

ОБОГАЩЕНИЕ СЛАБОМАГНИТНЫХ МИНЕРАЛОВ В ВАЛКОВЫХ СЕПАРАТОРАХ С СИСТЕМОЙ ИЗ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

А.Е. Пелевин

Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия, office@ursmu.ru

Аннотация: Рассмотрено применение валковых сепараторов с системой из постоянных магнитов из Nd-Fe-B для обогащения слабомагнитных минералов. Испытаны валковые сепараторы с нижней подачей материала для сухого и мокрого обогащения. Лучшие результаты получены при использовании магнитной системы с чередованием полюсов по периметру вала. Приведены результаты обогащения гравитационного титансодержащего промпродукта, марганцевого концентрата и флотационного полевошпатового концентрата. Крупность исходного продукта влияет на выход магнитного продукта. Лучше использовать отдельное магнитное обогащение для крупных и мелких классов. При сухом обогащении в валковых сепараторах с нижней подачей материала выход магнитного продукта больше для крупных классов крупности. Высоту рабочей зоны разделения необходимо изменять в зависимости от крупности исходного материала. При мокром обогащении в валковых сепараторах с нижней подачей материала выход магнитного продукта больше для мелких классов крупности. Разработанные валковые сепараторы с системой из постоянных магнитов и индукцией 0,9 Тл позволяют обогащать продукт крупностью менее 3 мм, содержащий слабомагнитные минералы (ильменит, альмандин, псиломелан, браунит) с удельной магнитной восприимчивостью порядка $5 \cdot 10^{-7}$ м³/кг и более. Сепараторы можно применять для обезжелезивания неметаллических полезных ископаемых. Для извлечения слабомагнитных минералов с удельной магнитной восприимчивостью менее $5 \cdot 10^{-7}$ м³/кг (пиролюзит, ставролит) разработанные сепараторы не пригодны.

Ключевые слова: валковый магнитный сепаратор, постоянные высокоинтенсивные магниты, крупность частиц, выход концентрата, массовая доля марганца, удельная магнитная восприимчивость, ильменит, псиломелан, браунит, пиролюзит.

Для цитирования: Пелевин А.Е. Обогащение слабомагнитных минералов в валковых сепараторах с системой из постоянных магнитов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 11-1. – С. 155–168. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_155.

Weakly magnetic minerals processing in roller separators with a system of permanent magnets

A. E. Pelevin

Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

Abstract: The use of roll-type magnetic separators with a system with permanent magnets made of Nd-Fe-B for the mineral dressing of weakly magnetic minerals is considered. Roll-type magnetic separators with bottom feed of material for dry and wet dressing were tested.

The best results were obtained when using a magnetic system with alternating poles along the perimeter of the roll. The results of mineral dressing of gravitational titanium-containing middling product, manganese concentrate and flotation feldspar concentrate are presented. The size of the feed affects to the yield of the magnetic product. It is better to use a separate magnetic separation for large and small classes. The using of dry mineral dressing in roll-type magnetic separators with a bottom feed for a large size classes allows receive the greater yield of the magnetic product. The height of the working separation zone must be changed depending on the size of the feed. With wet mineral dressing in roll-type magnetic separators with a bottom feed, the output of the magnetic product is greater for small size classes. The developed roll-type magnetic separators with a system of permanent magnets and an induction of 0.9 T make it possible to enrich a product with a particle size of less than 3 mm, containing weakly magnetic minerals (ilmenite, almandine, psilomelane, brownite) with a specific magnetic susceptibility of the order of $5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ or more. Separators can be used for iron removal of non-metallic minerals. For the recovery of weakly magnetic minerals with specific magnetic susceptibility less than $5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ (pyrolusite, staurolite), the developed separators are not suitable.

Key words: roll magnetic separator, permanent high-intensity magnets, particle size, concentrate yield, mass fraction of manganese, specific magnetic susceptibility, ilmenite, psilomelane, brownite, pyrolusite.

For citation: Pelevin A. E. Weakly magnetic minerals processing in roller separators with a system of permanent magnets. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(11-1):155–168. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_155.

Введение

При обогащении слабомагнитных минералов применяются сепараторы с сильным магнитным полем [1–3]. Принципиально эти сепараторы делятся на высокоградиентные и на валковые сепараторы. Высокоградиентные (HGMS) сепараторы [4–6] обеспечивают более высокую производительность и магнитную силу в зоне разделения по сравнению с валковыми сепараторами. Высокоградиентные сепараторы применяются только для мокрого обогащения и имеют электромагнитную систему, обеспечивающую индукцию магнитного поля в зоне разделения до 2 Тл [7]. Недостатками высокоградиентных сепараторов являются повышенные эксплуатационные затраты, а также сложность осуществления сухого обогащения.

Валковые сепараторы делятся на аппараты с электромагнитной системой с замкнутой зоной разделения

(ЭВС и ЭВМ) [8–10] и на аппараты с системой из постоянных высокоинтенсивных магнитов (Nd-Fe-B) с открытой зоной разделения, выполненные по типу шкивного сепаратора [11–13]. Недостатком первой группы валковых сепараторов является повышенный расход электроэнергии. Недостатками второй группы аппаратов является резкое снижение магнитного поля при удалении от вала, что приводит к низкому извлечению слабомагнитных минералов при использовании нижней подачи питания в зону разделения, а также сложность осуществления мокрого обогащения.

Сепараторы с системами из постоянных высокоинтенсивных магнитов из сплава Nd-Fe-B широко применяются для сухого [14–16] и мокрого [17–19] обогащения сильномагнитных руд. Поэтому имеется возможность применения постоянных высокоинтенсивных магнитов для разработки конструкций

валковых сепараторов с замкнутой зоной разделения (по аналогии с сепараторами ЭВС и ЭВМ). При этом такие сепараторы могут иметь как верхнюю (сухое обогащение), так и нижнюю (сухое или мокрое обогащение) подачу исходного продукта.

Крупность исходного питания является одним из важных факторов, влияющих на процесс магнитной сепарации минералов. Поэтому в схемах обогащения может применяться отдельная магнитная сепарация для продуктов различной крупности. Верхний предел крупности обогащаемой слабомагнитной руды составляет 2–3 мм. При повышенной удельной магнитной восприимчивости слабомагнитных минералов крупность питания достигает 4–5 мм.

Для повышения эффективности магнитной сепарации при обогащении слабомагнитных руд применяются комбинированные схемы с применением тонкого грохочения и гравитационных [20–22], флотационных [23–25] и электрических [26] методов обогащения. При обогащении россыпных месторождений благородных металлов сепараторы с системами из постоянных высокоинтенсивных магнитов (Nd-Fe-B) также находят применение с целью удаления в хвосты тяжёлых сильномагнитных и слабомагнитных минералов [27].

Целями выполненных исследований явились разработка конструкции валкового сепаратора с замкнутой магнитной системой из постоянных магнитов (Nd-Fe-B), оценка области применения такого сепаратора и оценка влияния крупности исходного продукта на результаты сухого и мокрого обогащения.

Характеристики оборудования и исходного сырья

Опыты выполнены на лабораторных валковых магнитных сепараторах с нижней подачей материала для сухого

(ПВС-10/6) и мокрого (ПВМ-10/6) обогащения. Также разработана конструкция с использованием верхней подачи исходного продукта при сухом обогащении.

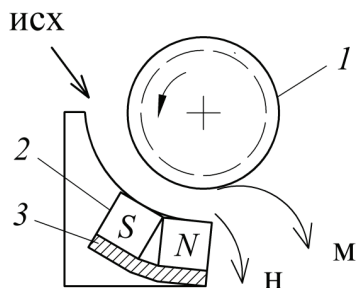
Сепараторы созданы на основе лабораторного роликового сепаратора СЭ-138Т, путём замены электромагнитной системы на магнитную систему из постоянных магнитов из сплава Nd-Fe-B. Принципиальная конструкция валкового сепаратора приведена на рисунке. Основными элементами вала являются валок 1 с зубчатым сечением и магнитная система, состоящая из постоянных магнитов 2 и магнитопровода 3.

Испытаны два варианта магнитной системы (рисунки) с чередованием полюсов по периметру вала (вариант «А») и по длине вала (вариант «Б»). Максимальная индукция магнитного поля в зоне разделения на зубцах вала достигается при варианте «А» и составляет $B = 0,9$ Тл (при расстоянии между зубцами вала и магнитной системой $\Delta = 3$ мм). При варианте «Б» индукция магнитного поля на зубцах вала снижается до 0,8 Тл. Это говорит о том, что следует ожидать большего извлечения слабомагнитных минералов в магнитный продукт при использовании магнитной системы с чередованием полюсов по периметру вала (вариант «А»).

Для выбора типа магнитной системы (вариант «А» или «Б») и для оценки влияния крупности исходного питания на показатели сухого и мокрого обогащения в качестве исходного продукта использован коллективный гравитационный промпродукт россыпного месторождения, содержащий слабомагнитные минералы (ильменит, гранат и ставролит). Гранат представлен альмандином.

В качестве исходного продукта для оценки влияния крупности питания

а



б

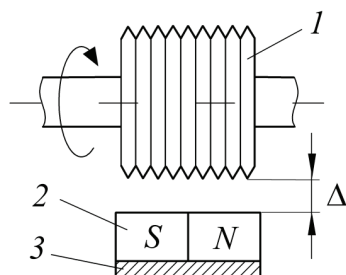


Рис. Схема валкового сепаратора ПВС-10/6: а — чередование полюсов по периметру валка (вид сбоку, вариант «А»); б — чередование полюсов по длине валка (вид спереди, вариант «Б»); 1 — валок с зубчатым сечением; 2 — полюса из постоянных магнитов (Nd-Fe-B); 3 — магнитопровод; Δ — расстояние между зубцами валка и магнитной системой; М — магнитный продукт; Н — немагнитный продукт

Fig. Scheme of the roll separator PVS-10/6: а — alternation of poles along the perimeter of the roll (side view, option “A”); б — alternation of poles along the length of the roll (front view, option “B”); 1 — roll with a notched section; 2 — poles of permanent magnets (Nd-Fe-B); 3 — magnetic core; Δ — distance between the teeth of the roll and the magnetic system; М — magnetic product; N — non-magnetic product

на показатели мокрого обогащения также использован низкокачественный гравитационный марганцевый концентрат, содержащий псиломелан, браунит и незначительное количество пиролюзита.

Применение разработанного сепаратора исследовано для оценки возможности дообогащения марганцевого (пиролюзитового) концентрата и для обезжелезивания полевошпатового концентрата.

Достоинствами разработанных валковых сепараторов ПВС-10/6 и ПВМ-10/6 по сравнению с валковыми сепараторами с электромагнитными системами [28] являются меньшая масса и отсутствие расхода электроэнергии на создание магнитного поля.

Сухое магнитное обогащение в валковых сепараторах и выбор типа магнитной системы

Результаты испытаний лабораторного сепаратора ПВС-10/6 для сухого обогащения приведены в табл. 1. Эти испытания выполнены для выбора оптимального варианта магнит-

ной системы из постоянных магнитов. В качестве критерия для оценки извлекающей способности сепаратора принят выход магнитного продукта. Чем больше выход магнитного продукта, тем выше магнитная сила в рабочей зоне сепаратора. Опыты выполнены при двух режимах сепарации (1 и 2). Режим № 1 соответствует верхнему положению шибера, а режим № 2 соответствует нижнему положению шибера. Нижнее положение шибера соответствует большему расстоянию верхней части шибера от валка в зоне разгрузки продуктов сепарации. Исходным продуктом при опытах явились два класса крупности ($-0,63+0$ и $-3+0,63$ мм) гравитационного промпродукта, содержащего ильменит, гранат и ставролит.

При варианте магнитной системы «А» с чередованием полюсов по периметру валка при обоих режимах сепарации и различных крупностях питания выход магнитного продукта выше, чем при варианте «Б» с чередованием

полюсов по длине валка (табл. 1). Результаты опытов подтвердили вышеприведённые результаты измерений индукции магнитного поля на зубцах валка для обоих вариантов магнитной системы сепаратора. Дополнительно выполнены опыты на лабораторном роликовом сепараторе 138Т-СЭМ с электромагнитной системой при $V = 0,9$ Тл на зубцах валка. Полученные результаты аналогичны данным, приведённым в табл. 1, при использовании сепаратора с системой из постоянных магнитов (вариант «А»). Поэтому

в дальнейшем принят к использованию вариант «А» магнитной системы.

Режим сепарации (положение шибера) влияет на выход магнитного продукта. Например, при режиме сепарации № 1 выход магнитного продукта крупностью $-0,63+0$ мм при варианте «А», равен 49,57%, а при режиме сепарации № 2 выход магнитного продукта равен 73,91%. Чем ниже положение шибера, тем выше выход магнитного продукта (табл. 1).

Крупность исходного продукта влияет на выход магнитного продукта.

Таблица 1

Результаты магнитного обогащения гравитационного промпродукта, содержащего ильменит, гранат и ставролит

Results of magnetic mineral dressing of gravity industrial product containing ilmenite, garnet and staurolite

Продукт	Крупность, мм	Режим сепарации	Выход, %
Чередование полюсов по периметру валка (вариант «А», $V=0,9$ Тл)			
Магнитный	-0,63+0	№ 1	49,57
Немагнитный			50,43
Итого:			100,00
Магнитный	-0,63+0	№ 2	73,91
Немагнитный			26,09
Итого:			100,00
Магнитный	-3+0,63	№ 1	50,46
Немагнитный			49,54
Итого:			100,00
Магнитный	-3+0,63	№ 2	74,07
Немагнитный			25,93
Итого:			100,00
Чередование полюсов по длине валка (вариант «Б», $V=0,8$ Тл)			
Магнитный	-0,63+0	№ 1	10,19
Немагнитный			89,81
Итого:			100,00
Магнитный	-0,63+0	№ 2	44,86
Немагнитный			55,14
Итого:			100,00
Магнитный	-3+0,63	№ 1	11,11
Немагнитный			88,89
Итого:			100,00
Магнитный	-3+0,63	№ 2	53,85
Немагнитный			46,15
Итого:			100,00

Выход магнитного продукта выше при крупности материала $-3+0,63$ мм, чем при крупности $-0,63+0$ мм. Например, при режиме сепарации № 1 выход магнитного продукта крупностью $-0,63+0$ мм при варианте «А», равен 49,57%, а при крупности $-3+0,63$ мм выход равен 50,46%. Это объясняется тем, что крупные частицы ближе расположены к зубцам валка, чем мелкие частицы (при постоянной высоте рабочей зоны разделения). Поэтому на крупные частицы действует магнитное поле с большей индукцией, что приводит к большему извлечению крупных частиц в магнитный продукт. Полученные результаты справедливы при сухом магнитном обогащении в сепараторах с нижней подачей материала. При использовании сепараторов с верхней подачей большую крупность будет иметь немагнитный продукт, по сравнению с магнитным продуктом.

Для снижения влияния крупности на результаты обогащения в валковых сепараторах с нижней подачей материала рекомендуется применять разделение по крупности и отдельное обогащение мелкого и крупного продуктов. Для продуктов различной крупности лучше применять сепараторы с различными вариантами магнитной системы.

Результаты минералогических исследований с помощью оптического микроскопа показали, что в магнитный продукт из полезных минералов извлеклись ильменит и гранат. Ставролит в магнитный продукт извлёкся в незначительном количестве только при режиме сепарации № 2.

С помощью пондеромоторного метода на магнитных весах определены удельные магнитные восприимчивости ильменита, альмандина и ставролита, составившие $38,4 \cdot 10^{-7}$; $8,3 \cdot 10^{-7}$; $3,2 \cdot 10^{-7}$ м³/кг. Магнитная восприимчивость определена для фракций

минералов крупностью $-0,15+0,1$ мм, максимально доведённых до мономинеральных фракций. Полученные результаты позволяют говорить о том, что разработанный валковый сепаратор с системой из постоянных магнитов (Nd-Fe-B) позволяет извлекать в магнитный продукт слабомагнитные минералы с удельной магнитной восприимчивостью более $5 \cdot 10^{-7}$ м³/кг.

Мокрое магнитное обогащение в валковых сепараторах

Опыты выполнены на магнитном сепараторе ПВМ-10/6 с нижней подачей материала с погруженным в воду валком. Испытания выполнены на сепараторе с вариантом магнитной системы «А» с чередование полюсов по периметру валка. В качестве исходных продуктов использованы низкокачественные гравитационные марганцевые концентраты с массовыми долями марганца 30 и 35% и коллективный гравитационный промпродукт россыпного месторождения, содержащий ильменит, гранат и ставролит. Выполнено обогащение двух классов крупности $-1,2+0,3$ мм и $-0,3+0$ мм. Качество продуктов разделения оценивалось по массовой доле TiO₂ для ильменитсодержащего промпродукта и по массовой доле Mn для марганцевых концентратов. Дополнительно выполнены опыты по сухому и мокрому дообогащению высококачественного марганцевого пиролюзитового концентрата с массовой долей марганца 50,2%.

Результаты опытов по мокрому обогащению ильменитсодержащего промпродукта представлены табл. 2.

Массовая доля TiO₂ в магнитном продукте (29,09–29,83%) и извлечение TiO₂ в магнитные продукты (83,44–81,16%) при обогащении обоих классов крупности практически одинаковы (табл. 2).

Выход магнитного продукта класса крупности $-0,3+0$ мм выше, чем выход

Таблица 2

Результаты магнитного обогащения ильменитсодержащего промпродукта
Results of magnetic mineral dressing of ilmenite-containing middling product

Продукт	Выход, %	Массовая доля TiO ₂ , %	Извлечение TiO ₂ , %
Ильменитсодержащий продукт -0,3+0 мм			
Магнитный	70,9	29,09	83,44
Немагнитный	29,1	14,07	16,56
Исходный	100,0	24,72	100,00
Ильменитсодержащий продукт -1,2+0,3 мм			
Магнитный	46,8	29,83	81,16
Немагнитный	53,2	6,09	18,84
Исходный	100,0	17,20	100,00

магнитного продукта более крупного класса -1,2+0,3 мм. Выход магнитного продукта при обогащении класса крупности -0,3+0 мм составил 70,9%, а при обогащении класса крупности -1,2+0,3 мм составил 46,8% (табл. 2). Это можно объяснить тем, что мелкие частицы всплывают вследствие турбулентности потока пульпы и малой их массы и тем самым приближаются к валку, где магнитная сила максимальна. Но величина выхода магнитного продукта зависит в большей степени от доли слабомагнитных минералов в питании сепаратора. В мелком продукте массовая доля TiO₂ выше (24,72%), чем в крупном продукте (17,2%). Поэтому при обогащении ильменитсодержащего продукта больший выход магнитного продукта при обогащении класса крупности -0,3+0 мм достигнут в основном за счёт повышенной массовой доли TiO₂ в этом классе крупности. Кроме этого в питании сепарации содержались другие слабомагнитные частицы, которые могли увеличить выход магнитного продукта при обогащении класса крупности -0,3+0 мм.

В табл. 3 приведены результаты мокрого магнитного обогащения марганцевых гравитационных концентратов с массовыми долями марганца 30 и 35%. Выход магнитного продукта

выше при обогащении марганцевого концентрата с массовой долей 35% Mn.

Прирост массовой доли Mn в магнитном продукте (4,66–5,23%) больше при дообогащении гравитационного концентрата с массовой долей марганца 30% по сравнению дообогащением гравитационного концентрата с массовой долей марганца 35% (прирост 0,77–1,82%). Массовая доля марганца в немагнитном продукте выше (31,49–32,5 против 21,8–24,84%) при обогащении более богатого концентрата (35% Mn) по сравнению с бедным концентратом (30% Mn). Это говорит о том, что для рассматриваемого гравитационного концентрата с массовой долей марганца 35% применение магнитного обогащения для повышения качества концентрата не эффективно (табл. 3).

Выход магнитного продукта при обогащении марганцевых концентратов в поле 0,9 Тл выше при крупности -0,3+0 мм, чем при крупности -1,2+0,3 мм. При обогащении класса крупности -0,3+0 мм выход магнитного продукта составил 64,8 и 76,90% для марганцевых концентратов с массовой долей 30 и 35% Mn. При обогащении класса крупности -1,2+0,3 мм выход магнитного продукта составил 53,8 и 58,8% для марганцевых концентратов с массовой долей 30 и 35% Mn. Массовая доля марганца в классах

Таблица 3

Результаты магнитного обогащения марганцевых гравитационных концентратов
Results of magnetic mineral dressing of manganese gravity concentrates

Продукт	Выход, %	Массовая доля Mn, %	Извлечение Mn, %
Марганцевый концентрат (30% Mn) крупностью $-0,3+0$ мм			
Магнитный	64,8	34,86	74,64
Немагнитный	35,2	21,80	25,36
Исходный	100,0	30,26	100,00
Марганцевый концентрат (30% Mn) крупностью $-1,2+0,3$ мм			
Магнитный	53,8	36,16	62,90
Немагнитный	46,2	24,84	37,10
Исходный	100,0	30,93	100,00
Марганцевый концентрат (35% Mn) крупностью $-0,3+0$ мм			
Магнитный	76,9	35,82	78,58
Немагнитный	23,1	32,50	21,42
Исходный	100,0	35,05	100,00
Марганцевый концентрат (35% Mn) крупностью $-1,2+0,3$ мм			
Магнитный	58,8	35,90	61,93
Немагнитный	41,2	31,49	38,07
Исходный	100,0	34,08	100,00

крупности $-0,3+0$ и $-1,2+0,3$ мм находится на одном уровне (табл. 3). Поэтому можно предполагать, что более высокий выход магнитного продукта при обогащении фракции $-0,3+0$ мм достигнут за счёт частичного подъёма мелких частиц вследствие турбулентности потока пульпы и их попаданию в зону максимальной магнитной силы (ближе к зубцам валька).

Уменьшение влияния крупности исходного питания на результаты мокрой магнитной сепарации решаются с помощью применения тонкого гидравлического грохочения для разделения исходного материала по крупности [29–31] с последующим раздельным обогащением. В настоящее время тонкое гидравлическое грохочение осуществляется на ситах с размером отверстий менее 0,071 мм [32, 33]. Производители магнитных сепараторов выпускают аппараты, предназначенные для обогащения продуктов с различной крупностью. Например, завод

«Рудгормаш» выпускает промышленные сепараторы 4ЭВМ-40/250А и 4ЭВМ-40/250А32. Сепараторы предназначены для обогащения продуктов с крупностью, соответственно $-1+0,1$ и $-4+0,1$ мм, и в основном отличающиеся шагом и углом заострения зубцов валька.

Удельная магнитная восприимчивость фракции $-0,3+0$ мм гравитационного марганцевого концентрата (30% Mn), содержащего в основном псиломелан и браунит, определённая пондеромоторным методом, составила $7,1 \cdot 10^{-7}$ м³/кг. Дообогащение пиролюзитового концентрата (50,2% Mn) с помощью разработанных сепараторов показало, что пиролюзит, имеющий удельную магнитную восприимчивость $(2,9-4) \cdot 10^{-7}$ м³/кг [8, 34, 35], в магнитный продукт не извлекается.

Результаты исследований показали, что разработанные вальковые сепараторы с системой из постоянных магнитов (Nd-Fe-B) и $B = 0,9$ Тл позво-

ляют извлекать в магнитный продукт слабомагнитные минералы (ильменит, алмадин, псиломелан, браунит и др.) с удельной магнитной восприимчивостью порядка $5 \cdot 10^{-7}$ м³/кг и более. Для магнитного обогащения слабомагнитных минералов с удельной магнитной восприимчивостью менее $5 \cdot 10^{-7}$ м³/кг (пиролюзит, ставролит и др.) разработанные лабораторные сепараторы не пригодны.

Результаты испытаний по обезжелезиванию полевошпатового концентрата

Результаты вышеприведённых исследований использованы при разработке опытного полупромышленного валкового сепаратора ПВС-23/50. В сепараторе использован вариант «А» магнитной системы. Применение постоянных магнитов из Nd-Fe-B с большими геометрическими размерами позволило достичь индукцию магнитного поля на зубах валка 1,1 Тл. Сепаратор испытан в полупромышленных условиях с целью обезжелезивания флотационного полевошпатового концентрата при удельной производительности 1,1 т/(ч·м). Результаты испытаний приведены в табл. 4.

Результаты испытаний показали возможность получить из марки ПШ-0,3 марку ПШ-0,2 (где цифра в аббревиатуре означает массовую долю Fe₂O₃ в полевом шпате) с помощью разработанного сепаратора ПВС-23/50 при потерях в выходе концентрата 3,35% (табл. 4).

Заключение

Для обогащения слабомагнитных минералов можно использовать валковые индукционные сепараторы с системой из постоянных магнитов из Nd-Fe-B. Испытания показали, что больший выход магнитного продукта достигается при использовании магнитной системы с чередованием полюсов по периметру валка по сравнению с магнитной системой с чередованием полюсов и по длине валка.

Крупность исходного материала влияет на выход магнитного продукта. При сухом обогащении в сепараторах с нижней подачей материала выход магнитного продукта больше для крупных классов крупности. Высоту рабочей зоны разделения необходимо изменять в зависимости от крупности исходного материала. Для мелких частиц необходимо использовать сепаратор с меньшей высотой зоны разделения. При мокром обогащении в сепараторах с нижней подачей материала выход магнитного продукта больше для мелких классов крупности. Лучше использовать отдельное магнитное обогащение для крупных и мелких классов.

Разработанные валковые сепараторы с системой из постоянных магнитов (Nd-Fe-B) и $B = 0,9$ Тл позволяют обогащать продукт крупностью менее 3 мм, содержащий слабомагнитные минералы (ильменит, алмадин, псиломелан, браунит и др.) с удельной магнитной восприимчивостью порядка

Таблица 4

Результаты магнитного обезжелезивания полевошпатового концентрата
Results of magnetic deferrization of feldspar concentrate

Продукт	Выход, %	Массовая доля Fe ₂ O ₃ , %	Извлечение Fe ₂ O ₃ , %
Магнитный	3,35	3,77	40,76
Немагнитный	96,65	0,19	59,24
Исходный	100,00	0,31	100,00

$5 \cdot 10^{-7}$ м³/кг и более. Для извлечения слабомагнитных минералов с удельной магнитной восприимчивостью менее $5 \cdot 10^{-7}$ м³/кг (пирролюзит, ставролит и др.) разработанные сепараторы не пригодны.

Достоинством валковых сепараторов с системами из постоянных редкоземельных магнитов по сравнению

с сепараторами с электромагнитными системами являются меньшие габариты, масса и расход электроэнергии. К недостаткам следует отнести меньшую индукцию магнитного поля, а также сложность очистки зоны разделения сепаратора от сильномагнитных частиц магнетита и аппаратного железа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kuskov V. B., Lvov V. V., Yushina T. I.* Increasing the recovery ratio of iron ores in the course of preparation and processing // CIS Iron and Steel Review. — 2021. — Vol. 21. — no. 1. — pp. 4–8. DOI: 10.17580/cisirs.2021.01.01.

2. *Ku J, Xia J., Li J, Peng X, Guo B, Ran H.* Accurate calculation of major forces acting on magnetic particles in a high-gradient magnetic field: A 3D finite element analysis. Powder Technology, 2021, Vol. 394, pp. 767–774. DOI:10.1016/j.powtec.2021.08.052.

3. *Wang Y, Xue Z, Zheng X, Lu D, Sun Z.* Matching relation between matrix aspect ratio and applied magnetic induction for maximum particle capture in transversal high gradient magnetic separation. Minerals Engineering, 2020, Vol. 151, 106316. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106316.

4. *Zheng X., Xue Z, Wang Y., Zhu G., Li X., Lu D.* Modeling of particle capture in high gradient magnetic separation: A review. Powder Technology, 2019, Vol. 352, pp. 159–169. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.04.048.

5. *Тагунов Е. Я., Измалков В. А., Пучков В. А., Диев Д. Н.* Особенности конструирования полиградиентных матриц для высокоградиентных сепараторов со сверхпроводящими магнитными системами // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 9. — С. 102–114. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-102-114.

6. *Liu J., Wang F., Chen J., Xu L., Cao Q.* Insights into the effect of magnetic interactions on the magnetization process of matrices in high gradient magnetic separation. Minerals Engineering, 2021, Vol. 174, 107269. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107269.

7. *Xue Z., Wang Y., Zheng X., Lu D., Sun Z., Hu Z.* Simulation of particle accumulation in high gradient magnetic separation based on static buildup model (SBM), Minerals Engineering. 2022, Vol. 175, 107290. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107290.

8. *Кармазин В. В., Кармазин В. И.* Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. Т. 1. Магнитные и электрические методы обогащения полезных ископаемых. — М.: Горная книга, 2012. — 672 с.

9. *Сыров Е. В.* Расчет картины магнитного поля в горизонтальном сечении рабочего зазора роликового магнитного сепаратора // Автоматизированные технологии и производства. — 2013. — № 5. — С. 16–20.

10. *Азбель Ю. И., Дмитриев С. В., Мезенин А. О., Бухаров М. И.* Разработка технологической схемы получения товарного ильменитового продукта из черного концентрата Буткинского ГОКа // Обогащение руд. — 2015. — № 1. — С. 14–17.

11. *Конев Н. Н.* Магнитное обогащение кварцевых песков. Анализ работы сепараторов // Стекло и керамика. — 2010. — № 5. — С. 12–17.

12. *Tripathy S. K., Singh V, Murthy Y. R., Banerjee P. K., Suresh N.* Influence of process parameters of dry high intensity magnetic separators on separation of hematite. International Journal of Mineral Processing, 2017, Vol. 160, pp. 16–31. DOI:10.1016/j.minpro.2017.01.007.

13. *Пелевин А. Е., Цыпин Е. Ф., Колтунов А. В., Комлев С. Г.* Высокоинтенсивные магнитные сепараторы с постоянными магнитами // Известия вузов. Горный журнал. — 2001. — № 4–5. — С. 133–136.

14. Пелевин А. Е., Сытых Н. А., Черепанов Д. В. Влияние крупности частиц на эффективность сухой магнитной сепарации // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 11–1. — С. 293–305. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_293.

15. Shibaeva D. N., Kompanchenko A., Tereschenko S. V. Analysis of the Effect of Dry Magnetic Separation on the Process of Ferruginous Quartzites Disintegration. Minerals, 2021, Vol. 11, Is. 8, 797. DOI: 10.3390/min11080797.

16. Вайсберг Л. А., Дмитриев С. В., Мезенин А. О. Управляемые магнитные аномалии в технологиях переработки минерального сырья // Горный журнал. — 2017. — № 10. — С. 26–32. DOI: 10.17580/gzh.2017.10.06.

17. Пелевин А. Е., Сытых Н. А. Применение сепараторов с повышенной индукцией магнитного поля при обогащении титаномагнетитовой руды // Обогащение руд. — 2020. — № 2. — С. 15–20. DOI: 10.17580/or.2020.02.03.

18. Якубайлик Э. К., Ганженко И. М., Бутов П. Ю., Клиш В. И. Снижение потерь железа при мокрой сепарации в высоких полях // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. — 2016. — Т. 9. — № 8. — С. 1302–1310.

19. Пелевин А. Е. Повышение качества магнетитовых концентратов в переменном магнитном поле // Обогащение руд. — 2019. — № 6. — С. 19–24. DOI: 10.17580/or.2019.06.04.

20. Прокопьев С. А., Прокопьев Е. С., Емельянова К. К., Напольских С. А. Получение высококачественного магнетит-гематитового железорудного концентрата методом винтовой сепарации // Горной журнал. — 2021. — № 6. — С. 54–60. DOI: 10.17580/gzh.2021.06.07.

21. Nienaber E. C., Auret L. Experimental modelling and plant simulation of spiral concentrators: Comparing response surface methodology and extended Holland-Batt models. Minerals Engineering, 2019, Vol. 141, 105833. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.105833.

22. Пелевин А. Е. Влияние магнитной флокуляции на результаты обогащения железосодержащих руд // Обогащение руд. — 2021. — № 4. — С. 15–20. DOI: 10.17580/or.2021.04.03.

23. Cai J., Deng J., Yang H., Tong L., Wu D., Wen S., Liu Z., Zhang Y. A novel activation for ilmenite using potassium permanganate and its effect on flotation response. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, Vol. 604, 125323. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2020.125323.

24. Shrimali K., Atluri V., Wang Y., Bacchuwar S., Miller J. D. The nature of hematite depression with corn starch in the reverse flotation of iron ore. Journal of Colloid and Interface Science, 2018, Vol. 524, pp. 337–349. DOI: 10.1016/j.jcis.2018.04.002.

25. Safari M., Hoseinian F. S., Deglon D., Leal Filho L. S., Souza Pinto T. C. Investigation of the reverse flotation of iron ore in three different flotation cells: Mechanical, oscillating grid and pneumatic. Minerals Engineering, 2020, Vol. 150, 106283. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106283.

26. Yan X., Wang H., Peng Z., Hao J., Zhang G., Xie W., He Y. Triboelectric properties of ilmenite and quartz minerals and investigation of triboelectric separation of ilmenite ore. International Journal of Mining Science and Technology, 2018, Vol. 28, Iss. 2, pp. 223–230. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.01.003.

27. Алексеев В. С., Банщикова Т. С., Серый Р. С. Обоснование применения магнитной сепарации при переработке исходных песков рудно-россыпного месторождения ручья Болотистый (Нижнее Приамурье) // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 8. — С. 190–197. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-190-197.

28. Tripathy S. K., Singh V. Influence of particle size on dry high-intensity magnetic separation of paramagnetic mineral. Advanced Powder Technology, 2017, Vol. 28, Iss. 3, pp. 1092–1102. DOI: 10.1016/j.appt.2017.01.018.

29. Пелевин А. Е., Сытых Н. А. Применение тонкого гидравлического грохочения для стадийного выделения концентрата // Обогащение руд. — 2021. — № 1. — С. 8–14. DOI: 10.17580/or.2021.01.02.


30. Вайсберг Л. А., Коровников А. Н., Трофимов В. А. Модернизация технологических циклов грохочения на основе инновационного оборудования (к 100-летию института «Механобр») // Горный журнал. — 2017. — № 1. — С. 11–17. DOI: 10.17580/gzh.2017.01.02.

31. Пелевин А. Е. Получение гематитового концентрата из гематит-магнетитовых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3–1. — С. 422–430. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-422-430.

32. Косой Г. М., Винников А. Я. Технологические испытания процесса тонкого гидравлического грохочения измельченных руд на многочастотном грохоте компании Kroosh Technologies // Цветные металлы. — 2021. — № 6. — С. 10–15. DOI: 10.17580/tsm.2021.06.01.

33. Dündar H. Investigating the benefits of replacing hydrocyclones with high-frequency fine screens in closed grinding circuit by simulation. Minerals Engineering, 2020, Vol. 148, 106212. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106212.

34. Вайсберг Л. А., Кононов О. В., Устинов И. Д. Основы геометаллургии. — Санкт-Петербург: Русская коллекция, 2020. — 376 с.

35. Дорошенко М. В., Башлыкова Т. В. Технологические свойства минералов — М.: Теплоэнергетик, 2007. — 296 с. 

REFERENCES

1. Kuskov V. B., Lvov V. V., Yushina T. I. Increasing the recovery ratio of iron ores in the course of preparation and processing. CIS Iron and Steel Review, 2021, Vol. 21, pp. 4–8. DOI: 10.17580/cisisr.2021.01.01.

2. Ku J, Xia J., Li J, Peng X, Guo B, Ran H. Accurate calculation of major forces acting on magnetic particles in a high-gradient magnetic field: A 3D finite element analysis. Powder Technology, 2021, Vol. 394, pp. 767–774. DOI:10.1016/j.powtec.2021.08.052.

3. Wang Y, Xue Z, Zheng X, Lu D, Sun Z. Matching relation between matrix aspect ratio and applied magnetic induction for maximum particle capture in transversal high gradient magnetic separation. Minerals Engineering, 2020, Vol. 151, 106316. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106316.

4. Zheng X., Xue Z, Wang Y., Zhu G., Li X., Lu D. Modeling of particle capture in high gradient magnetic separation: A review. Powder Technology, 2019, Vol. 352, pp. 159–169. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.04.048.

5. Tagunov E.Ya., Izmalkov V.A., Puchkov V.A., Diev D.N. Features of constructing polygradient matrices for high-gradient separators with superconducting magnetic systems. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2019;(9):102–114. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-102-114.

6. Liu J., Wang F., Chen J., Xu L., Cao Q. Insights into the effect of magnetic interactions on the magnetization process of matrices in high gradient magnetic separation. Minerals Engineering, 2021, Vol. 174, 107269. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107269.

7. Xue Z., Wang Y., Zheng X., Lu D., Sun Z., Hu Z. Simulation of particle accumulation in high gradient magnetic separation based on static buildup model (SBM), Minerals Engineering. 2022, Vol. 175, 107290. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107290.

8. Karmazin V.V., Karmazin V.I. Magnetic, electrical and special methods for mineral processing. Vol. 1. Magnetic and electrical methods for mineral processing, Moscow, Gornaya Kniga, 2012, 672 p. [In Russ].

9. Syrov E. V. Calculation of the magnetic field pattern in the horizontal section of the working gap of the roller magnetic separator. Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva. 2013, no 5, pp. 16–20. [In Russ].

10. Azbel Y. I., Dmitriyev S. V., Mezenin A. O., Bukharov M. I. The butkinsky mining and processing complex rougher concentrate flow sheet development with a view to produce marketable ilmenite product. *Obogashchenie Rud.* 2015, no. 1, pp. 14–17. [In Russ].
11. Konev N. N. Magnetic enrichment of quartz sands. Analysis of separators operation. *Steklo i Keramika.* 2010, no. 5, pp. 12–17. [In Russ].
12. Tripathy S. K., Singh V, Murthy Y. R., Banerjee P. K., Suresh N. Influence of process parameters of dry high intensity magnetic separators on separation of hematite. *International Journal of Mineral Processing*, 2017, Vol. 160, pp. 16–31. DOI: 10.1016/j.minpro.2017.01.007.
13. Pelevin A. E., Tsyypin E. F., Koltunov A. V., Komlev S. G. High-intensity magnetic separators with permanent magnets. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal.* 2001, no 4–5. pp. 133–136. [In Russ].
14. Pelevin A. E., Sytykh N. A., Cherepanov D. V. Particle size impact on dry magnetic separation efficiency. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(11–1):293–305. [In Russ]. DOI: 10.2501 8/0236_1493_2021_111_0_293.
15. Shibaeva D. N., Kompanchenko A., Tereschenko S. V. Analysis of the Effect of Dry Magnetic Separation on the Process of Ferruginous Quartzites Disintegration, *Minerals*, 2021, Vol. 11, Iss. 8, 797. DOI: 10.3390/min11080797.
16. Vaisberg L. A., Dmitriev S. V., Mezenin A. O. Controllable magnetic anomalies in mineral processing technologies. *Gornyi Zhurnal.* 2017, no. 10. pp. 26–32. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.10.06.
17. Pelevin A. E., Sytykh N. A. Increased magnetic field induction separators in titanium magnetite ore processing. *Obogashchenie Rud.* 2020, no 2, pp. 15–20. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2020.02.03.
18. Yakubailik E. K., Ganzhenko I. M., Butov P. Yu., Kilin V. I. Reduce the loss iron in the wet separation in high fields. *Zhurnal Sibirskogo Federalnogo Universiteta. Seriya: Tekhnika i Tekhnologii.* 2016, Vol. 9, no. 8, pp. 1302–1310. [In Russ].
19. Pelevin A. E. Improving magnetite concentrate quality in an alternating magnetic field. *Obogashchenie Rud.* 2019. no. 6, pp. 19–24. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2019.06.04.
20. Prokopiev, S. A., Prokopiev, E. S., Emelyanova, K. K., Napolskikh, S. A. High-quality magnetite–hematite concentrate production by spiral separation. *Gornyi Zhurnal.* 2021, no. 6, pp. 86–90. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.06.07.
21. Nienaber E. C., Auret L. Experimental modelling and plant simulation of spiral concentrators: Comparing response surface methodology and extended Holland-Batt models. *Minerals Engineering*, 2019, Vol. 141, 105833. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.105833.
22. Pelevin A. E. Effects of magnetic flocculation on iron-bearing ore concentration. *Obogashchenie Rud.* 2021, no 4, pp. 15–20. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2021.04.03.
23. Cai J., Deng J, Yang H., Tong L., Wu D., Wen S., Liu Z., Zhang Y. A novel activation for ilmenite using potassium permanganate and its effect on flotation response. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, Vol. 604, 125323. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2020.125323.
24. Shrimali K., Atluri V., Wang Y., Bacchuwar S., Miller J. D. The nature of hematite depression with corn starch in the reverse flotation of iron ore. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, Vol. 524, pp. 337–349. DOI: 10.1016/j.jcis.2018.04.002.
25. Safari M., Hoseinian F. S., Deglon D., Leal Filho L. S., Souza Pinto T. C. Investigation of the reverse flotation of iron ore in three different flotation cells: Mechanical, oscillating grid and pneumatic, *Minerals Engineering*, 2020, Vol. 150, 106283. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106283.
26. Yan X., Wang H., Peng Z., Hao J., Zhang G., Xie W., He Y. Triboelectric properties of ilmenite and quartz minerals and investigation of triboelectric separation of ilmenite ore. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2018, Vol. 28, Iss. 2, pp. 223–230. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.01.003.

27. Alekseev V. S., Banshchikova T. S., Seryy R. S. Justification of magnetic separation application in processing of initial gold sand from the Bolotisty Stream primary-and-placer deposit, Lower Amur Region. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(8):190–197. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-190–197.

28. Tripathy S. K., Singh V. Influence of particle size on dry high-intensity magnetic separation of paramagnetic mineral. *Advanced Powder Technology*, 2017, Vol. 28, Iss. 3, pp. 1092–1102. DOI: 10.1016/j.apt.2017.01.018.

29. Pelevin A. E., Sytykh N. A. Fine hydraulic screening for staged separation of titanium-magnetite concentrate. *Obogashchenie Rud.* 2021, no 1, pp. 8–14. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2021.01.02.

30. Vaisberg L. A., Korovnikov A. N., Trofimov V. A. Innovative re-equipment of screening circuits (to commemorate the 100th anniversary of the Mekhanobr Institute). *Gornyi Zhurnal.* 2017, no 1, pp. 11–17. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.01.02.

31. Pelevin A. E. Production of hematite concentrate from hematite–magnetite ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(3–1):422–430. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-422–430.

32. Kosoj G. M., Vinnikov A. Ya. Fine hydraulic screening of ground ores on a multi-frequency screen by kroosh technologies: In-process testing. *Tsvetnye Metally.* 2021, no. 6, pp. 10–15. DOI: 10.17580/tsm.2021.06.01.

33. Dündar H. Investigating the benefits of replacing hydrocyclones with high-frequency fine screens in closed grinding circuit by simulation. *Minerals Engineering*, 2020, Vol. 148, 106212. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106212.

34. Vajsberg L. A., Kononov O. V., Ustinov I. D. Fundamentals of geometallurgy, Saint-Petersburg, *Russkaya kolleksiya*, 2020, 376 p. [In Russ].

35. Doroshenko M. V., Bashlykova T. V. Technological properties of minerals, Moscow, *Teploenergetik*, 2007, 296 p. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пелевин Алексей Евгеньевич — докт. техн. наук, доцент, профессор кафедры Обогащения полезных ископаемых, ORCID iD <https://orcid.org/0000-0001-6063-3932>, Россия, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» (Министерство науки и высшего образования Российской Федерации), г. Екатеринбург, 620144, ГСП, ул. Куйбышева, 30, кафедра Обогащения полезных ископаемых (ОПИ), e-mail: a-pelevin@yandex.ru.

Причины о наличии потенциальных для возникновения конфликта интересов отсутствуют.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pelevin A. E., Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Mineral Processing at the Ural State Mining University, ORCID iD <https://orcid.org/0000-0001-6063-3932>, a-pelevin@yandex.ru, Ural State Mining University, 620144, 30, Kuibyshev st., Ekaterinburg, Russia.

Получена редакцией 16.06.2022; получена после рецензии 14.09.2022; принята к печати 10.10.2022.

Received by the editors 16.06.2022; received after the review 14.09.2022; accepted for printing 10.10.2022.

