

ВЛИЯНИЕ КРУПНОСТИ ЧАСТИЦ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СУХОЙ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ

А. Е. Пелевин¹, Н. А. Сытых², Д. В. Черепанов²

¹ Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия;

² «ЕВРАЗ Качканарский горно-обогатительный комбинат», Качканар, Россия

Аннотация: Рассмотрено влияние крупности мелкодроблённой титаномагнетитовой руды на результаты сухой магнитной сепарации с целью снижения потерь железа магнетитового с хвостами. Угол отрыва частиц от барабана сепаратора может быть одинаковым для частиц различной крупности в зависимости от их магнитной восприимчивости и индукции магнитного поля применяемого сепаратора. Поэтому в магнитный продукт частично будут попадать мелкие и бедные по железу куски с пониженной магнитной восприимчивостью. При этом в немагнитный продукт могут попадать крупные и в меньшей степени мелкие, богатые по железу сроски с повышенной магнитной восприимчивостью. Увеличение индукции магнитного поля барабанных сепараторов (с 0,16 до 0,24 Тл) позволяет применять схему сухого магнитного обогащения без предварительной классификации мелкодроблённой руды. При этом происходит снижение массовой доли железа общего и магнетитового в немагнитном продукте. Крупная и мелкая фракция хвостов сухой магнитной сепарации в магнитном поле с индукцией 0,25 Тл неклассифицированной руды имеет повышенную массовую долю железа магнетитового, по сравнению с промежуточными классами крупности. Теоретически наиболее рациональной технологией предварительного обогащения титаномагнетитовых руд является раздельная сухая магнитная сепарация в различных магнитных полях крупной фракции (высокая индукция) и мелкой фракции (низкая индукция).

Ключевые слова: сухая магнитная сепарация, крупность частиц, магнитная сила, угол отрыва частиц, индукция магнитного поля, титаномагнетит, железо магнетитовое, барабанный сепаратор.

Для цитирования: 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.

Particle size impact on dry magnetic separation efficiency

A. E. Pelevin¹, N. A. Sytykh², D. V. Cherepanov²

¹ Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia;

² EVRAZ Kachkanar Mining and Processing Plant, Kachkanar, Russia

Abstract: Spotlight of this study is on the influence exerted by sizes of finely milled titanium-magnetite ore on dry magnetic separation performance toward reduction in magnetite iron loss in tailings. The tear-off angle of particles from separator drum can differ for particles of

different size, subject to their magnetic susceptibility and field density of the separator model in use. For this reason, magnetic product can contain fines and particles with low iron content and low magnetic susceptibility. Alternatively, nonmagnetic product can contain large particles and aggregates with high iron content and high magnetic susceptibility. An increase in the field density of drum separators (from 0.16 to 0.24 T) allows using dry magnetic separation without preliminary screening of finely milled ore. In this case, mass fraction of total and magnetite iron reduces in nonmagnetic product. Coarse and fine particles in dry magnetic separation tailings at the field density of 0.25 T has an increased mass fraction of magnetite iron as compared with the intermediate sizes. Theoretically, the most effective technology of titanium–magnetite ore pretreatment is separate dry magnetic separation in different magnetic fields for large fractions (high field density) and fine fraction (low field density).

Key words: Dry magnetic separation, size, magnetic force, particle tear-off angle, field density, titanium-magnetite, drum separator.

For citation: 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: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_293.

Введение

Сухая магнитная сепарация (СМС) нашла широкое применение для предварительного обогащения крупнокусковой магнетитовой руды с целью вывода из процесса немагнитного продукта перед измельчением. Это позволяет значительно снизить затраты на измельчение. Для этой цели используются барабанные сепараторы со слабым магнитным полем с верхней подачей материала. Немагнитный продукт после классификации по крупности используется в качестве строительных материалов.

Теория и практика обогащения в барабанных магнитных сепараторах достаточно изучена [1–4], в том числе исследовано влияние крупности частиц на результаты магнитной сепарации [1, 5].

Гранулометрический состав исходного продукта оказывает влияние на результаты обогащения в барабанных сепараторах с верхней и нижней подачей материала. Так, в сепараторах с верхней подачей материала крупность магнитного продукта, как правило, ниже, по сравнению с немагнитным продуктом [5]. В сепараторах с нижней подачей материала, наоборот, крупность маг-

нитного продукта, как правило, выше, по сравнению с немагнитным продуктом [2, 6]. Это справедливо при одинаковой магнитной восприимчивости частиц различной крупности. Однако магнитная восприимчивость в кусках руды будет зависеть от содержания магнитных минералов в нём, что связано с раскрытием рудных и нерудных минералов при дроблении и измельчении. Поэтому выводы по влиянию крупности частиц на результаты сухого и мокрого обогащения в барабанных сепараторах будут справедливы только для конкретной руды с определённым вещественным составом и физико-механическими свойствами.

Целью выполненных исследований было оценить возможность снижения потерь железа магнетитового с хвостами сухой магнитной сепарации при помощи учёта влияния крупности частиц на результаты обогащения.

Объект и методы исследований

Основным объектом исследований является титаномагнетитовая руда Гусевогорского месторождения, характеризующаяся низкой массовой долей железа (15–16%) и весьма

тонкой и тонкой рудной вкрапленностью (0,03–0,2 мм) с преобладанием вкрапленной и равномерной текстуры титаномагнетита. Титаномагнетит имеет переменный состав по Fe, TiO₂ и V₂O₅. Вторым рудным минералом является ильменит, но содержание его не промышленное (менее 2%). Нерудные минералы представлены в основном пироксеном. Также присутствует плагиоклаз, оливин и роговая обманка и другие, менее распространённые минералы. Титаномагнетит в основном содержится в пироксенитах. В плагиоглазитах массовая доля титаномагнетита низкая.

Влияние формы частиц (лещадности) на результаты СМС выполнено применительно к асбестовой руде Баженовского месторождения, содержащей 4–5% магнетита. Основными горными породами являются серпентиниты и перидотиты. Особенностью асбестовых руд является положительная связь между массовыми долями железа (магнетита) и хризотил-асбеста в кусках руды с крупностью более 15–20 мм. Поэтому сухую магнитную сепарацию можно применять для предварительного обогащения асбестовых руд.

Оценка влияния крупности частиц на результаты разделения в магнитных сепараторах выполнена теоретическим и экспериментальным способом. Теоретические исследования включали расчёт магнитной силы, действующей на частицы различной крупности, и расчёт углов отрыва частиц от барабана сепаратора.

Экспериментальные исследования состояли в опробовании промышленных барабанных сепараторов с последующим расчётом показателей разделения и с определением гранулометрического состава магнитного и немагнитного продуктов с помощью ситового анализа.

Результаты теоретических исследований и их анализ

В барабанном магнитном сепараторе с верхней подачей материала частицы 4 находятся на наружной поверхности обечайки барабана 1 в зоне высокой индукции магнитного поля. При этом расстояние Δ от поверхности магнитной системы (от полюса 2) до ближнего края частицы (до наружной поверхности обечайки барабана) будет одинаковым как для крупной, так и для мелкой частицы. Однако расстояние $\Delta+d$ (расстояние от магнитной системы до дальнего края частицы) будет большим для крупной частицы (рис. 1). Поэтому величина магнитной силы, действующей на мелкие частицы, будет выше величины магнитной силы, действующей на крупные частицы. Удельная магнитная сила, отнесённая к единице массы частицы, Н/кг:

$$f_m = \frac{\chi B_0^2}{2\mu_0 d} e^{-2c\Delta} (1 - e^{-2cd}), \quad (1)$$

где χ — удельная магнитная восприимчивость частицы, м³/кг; B_0 — индукция магнитного поля на поверхности магнитной системы, Тл; c — коэффициент неоднородности магнитного поля, м⁻¹; Δ — расстояние от поверхности магнитной системы до частицы (до ближнего её края); d — размер (высота) частицы; μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, Гн/м [6].

Формулу (1) можно использовать при принятии равенства относительной магнитной проницаемости вакуума ($\mu = 1$) и воздуха ($\mu = 1,0000004$).

На рис. 2 приведены зависимости удельной магнитной силы, действующей на частицы титаномагнетитовой руды различной крупности с удельными магнитными восприимчивостями $1,2 \cdot 10^{-5}$ и $2 \cdot 10^{-5}$ м³/кг в сепараторах с верхней подачей материала при индукции магнитного поля

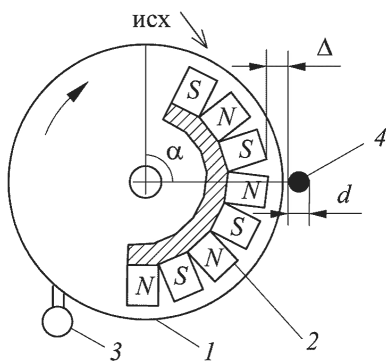


Рис. 1. Схема движения частицы в барабанном сепараторе с верхней подачей материала: 1 – барабан; 2 – полюсы магнитной системы; 3 – очиститель барабана; 4 – частица руды
 Fig. 1. Diagram of particle motion in drum separator with upper feed: 1 – drum; 2 – magnetic poles; 3 – drum cleaner; 4 – ore particle

на поверхности барабанов 0,16 и 0,25 Тл. Значения магнитных восприимчивостей частиц приняты, исходя из средних величины удельной магнитной восприимчивости титаномагнетитовой руды Гусевогорского месторождения, равной $0,6 \cdot 10^{-5}$ м³/кг. При этом предполагается, что частицы с $\chi = (1,2 - 2) \cdot 10^{-5}$ м³/кг должны при сухой магнитной сепарации попасть в магнитный продукт. Удельная магнитная сила рассчитана по формуле (1).

Увеличение индукции магнитного поля и удельной магнитной восприимчивости частиц приводит к повышению удельной магнитной силы, вызывающей притяжение частиц к барабану. Величина магнитной силы снижается при увеличении крупности частицы. При реальном обогащении эта закономерность проявится в различной крупности магнитного и немагнитного продуктов – магнитный продукт будет более мелкий по сравнению с немагнитным продуктом. Если быть точнее, то в сепараторах с верхней подачей

материала происходит частичное разделение не по крупности, а по высоте частицы или по форме частиц (плоская, кубовидная). Форму кусков можно охарактеризовать их «лещадностью», равной отношению большего размера частицы к меньшему размеру. Такая оценка формы кусков применяется при производстве щебня. Но при сухом магнитном обогащении в основном используют термин «крупность».

Величина удельной магнитной силы может быть одинаковой для частиц различной крупности в зависимости от их магнитной восприимчивости и индукции магнитного поля применяемого сепаратора. Например, на частицу с размером 10 мм и магнитной восприимчивостью $1,2 \cdot 10^{-5}$ м³/кг и на частицу с размером 35 мм и магнитной восприимчивостью $2 \cdot 10^{-5}$ м³/кг будет действовать одинаковая удельная магнитная сила (5 Н/кг) при индукции магнитного поля 0,16 Тл. При этом аналогичная магнитная сила, равная 5 Н/кг, будет действовать также на частицу с размером 55 мм и магнитной восприимчивостью $1,2 \cdot 10^{-5}$ м³/кг в магнитном поле с индукцией 0,25 Тл (рис. 2).

Это явление получило название равнопритягиваемости частиц, проявляющееся в равенстве удельных магнитных сил, действующих на частицы с разными размерами и магнитными свойствами [2, 7]:

$$\chi_D (B_{grad} B)_D = \chi_d (B_{grad} B)_d, \quad (2)$$

где χ_D и χ_d – удельные магнитные восприимчивости крупной и мелкой частицы, м³/кг; $(B_{grad} B)_D$ и $(B_{grad} B)_d$ – удельные магнитные силы магнитной системы, действующие на крупную и мелкую частицы размером D и d , Тл²/м.

Соотношение размеров магнитных частиц (D/d), притягиваемых с одинаковой силой к магнитной системе сепаратора

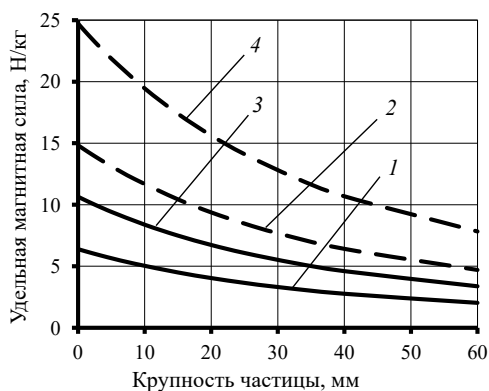


Рис. 2. Зависимость удельной магнитной силы, действующей на частицу, от крупности частицы: 1 и 2 — магнитная восприимчивость частицы $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$; 3 и 4 — магнитная восприимчивость частицы $2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$; 1 и 3 — индукция 0,16 Тл; 2 и 4 — индукция 0,25 Тл

Fig. 2. Specific magnetic force on particle versus particle size: 1 and 2 — magnetic susceptibility of particle $1.2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$; 3 and 4 — magnetic susceptibility of particle $2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$; 1 and 3 — field density of 0,16 T; 2 and 4 — field density of 0.25 T

ратора, зависит от многих факторов, таких как диапазон изменения магнитной восприимчивости извлекаемых частиц, неоднородность магнитного поля (коэффициент с), способ подачи материала в рабочую зону сепаратора (верхний или нижний), вид среды разделения (воздух, вода) и др.

При сухом магнитном обогащении явление равнопритягиваемости проявляется в одинаковых углах отрыва частиц с различными свойствами от барабана сепаратора. Угол отрыва частиц от барабана сепаратора можно рассчитать исходя из равенства удельных магнитной силы и механических сил (силы тяжести и центробежной силы) [1]:

$$f_m = f_c - g \cos \alpha = \left(\frac{v^2 (R + 0,5d)^2}{R^3} - g \cos \alpha \right), \quad (3)$$

где f_c и g — удельные центробежная сила и сила тяжести, Н/кг; α — угол поворота барабана (угол положения частицы на барабане, рис. 1), град; v — линейная скорость вращения барабана, м/с; R — радиус барабана, м/с.

Угол отрыва частиц от барабана рассчитан для промышленного сепаратора 2ПБС-90/250 с $R = 0,45 \text{ м}$ при $v = 1 \text{ м/с}$. Результаты расчётов приведены на рис. 3. При этом принято, что если частица не оторвётся от барабана при угле его поворота меньшем 180° , то она попадёт в магнитный продукт в месте окончания магнитной системы сепаратора (рис. 1). Если частица оторвётся от барабана при угле меньшем 90° , то она попадёт в немагнитный продукт. При угле отрыва частицы 90° – 180° существует вероятность попадания частицы как в магнитный, так

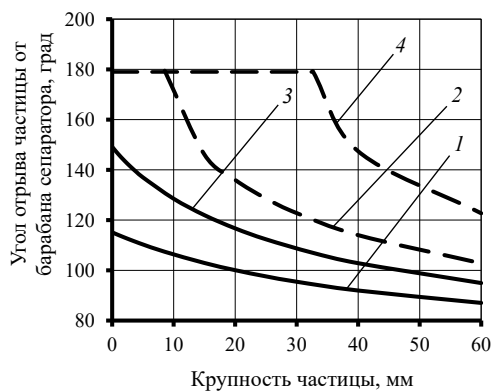


Рис. 3. Зависимость угла отрыва частицы от барабана магнитного сепаратора от крупности частицы: 1 и 2 — магнитная восприимчивость частицы $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$; 3 и 4 — магнитная восприимчивость частицы $2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$; 1 и 3 — индукция 0,16 Тл; 2 и 4 — индукция 0,25 Тл

Fig. 3. Particle tear-off angle from magnetic separator drum versus particle size: 1 and 2 — magnetic susceptibility of particle $1.2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$; 3 and 4 — magnetic susceptibility of particle $2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$; 1 and 3 — field density of 0.16 T; 2 and 4 — field density of 0.25 T

и в немагнитный продукт. Чем ближе к 180° угол отрыва частицы от барабана, тем выше вероятность её попадания в магнитный продукт.

Повышение удельной магнитной восприимчивости частиц и индукции магнитного поля приводит к увеличению угла отрыва частицы от барабана и вероятности её попадания в магнитный продукт. При увеличении крупности частицы угол её отрыва от барабана снижается. Угол отрыва частиц от барабана может быть одинаковым для частиц различной крупности в зависимости от их магнитной восприимчивости и индукции магнитного поля применяемого сепаратора (рис. 3).

При индукции магнитного поля 0,16 Тл угол отрыва частиц крупностью 0,1–40 мм и с удельными магнитными восприимчивостями $(1,2-2) \cdot 10^{-5}$ м³/кг составляет $90^\circ-150^\circ$, что позволяет говорить о возможности попадания в немагнитный продукт этих частиц (рис. 3). С увеличением крупности частицы вероятность её попадания в немагнитный продукт повышается.

Результаты теоретических расчётов позволяют сделать вывод, что использование магнитных сепараторов с индукцией 0,16 Тл приведёт к взаимозасорению продуктов разделения. Для магнетитовых и титаномагнетитовых руд величина массовой доли железа магнетитового в куске руды будет определять его магнитную восприимчивость. Поэтому в магнитный продукт частично будут попадать мелкие и бедные по железу сростки с пониженной магнитной восприимчивостью. При этом в немагнитный продукт могут попадать крупные и в меньшей степени мелкие, богатые по железу куски руды с повышенной магнитной восприимчивостью.

Для повышения эффективности обогащения в сепараторах с $B=0,16$

Тл используются схемы с отдельной сухой магнитной сепарацией мелкой и крупной фракции мелкодроблёной руды с различными режимами обогащения каждой фракции (положение шибера, частота оборотов барабана).

При индукции магнитного поля 0,25 Тл угол отрыва частиц крупностью менее 8,5 мм и с удельной магнитной восприимчивостью $1,2 \cdot 10^{-5}$ м³/кг составляет более 180° , что позволяет говорить о полном попадании этих частиц в магнитный продукт. Для частиц с магнитной восприимчивостью $2 \cdot 10^{-5}$ м³/кг верхнее значение крупности, при котором угол отрыва от барабана будет больше 180° , составляет 32 мм (рис. 3). Это позволяет говорить о том, что при использовании сепараторов с повышенной индукцией магнитного поля ($B=0,25$ Тл) можно обогащать руду с более широким диапазоном крупности. При этом должно снизиться взаимозасорение продуктов разделения и потери железа с немагнитным продуктом. Но вероятность попадания крупных богатых по железу кусков руды существует даже при индукции магнитного поля (0,25 Тл).

Результаты экспериментальных исследований и их анализ

На рис. 4 приведены распределения частиц магнитного и немагнитного продуктов по лещадности, полученные при сухом магнитном обогащении щебня крупностью $-70+20$ мм, полученного из магнетитсодержащей асбестовой руды Баженовского месторождения в промышленном барабанном сепараторе. Лещадность частиц рассчитана как отношение большего размера частицы к меньшему размеру. При испытаниях оценивалась возможность повышения качества щебня (немагнитный продукт) за счёт снижения его лещадности.

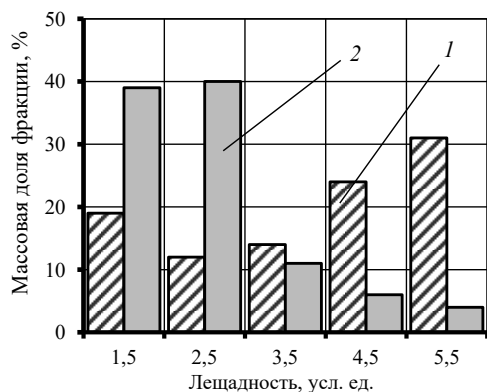


Рис. 4. Распределение частиц продукта сухой магнитной сепарации по лещадности: 1 — магнитный продукт; 2 — немагнитный продукт

Fig. 4. Distribution of particles in dry magnetic separation product by cubic shape:

1 — magnetic product; 2 — nonmagnetic product

При магнитном обогащении в сепараторе с верхней подачей материала доля мелких и лещадных частиц в магнитном продукте выше, чем в немагнитном продукте. Частицы, характеризующиеся повышенной лещадностью зёрен, имеют меньшую высоту по сравнению с низколещадными частицами, что приводит к повышению вероятности попадания лещадных частиц в магнитный продукт по сравнению с частицами с низкой лещадностью. Поэтому форма дроблёной руды, как и крупность, также влияет на показатели обогащения в сепараторах с верхней подачей материала.

Немагнитный продукт сухой магнитной сепарации магнетитовых руд используется для производства щебня. Более низкая лещадность зёрен немагнитного продукта способствует повышению качества щебня. Однако более высокое извлечение магнетитсодержащих частиц в магнитный продукт достигается при обогащении лещадных зёрен, нежели кубовидных зёрен. Поэ-

тому использование в стадии рудоподготовки железных руд конусных дробилок для мелкого дробления, разгрузка которых представлена в основном кубовидными частицами, может привести к повышению потерь магнетитового железа с немагнитным продуктом.

В XX веке на обогатительных фабриках СССР и России в основном применялась сухая магнитная сепарация с предварительной классификацией по крупности дроблёной руды с последующим раздельным обогащением мелкого и крупного продуктов (или с обогащением только крупного продукта).

В настоящее время в сепараторах для сухого и мокрого обогащения широко применяются системы из постоянных магнитов из Nd-Fe-B [6, 8–10]. Это позволило повысить индукцию магнитного поля на поверхность барабана сепаратора с 0,16 до 0,25 Тл и более, и, как следствие, увеличить удельную магнитную силу, действующую на частицы. Увеличение индукции магнитного поля сепаратора до 0,25 Тл значительно снижает потери магнетитового железа с крупными кусками руды и позволяет обогащать не классифицированную по крупности дроблёную руду при одинаковых режимах работы сепаратора (положение шибера, частота вращения барабана).

На Качканарском ГОКе, перерабатывающем титаномагнетитовую руду Гусевогорского месторождения, выход хвостов сухой магнитной сепарации к руде составляет 5–12% при крупности обогащаемой руды менее 40 мм. До 2007–2008 гг. на обогатительной фабрике применялась схема с сухой магнитной сепарацией мелкодроблённой руды крупностью более 10 мм (фракция менее 10 мм без обогащения направлялась на измельчение) с использованием сепараторов 2ПБС-90/250 с $B = 0,16$ Тл

(схема № 1). С 2008–2009 гг. на обогатительной фабрике применяется схема с сухой магнитной сепарацией неклассифицированной мелкодроблённой руды с использованием сепараторов 2ПБС-90/250А с $V=0,25$ Тл (схема № 2). В табл. 1 приведены результаты применения сухой магнитной сепарации мелкодроблённой руды по обеим схемам при равнозначном выходе хвостов.

Использование схемы № 2 позволило снизить массовую долю общего (на 0,67%) и магнетитового (на 0,96%) железа в хвостах СМС и уменьшить потери общего (на 0,41%) и магнетитового (на 0,75%) железа с хвостами СМС. Однако массовая доля железа магнетитового в хвостах СМС (0,89%), даже при использовании сепараторов с повышенной индукцией магнитного поля, выше массовой доли железа магнетитового в суммарных хвостах обогатительной фабрики (0,42–0,53%) [6], несмотря на низкий выход хвостов СМС (табл. 1).

При обогащении измельчённых магнетитовых и титаномагнетитовых руд для промпродуктов и концентратов мокрой магнитной сепарации существует закономерность увеличения массовой доли железа в классе крупности при уменьшении максимальной крупности класса от 3 до 0,044 мм. Это позволяет использовать тонкое гидравлическое грохочение в схемах обогащения магнетитовых руд [11–13]. Однако для бедной мелкодроблённой титаномагнетитовой руды Гусевогорского месторождения, промпродукта и хвостов СМС ($V=0,25$ Тл) закономерности изменения массовых долей железа общего и магнетитового в классах крупности другие (табл. 2).

В мелкодроблённой руде и в промпродукте СМС массовые доли железа общего и магнетитового убывают при уменьшении крупности класса.

Для мелкодроблённой руды такая закономерность связана с вкрапленной текстурой и минеральным составом руды, содержащей плагиоклазиты с низкой массовой долей титаномагнетита. Плагиоклазиты обладают низкой крепостью по сравнению с пироксенидами, являющимися основной горной породой месторождения. Поэтому при дроблении плагиоклазиты в основном переходят в мелкие классы, обедняя их по железу. Титаномагнетит в основном содержится в более крепких пироксенидах, которые находятся в крупных классах мелкодроблённой руды, обогащая их по железу. Кроме этого, вкрапленная текстура руды не способствует значительному раскрытию титаномагнетита при дроблении и большой концентрации его в мелких классах. Закономерности изменения массовых долей железа общего и магнетитового в классах крупности промпродукта СМС повторяют аналогичные закономерности для руды Гусевогорского месторождения, что в основном связано с низким выходом хвостов СМС (табл. 2).

Для хвостов СМС закономерность изменения массовых долей железа общего и особенно железа магнетитового в зависимости от крупности класса носит экстремальный характер. Минимальные массовые доли железа общего и магнетитового соответствуют промежуточным классам крупности. Повышенную массовую долю железа магнетитового имеют классы крупности $-40+12$ мм и $-1,6+0$ мм (табл. 2). Поэтому основные потери железа магнетитового при сухой магнитной сепарации связаны с крупными и мелкими классами.

Применение сухой магнитной сепарации неклассифицированной руды в повышенном магнитном поле ($V=0,25$ Тл, схема № 2) позволило по сравнению

Таблица 1

Результаты применения схем с сухой магнитной сепарацией мелкодроблёной титаномагнетитовой руды
Performance of dry magnetic separation of fine-milled titanium–magnetite ore

Продукт	Выход, %	Массовая доля, %		Извлечение, %	
		Fe	Fe _{магн}	Fe	Fe _{магн}
Схема № 1 (2007 г.)					
Промпродукт	92,49	16,47	10,69	97,08	98,61
Хвосты	7,51	6,10	1,85	2,92	1,39
Руда	100,00	15,69	10,03	100,00	100,00
Схема № 2 (2009 г.)					
Промпродукт	92,72	16,53	10,80	97,49	99,36
Хвосты	7,28	5,43	0,89	2,51	0,64
Руда	100,00	15,72	10,08	100,00	100,00

Таблица 2

Гранулометрический состав и массовые доли железа общего и магнетитового в титаномагнетитовой руде и в продуктах СМС
Granulometric composition and mass fractions of total and magnetite iron in titanium–magnetite ore and in dry magnetic separation products

Класс крупности, мм	–40+25	–25+12	–12+6	–6+3	–3+0	–1,6+0	Всего
Промпродукт СМС (выход к руде – 92,72%)							
Выход класса, %	6,25	25,35	22,35	11,20		34,85	100,00
Массовая доля Fe, %	17,38	16,98	16,54	16,37		16,21	16,57
Массовая доля Fe _{магн} , %	11,47	11,31	11,06	10,67		10,59	10,94
Хвосты СМС (выход к руде – 7,28%)							
Выход класса, %	8,60	30,40	18,60	10,40	9,10	22,90	100,00
Массовая доля Fe, %	5,37	5,08	5,11	5,37	5,75	6,32	5,49
Массовая доля Fe _{магн} , %	1,54	1,17	0,79	0,57	0,46	0,93	0,95
Мелкодроблёная руда							
Выход класса, %	6,42	25,72	22,08	11,14		34,64	100,00
Массовая доля Fe, %	16,21	15,96	15,84	15,62		15,53	15,76
Массовая доля Fe _{магн} , %	10,51	10,44	10,43	9,98		9,93	10,21

со схемой № 1 повысить показатели обогащения (табл. 1). Однако вопросы по снижению потерь магнетитового железа, связанных с крупными и мелкими классами хвостов СМС, остались.

Снизить потери железа магнетитового с крупными классами хвостов можно двумя способами, тем более что возможность попадания крупных относительно богатых кусков руды в хвосты СМС теоретически обоснована (рис. 2 и 3). Поэтому первым способом является дальнейшее повышение индукции

магнитного поля сепараторов. Однако этот способ будет сопровождаться снижением выхода хвостов СМС, что приведёт к увеличению нагрузки на мельницы первой стадии и к уменьшению количества производимого щебня из хвостов СМС. Это может оказаться технологически и экономически не выгодным. Второй способ более кардинальный и связан со снижением крупности мелкодроблёной руды. Для Качканарского ГОКа это возможно, например, за счёт применения измель-

чающих валков высокого давления или использования замкнутого цикла в третьей стадии дробления. При этом в питании СМС уменьшится доля крупных кусков, из-за которых происходят основные потери железа магнетитового. Но это связано с высокими капитальными затратами и также приведёт к снижению количеству товарных фракций щебня.

Результаты теоретических исследований (рис. 2 и 3) показали, что высоких потерь железа магнетитового с мелким классом (-1,6+0 мм), по сравнению с более крупными классами крупности, не должно быть. Основная причина этого явления связана с магнитным осаждением отдельных частиц титаномагнетита и мелких богатых сростков на крупные бедные куски руды, имеющих вкрапления титаномагнетита. При попадании такого крупного куска в магнитное поле сепаратора в зернах титаномагнетита, выходящих на поверхность куска, индуцируется магнитное поле. Индукция магнитного поля, создаваемого зерном титаномагнетита, будет выше индукции магнитного поля сепаратора за счёт меньшего радиуса кривизны зерна титаномагнетита по сравнению с радиусом магнитной системы сепаратора. Поэтому отдельные частицы титаномагнетита и мелкие богатые сростки могут притянуться не к барабану (к магнитной системе) сепаратора, а к такому же зерну титаномагнетита, находящемуся в срастании с крупным бедным куском, и попасть вместе с этим куском в немагнитный продукт. Аналогичное явление наблюдается при мокром магнитном обогащении титаномагнетитовых руд, особенно при использовании сепараторов с повышенной индукцией магнитного поля [6].

Уменьшение потерь железа магнетитового с мелкими классами крупности

возможно двумя способами. Кардинальным способом является не подвергать мелкие классы крупности сухой магнитной сепарации, то есть возвратиться к проектной схеме обогащения (схема № 1). Этот способ будет сопровождаться снижением выхода хвостов СМС, что приведёт к увеличению нагрузки на мельницы и магнитные сепараторы первой стадии, а это неприемлемо для обогатительной фабрики Качканарского ГОКа при существующих объёмах переработки руды.

Вторым способом является использование отдельной сухой магнитной сепарации крупной и мелкой фракции мелкодроблёной руды. Это технология известна, и применимость её обосновывается равнопритягиваемостью частиц различной крупности и магнитными свойствами в одинаковом магнитном поле [2, 7]. В настоящее время в связи с использованием различных сплавов для изготовления постоянных магнитов (феррит бария, неодим-железо-бор и др.) производятся промышленные барабанные сепараторы с более широким диапазоном изменения индукции магнитного поля [9]. Поэтому появилась возможность усовершенствования технологии сухой магнитной сепарации с предварительной классификацией мелкодроблёной руды. Усовершенствования касаются использования сепараторов с различными индукциями магнитного поля для крупной фракции (высокая индукция) и мелкой фракции (низкая индукция) предварительно классифицируемой руды. При этом конкретные значения индукции магнитного поля сепараторов будут определяться вещественным составом и магнитными свойствами обогащаемой руды.

Для условий Качканарского ГОКа технология с отдельной сухой магнитной сепарацией крупной и мелкой фракции мелкодроблёной руды в раз-

личных магнитных полях теоретически является самой рациональной.

Применение сепараторов с повышенной индукцией магнитного поля (0,25 Тл) для обогащения крупной фракции будет способствовать снижению потерь железа магнетитового, связанного с возможностью попадания крупных кусков, содержащих титаномагнетит, в хвосты.

Использование сепараторов со стандартной индукцией магнитного поля (0,16 Тл) для обогащения мелкой фракции будет способствовать снижению потерь железа магнетитового, связанного с магнитным осаждением отдельных частиц титаномагнетита на бедные частицы руды, содержащие отдельные зёрна титаномагнетита. На мелкие бедные частицы тонкий титаномагнетит также будет осаждаться, но в меньшей степени в связи пониженной индукцией магнитного поля (0,16 Тл). Этих потерь не избежать. Но в целом потери железа магнетитового с хвостами СМС снизятся, так как не будет магнитного осаждения титаномагнетита на круп-

ные частицы и уменьшится осаждение титаномагнетита на мелкие частицы.

Заключение


Увеличение индукции магнитного поля барабанных сепараторов (с 0,16 до 0,24 Тл) позволяет применять схему сухого магнитного обогащения без предварительной классификации мелкодроблённой руды. При этом происходит снижение массовой доли железа общего и магнетитового в немагнитном продукте.

Крупная и мелкая фракция хвостов сухого магнитного обогащения неклассифицированной руды в сепараторах с индукцией 0,25 Тл характеризуется повышенной массовой долей железа магнетитового, по сравнению с промежуточными классами крупности хвостов.

Теоретически наиболее рациональной технологией предварительного обогащения титаномагнетитовых руд является раздельная сухая магнитная сепарация в различных магнитных полях крупной фракции (высокая индукция) и мелкой фракции (низкая индукция).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Деркач В. Г.* Специальные методы обогащения полезных ископаемых. — М.: Недра, 1966. — 338 с.
2. *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.
3. Mehdi Parian, Pertti Lamberg, Jan Rosenkranz. Developing a particle-based process model for unit operations of mineral processing — WLIMS. International Journal of Mineral Processing, 10 September 2016, Vol. 154, pp. 53–65.
4. *Сединкина Н. А., Горлова О. Е., Гмызина Н. В., Дегодя Е. Ю.* Изучение возможности обогащения мелкодроблённой магнетитовой руды сухой магнитной сепарацией // Чёрная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. — 2019. — Т. 75. — № 5. — С. 564–572.
5. Sunil Kumar Tripathy, Nikkam Suresh. Influence of particle size on dry high-intensity magnetic separation of paramagnetic mineral. Advanced Powder Technology, Vol. 28, Is. 3, March 2017, pp. 1092–1102.
6. *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.

7. Квасков А. П. Технологическая эффективность и схемы обогащения железных руд магнетитового типа. — Ленинград: Механобр, 1958. — вып. 105. — 159 с.
8. Sunil Kumar Tripathy, Veerendra Singh, Y Rama Murthy, P K Banerjee, Nikkam Suresh. Influence of process parameters of dry high intensity magnetic separators on separation of hematite. *International Journal of Mineral Processing*, 10 March 2017, Vol. 160, pp. 16–31.
9. 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.
10. 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.
11. Пелевин А. Е., Сытых Н. А. Применение тонкого гидравлического грохочения для стадийального выделения титаномагнетитового концентрата // Обогащение руд. — 2021. — № 1. — С. 8–14. DOI: 10.17580/or.2021.01.02.
12. Samayamutthirian Palaniandy, Rinto Halomoan, Hidemasa Ishikawa. TowerMill circuit performance in the magnetite grinding circuit — The multi-component approach. *Minerals Engineering*, Vol. 133, 15 March 2019, pp. 10–18.
13. Darius Markauskas, Harald Kruggel-Emden. Coupled DEM-SPH simulations of wet continuous screening. *Advanced Powder Technology*, December 2019, Vol. 30, Iss. 12, pp. 2997–3009. 

REFERENCES

1. Derkach V. G. *Special'nye metody obogashcheniya poleznyh iskopaemyh* [Special methods for mineral processing], Moscow, Nedra, 1966, 338 p. [In Russ].
2. Karmazin V. V., Karmazin V. I. *Magnitnye, elektricheskie i special'nye metody obogashcheniya poleznyh iskopaemyh. T. 1. Magnitnye i elektricheskie metody obogashcheniya poleznyh iskopaemyh* [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].
3. Mehdi Parian, Pertti Lamberg, Jan Rosenkranz. Developing a particle-based process model for unit operations of mineral processing WLIMS. *International Journal of Mineral Processing*, 10 September 2016, Vol. 154, pp. 53–65.
4. Sedinkina N. A., Gorlova O. E., Gmyzina N. Ju., Degodja E. Ju. Study of a possibility of enrichment of fine-crushed magnetite ore by dry magnetic separation. *Chernaya Metallurgiya. Byulleten' Nauchno-Tekhnicheskoy i Ekonomicheskoy Informatsii*. 2019. Vol.75, no. 5. pp. 564–572. [In Russ].
5. Sunil Kumar Tripathy, Nikkam Suresh. Influence of particle size on dry high-intensity magnetic separation of paramagnetic mineral. *Advanced Powder Technology*, Vol. 28, Iss. 3, March 2017, pp. 1092–1102.
6. 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.
7. Kvaskov A. P. *Tekhnologicheskaya effektivnost' i skhemy obogashcheniya zheleznyh rud magnetitovogo tipa* [Technological efficiency and schemes for processing iron ores of the magnetite type], Leningrad, Mehanobr, 1958, Is. 105, 159 p. [In Russ].
8. Sunil Kumar Tripathy, Veerendra Singh, Y Rama Murthy, P K Banerjee, Nikkam Suresh. Influence of process parameters of dry high intensity magnetic separators on separation of hematite. *International Journal of Mineral Processing*, 10 March, 2017, Vol. 160, pp. 16–31.

9. 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.

10. 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.

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

12. Samayamutthirian Palaniandy, Rinto Halomoan, Hidemasa Ishikawa. TowerMill circuit performance in the magnetite grinding circuit The multi-component approach. *Minerals Engineering*, Vol. 133, 15 March 2019, pp. 10–18.

13. Darius Markauskas, Harald Kruggel-Emden. Coupled DEM-SPH simulations of wet continuous screening. *Advanced Powder Technology*, December 2019, Vol. 30, Iss. 12, pp. 2997–3009.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Пелевин Алексей Евгеньевич*¹ — докт. техн. наук, доцент, профессор кафедры Обогащения полезных ископаемых, a-pelevin@yandex.ru;

*Сытых Николай Александрович*² — начальник управления контроля продукции;

*Черепанов Дмитрий Владимирович*² — главный специалист по техническому развитию обогатительной фабрики;

¹ Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, 620144, ГСП, ул. Куйбышева, 30, Россия;

² «ЕВРАЗ Качканарский горно-обогатительный комбинат», Качканар, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Pelevin A. E.*¹, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor at the Mineral Processing Department, e-mail: a-pelevin@yandex.ru;

*Sytykh N. A.*², Head of Quality Control Department;

*Cherepanov D. V.*², Chief Specialist for Technological Development at Processing Plant;

¹ Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia;

² EVRAZ Kachkanar Mining and Processing Plant, Kachkanar, Russia.

Получена редакцией 01.06.2021; получена после рецензии 21.06.2021; принята к печати 10.10.2021.

Received by the editors 01.06.2021; received after the review 21.06.2021; accepted for printing 10.10.2021.

