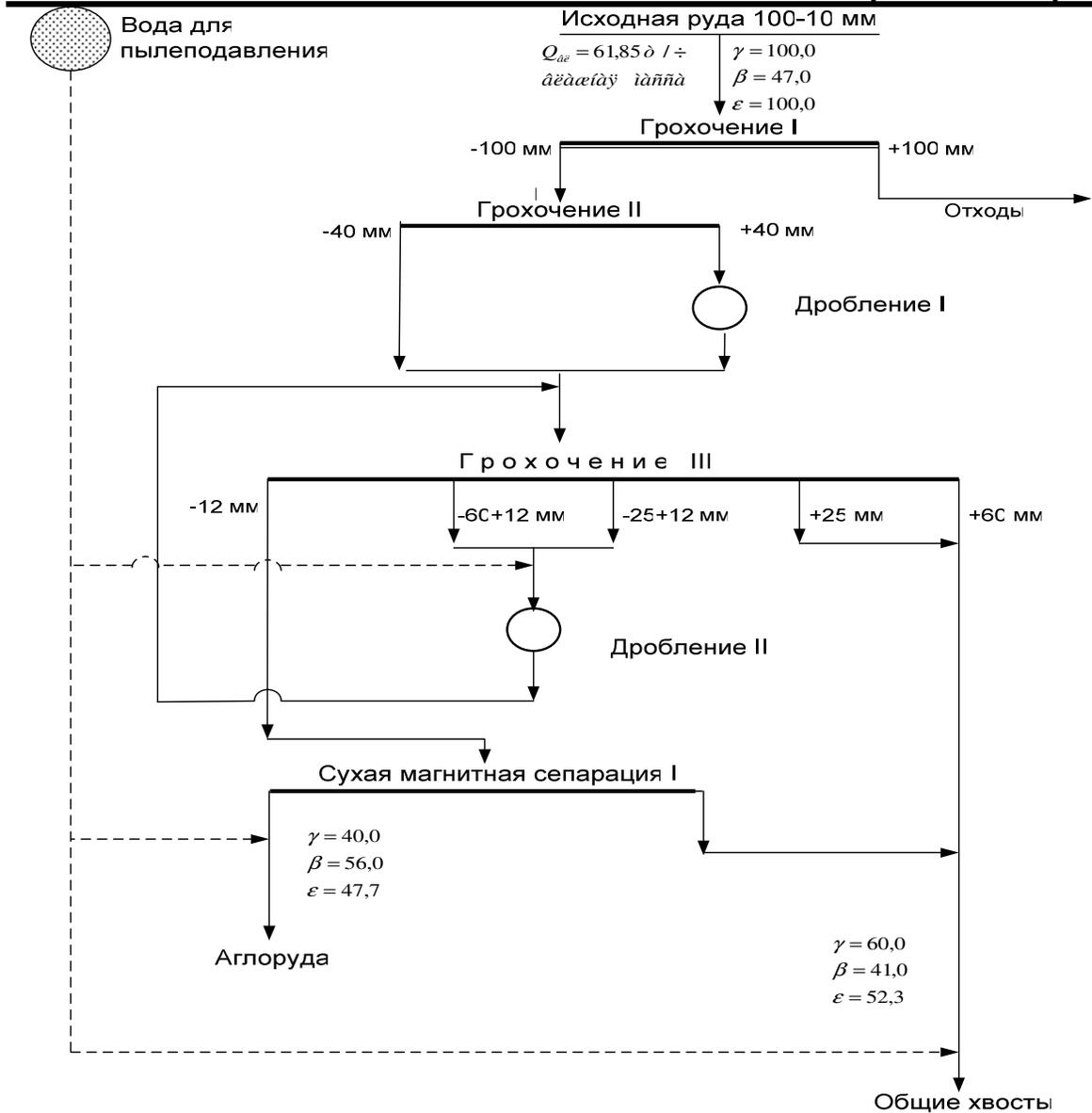


Рис. 7. Технологическая схема обогащения кусковой части руды шахты "Артем-1" ШУ ОАО "Арселор Мталл Кривой Рог"

В процессе длительной эксплуатации технологических комплексов была определена необходимость дообогащения образующихся хвостов сухой магнитной сепарации при снижении их крупности до 3-0 мм.

Для этой цели была создана оригинальная конструкция валкового сепаратора на постоянных магнитах. Промышленный модуль позволял обеспечить индукцию магнитного поля от 0,8-1,3 Тл на поверхности магнитных концентраторов (рис. 8).

Материала загружается в бункер 1, питателем 2 материал подается на валок. Под действием механических сил и сил, действующих со стороны отклоняющей магнитной системы, магнитная фракция с помощью съемника разгружается в приемник магнитной фракции 9, а немагнитная фракция за счет цен-

Магнітна і електрична сепарація

тробежних и гравитационных сил разгружается под валком в ванну сепаратора и через насадку 10 выводится из сепаратора.

При мокром обогащении под валком устанавливается дополнительно криволинейное днище 5. Имеются патрубки, через которые подается вода на питающие устройства, смыв магнитной фракции. Слив ванны разгружается через порог 8.

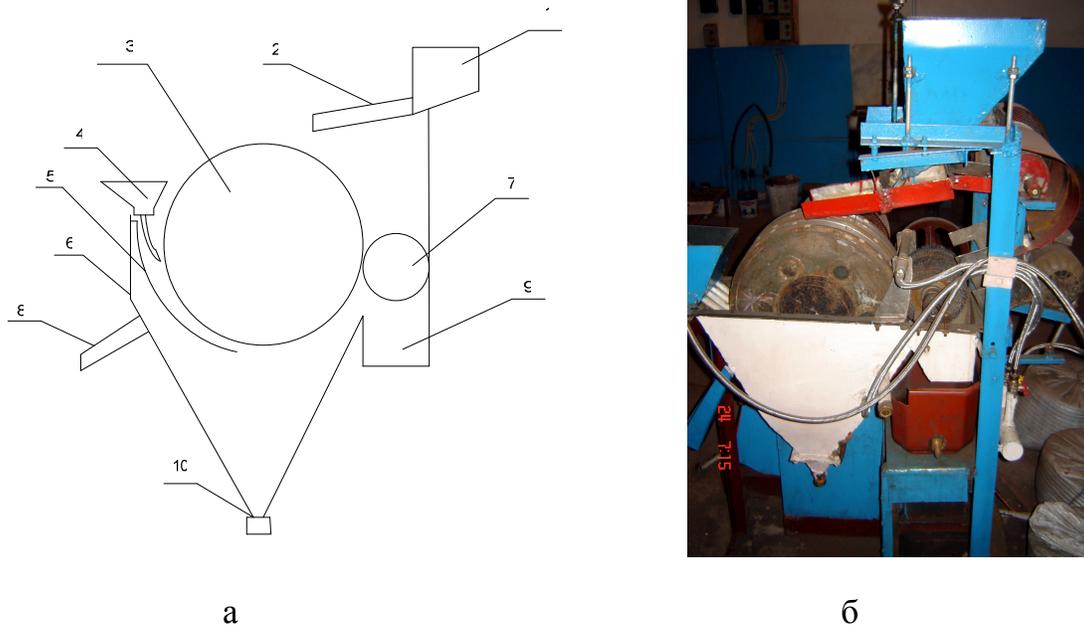


Рис. 8. Установка с валковым магнитным сепаратором ПВС/М – 39/11:

- а – схема валкового магнитного сепаратора; б – общий вид;
1 – бункер с шибером; 2 – вибрационный питатель; 3 – валок;
4 – питающее устройство с каналами; 5 – днище; 6 – ванна;
7 – съемник магнитной фракции; 8 – сливной порог;
9 – приемник магнитной фракции; 10 – насадка

Техническая характеристика валкового магнитного сепаратора ПВС/М-39/11	
Диаметр наружный валка, мм	390
Длина валка, мм	130
Длина рабочей зоны, мм	110
Частота вращения валка, мин ⁻¹	20-100
Диаметр съемника, мм	150
Частота вращения съемника, мин ⁻¹	656
Скорость линейная съемника, м/с	4,1
Напряженность магнитного поля, Тл	1,0

Средняя индукция магнитного поля, измеренная в 192 точках, на поверхности валка составила 1,06, максимальное значение – 1,43, минимальное – 0,81, медиана – 1,05 Тл.

На рис. 9 приводится изменчивость колебаний значений индукции магнитного поля по ряду с наибольшими значениями индукции.

Магнітна і електрична сепарація

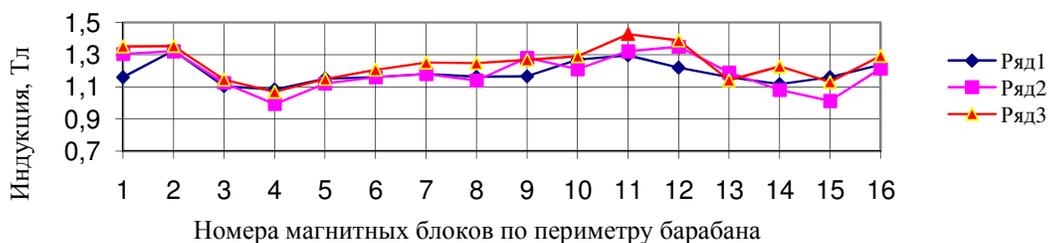


Рис. 9. Колебания индукции магнитного поля во втором ряду по периметру сепаратора

Опыты по дообогащению хвостов сухой магнитной сепарации показали их эффективное разделение при предварительном обеспыливании (рис. 10).

Первая операция обогащения выполняется на валковых сепараторах с целью выделения бедных хвостов по содержанию железа, вторая на барабанных магнитных сепараторах, что позволяет получить концентрат с содержанием железа 58,5% при выходе 26,7%.

Получаемый концентрат при дообогащении хвостов технологического комплекса от переработки гематит-мартитовых руд может подшихтовываться к основной товарной продукции, аглоруде. В этом случае выход товарной продукции увеличится до 52,7%, а содержание железа до 57,0%, что повышает извлечение железа до 59,0%.

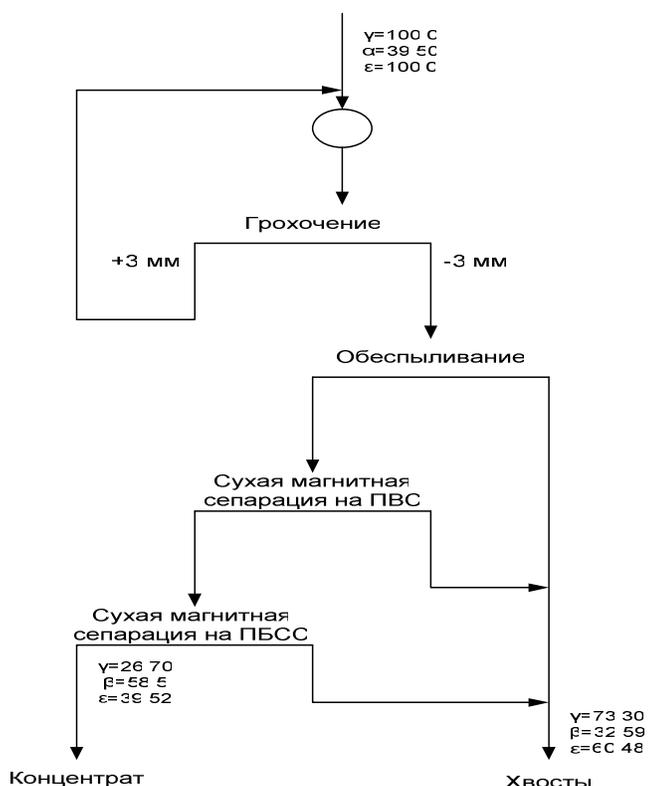


Рис. 10. Принципиальная схема сухого дообогащения хвостов технологических комплексов с применением сухой магнитной сепарации

Магнітна і електрична сепарація

Для оценки возможности применения модуля сепаратора были выполнены исследования по обогащению лежалых марганцевых шламов Чкаловской ОФ ОАО "Орджоникидзевский ГОК".

Проба отобрана с верхнего слоя "пляжной" зоны шламохранилища. Влажность шламов – 20%, насыпная плотность во влажном состоянии 1262 кг/м³, в воздушно-сухом состоянии – 1146 кг/м³.

Выход классов 0,16 мм – 37,0%. Содержание Mn в этих классах 17,6%. Самое низкое содержание марганца установлено в классах -0,16+0,07 мм – 8,1%. Суммарное содержание марганца в песковой и шламистой частях пробы составило 9,7%.

Зернистая часть представлена обломками кварцевых и карбонатных зерен раскрытыми рудными (пиролюзит – манганитовыми) зернами.

В соответствии с исследованиями распределения марганца и минералов по классам крупности для технологических исследований на модуле валкового сепаратора ПВС/М-39/11 была выбрана зернистая часть (+0,16 мм) пробы шламов.

Опыты по сухому обогащению проводились при частоте вращения вала 90 мин⁻¹. Схема включала основную магнитную сепарацию и перечистку магнитного продукта. Результаты сухой магнитной сепарации шламов в воздушно-сухом состоянии представлены в табл. 2.

Таблица 2

Технологические показатели сухого магнитного обогащения зернистой части марганцевых шламов (-3+0,16мм) на валковом сепараторе ПВС/М-39/11

Продукт	Выход, %	Содержание марганца, %	Извлечение марганца, %
Концентрат магнитный	22,5	33,6	46,0
Хвосты общие	77,3	11,2	54,0
Исходная	100,0	17,6	100,0

При исходном содержании марганца в зернистой части шламов 17,6% выход магнитного продукта составил 22,5%, содержание марганца – 33,6%. Суммарный выход хвостов 77,3% при содержании Mn 11,2%.

Удельная производительность модуля валкового сепаратора в пересчете на 1 м рабочей зоны вала составила 1,2-1,4 т/ч. При длине вала 3,0 м производительность сепаратора составит 3,6-4,2 т/ч.

Добавление второй операции перечистки концентрата повышает содержание марганца в нем до 36%, но при этом выход концентрата снижается до 20%.

Таким образом, созданы сепараторы на постоянные магнитах позволяющие решать проблему вовлечения в переработку некондиционного железорудного сырья и лежалых марганцевых шламов.

Список литературы

1. Кармазин В. И. Современные методы магнитного обогащения руд черных металлов. – М.: Гос. науч.-тех. Изд-во лит-ры по горному делу, 1962. – 659 с.

Магнітна і електрична сепарація

2. Шикоренко С.Ф., Косой Г.М., Суббота Л.Ф., Салищева Е.П., Ширяев А.А. Полупромышленные испытания гравитационно-магнитной и магнитно-флотационной схем обогащения окисленных железных руд шахтной добычи Кривого Рога // Обогащение руд черных металлов: Науч.-техн. сб. – 1972. – Вып. 13. – С. 52-59.
3. Кирьянов Д.В. Самоучитель MathCAD-2201/ – СПб.: БХВ– Петербург, 2001. – 544 с.
4. Бюллетень Магнитного общества. – М., 2005. – № 4.
5. Ботвинников В.В., Ширяев А.А., Вознюк В.С. Прогнозирование показателей сухого магнитного обогащения гематит-мартитовых руд // Обогащение руд. – 2005. – №3. – С. 7-10.
6. Грамм В.А., Николаенко К.В., Федотов А.Г. Машинист магнитных сепараторов. – М.: Недра, 1990. –144 с.
7. Гилунг В.Ф., Ширяев А.А. Передвижной технологический комплекс для обогащения слабомагнитного сырья // Обогащение руд. – 2002. –№6. – С. 24-26.
8. Технология и оборудование для сухого магнитного обогащения гематит-мартитовых руд шахтной добычи с предварительным избирательным дроблением / С.А. Заболотный, Ю.В. Величко, А.А. Ширяев и др. // Горный журнал. – 2008. – №6 – С. 90-94.

© Ширяев А.А., Грицай Ю.Л., Вознюк В.С., Ботвинников В.В., 2012

*Надійшла до редколегії 01.03.2012 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*