

УДК 622.778.4

**А.А. БЕРЕЗНЯК**, канд. техн. наук,**Е.А. БЕРЕЗНЯК**,**В.Н. КУВАЕВ**, д-р техн. наук,**Я.Г. КУВАЕВ**, канд. техн. наук,**И.К. МЛАДЕЦКИЙ**, д-р техн. наук

(Украина, Днепр, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет")

## **РАЗМАГНИЧИВАНИЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МИНЕРАЛОВ ПРИ ИХ ОБОГАЩЕНИИ**

Анализ работ по магнитному разделению минералов при обогащении руд показывает, что этот процесс хорошо рекомендует себя при очистке отходов от ценного минерала. Что же касается обогащенного продукта, то первичное разделение (при исходном содержании ценного минерала <50%) дает существенное приращение качества. Поскольку раскрытый ценный минерал не выводится из дальнейшего передела, то исходное содержание ценного минерала по стадиям все время возрастает и за счет флокуляции захват нерудной фазы также возрастает. Вероятность захвата пропорциональна произведению содержаний ценного ( $P_M$ ) и неценного ( $1-P_M$ ) минералов. В дальнейшем, без применения специальных методов, вывести эти частицы из массы концентрата не представляется возможным, так как вероятность вывода открытых нерудных частиц асимптотически стремится к нулю. Таким образом, получить чистые магнетитовые концентраты магнитными методами, применяемыми в настоящее время на железорудных обогатительных фабриках, теоретически невозможно. Рассмотрим некоторые специальные методы магнитного разделения, способствующие получению чистых концентратов.

Селективная флокуляция может быть осуществлена путем медленного ввода потока ферромагнитных частиц в магнитное поле со слабо возрастающей напряженностью. Сначала будут намагничиваться богатые магнетитовые частицы, объединяться в агрегаты и перемещаться вдоль вектора градиента поля. После чего эти агрегаты необходимо выводить из потока. Далее будут объединяться богатые сростки. Их также следует выводить из потока. Таким образом, селективная флокуляция может обеспечить разделение на несколько продуктов постепенно снижающегося качества. Необходимым условием такого процесса является приведение всех частиц к нулевой остаточной намагниченности, т.е. перед разделением их необходимо размагнитить.

Применение немагнитных методов обогащения, таких как гравитационные и флотационные, для доводки концентратов до максимальных кондиций предполагает, что движение частиц друг относительно друга свободное. Осуществить такие условия можно только в сильно разбавленных суспензиях, поэтому на практике движение частиц стесненное, но неизменным условием является

отсутствие агрегирования частиц между собой. Поскольку все минералы Вселенной обладают магнитной восприимчивостью [8], а ферромагнитные минералы обладают остаточной намагниченностью и намагничены в магнитном поле Земли, то для достижения упомянутого условия необходимо их предварительное размагничивание.

Теоретический анализ разделительных процессов обычно начинают с исследования движения отдельной частицы. Затем постепенно усложняют условия движения, однако наилучшими условиями разделения остаются условия отсутствия взаимного влияния частиц друг на друга. Водная несущая среда избавляет от необходимости учета влияния множества факторов, но механическое взаимодействие частиц заставляет предполагать о некотором преобладающем направлении перемещения всей массы частиц, то есть их диффузии [7]. Однако, если частицы находятся в обособленном состоянии, это позволяет выделять большее количество детерминированных условий извлечения частиц. Например, в этих условиях гранулометрический состав будет известным, то же относится и к масштабу микротурбулентности, поскольку он непосредственно связан с размером частиц.

В водной среде магнитные свойства не изменяются, поэтому размагничивание перед любым способом разделения только повышает эффективность разделения.

Вопросами размагничивания тонких ферромагнитных частиц занимаются так же давно, как и их магнитным разделением [4]. В настоящее время в обогащительных процессах используются размагничивающие аппараты с переменным магнитным полем промышленной частоты 50 Гц [2]. В переменном поле такой частоты флоккулы магнитных частиц в виде прядей вращаются, что способствует уменьшению их размеров. Об эффекте воздействия такого поля судят по улучшению показателей разделения по сравнению с контрольными образцами, которые не подвергались воздействию. Измерение размеров агрегатов частиц, или флокул, производилось либо посредством фотосъемки, либо оценивалось визуально в прозрачной ванне сепаратора с водным потоком и достаточно малым количеством частиц, позволяющим непосредственно наблюдать за поведением этих агрегатов [4]. В работе [3] приводятся результаты исследований по изучению влияния переменного магнитного поля на размер флокул, и устанавливается условие их полного разрушения до размера отдельных частиц. Хотя прогнозирование таких условий заключалось в увеличении частоты переменного магнитного поля, такого состояния суспензии получено не было. Механическим способом разрушить магнитные флоккулы не представляется возможным, поскольку намагниченные частицы непрерывно агрегируются.

Главным условием размагничивания ферромагнитного тела является стабилизация его положения в пространстве по отношению к изменяющемуся вектору внешнего магнитного поля [1]. Зафиксировать положение всех отдельных частиц в пульпе некоторым механическим способом не представляется возможным. Исследователи [6] осуществляли такую фиксацию путем изготовле-

ния смесей магнетита с гипсом с последующим затвердеванием таких образцов и магнитным структурированием частиц в период смешивания и затвердевания. В промышленных условиях это неприемлемый способ. Тем не менее, положение частицы при размагничивании должно быть неизменным.

Материальное тело, каких бы малых размеров оно ни было, обладает механической инерцией. Даже магнитные домены имеют магнитную инерцию и при достаточно высоких частотах они не успевают реагировать на изменение магнитного поля. Механическая инерция пропорциональна массе частицы, она значительно больше магнитной и проявляет себя уже при частотах внешнего переменного магнитного поля в несколько десятков тысяч Герц.

Таким образом, если вектор внешнего магнитного поля опережает положение оси остаточного намагничивания частицы, то создаются предпосылки к ее частичному размагничиванию. А если такое опережение будет больше  $90^\circ$ , то размагничивание может быть осуществлено в полной мере.

В работе [5] получена зависимость угла отставания поворота частицы от вектора внешнего магнитного поля. На основании этой зависимости можно считать, что когда частота магнитного поля превышает 5 кГц, то существуют условия, способствующие размагничиванию частиц.

Проверка полученных теоретических и количественных соотношений степени размагничивания магнетитовых частиц осуществлялась путем микроскопических исследований пульпы, которая подвергалась обработке высокочастотным магнитным полем. В качестве эталона измерения приведен рис.1.



Рис. 1. Суспензия из намагниченных частиц магнетита



Рис. 2. Суспензия из размагниченных частиц магнетита

На рис. 1 и 2 показаны фотографии частиц пульпы магнетита с увеличением  $\times 24$ , подвергшиеся намагничиванию (рис. 1) и прошедшие через поле убывающей напряженности с частотой 20 кГц (рис. 2). Качественно можно с уверенностью говорить о том, что размер частиц существенно уменьшился. Обе пульпы подвергались интенсивному механическому перемешиванию и размер частиц в них не изменился. Таким образом, механическое воздействие не оказывает существенного влияния на размер флокул.

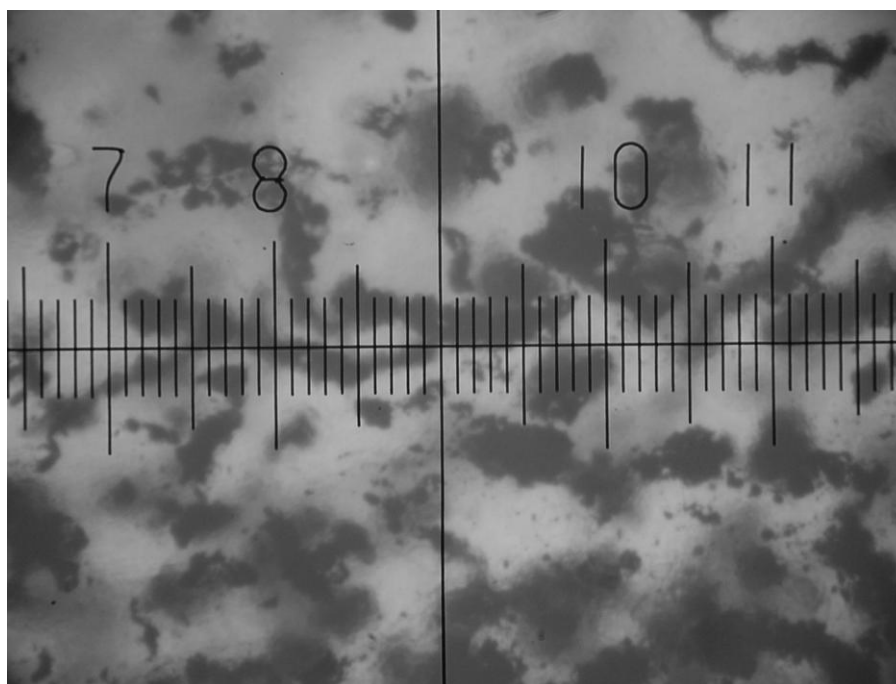


Рис. 3. Намагниченная пульпа

На рис. 3 приведена фотографія частиц пульпы з увеличенням  $\times 56$ , намагнічених постійним магнітним полем з індукцією 0,25 Тл. Цена деления мерной линейки соответствует 10 мкм. Как видно, длина флокул достигает 300 мкм (0,3 мм).

Подвергнув эту же пульпу воздействию переменного магнитного поля с частотой 20 кГц и убывающей напряженностью, получили флокулы меньшего размера (рис. 4) – около 100 мкм (0,1 мм), при этом отчетливо наблюдается строение этих агрегатов, которые состоят из цепочек отдельных частиц. Можно сделать вывод, что частицы магнетита частично размагнитились, однако полное размагничивание не было достигнуто.

Подвергнув эту же пульпу воздействию переменного магнитного поля с частотой 70 кГц (рис. 5), получили полностью размагниченные частицы, которые разобщены друг от друга. Следует отметить, что образцы экранировались от магнитного поля Земли.

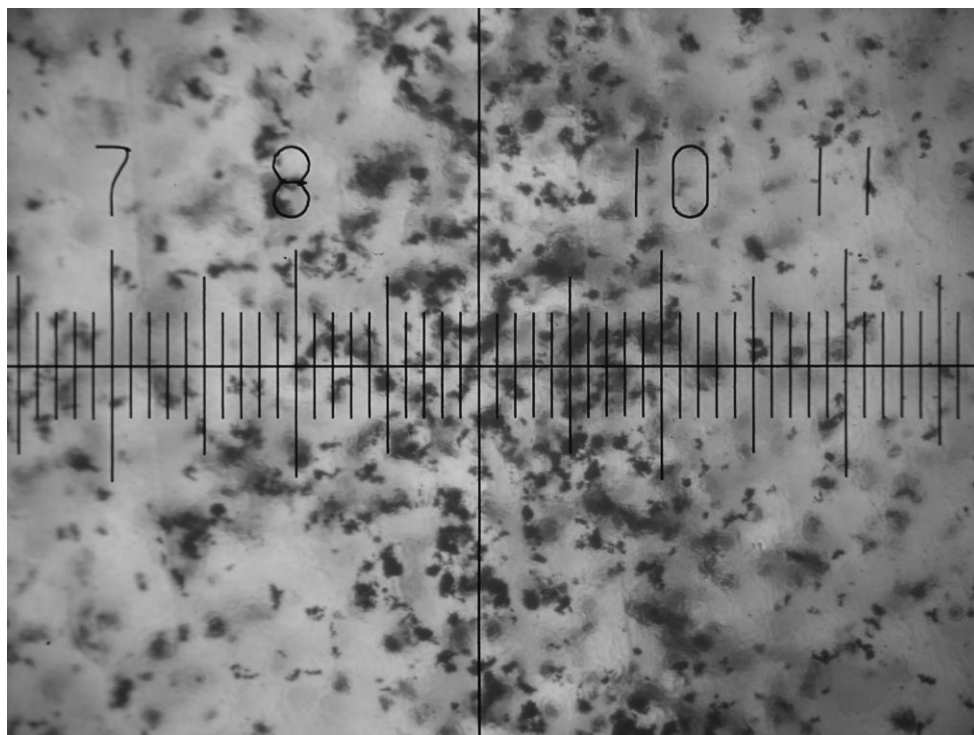


Рис. 4. Частицы пульпы размагниченные в поле 20 кГц

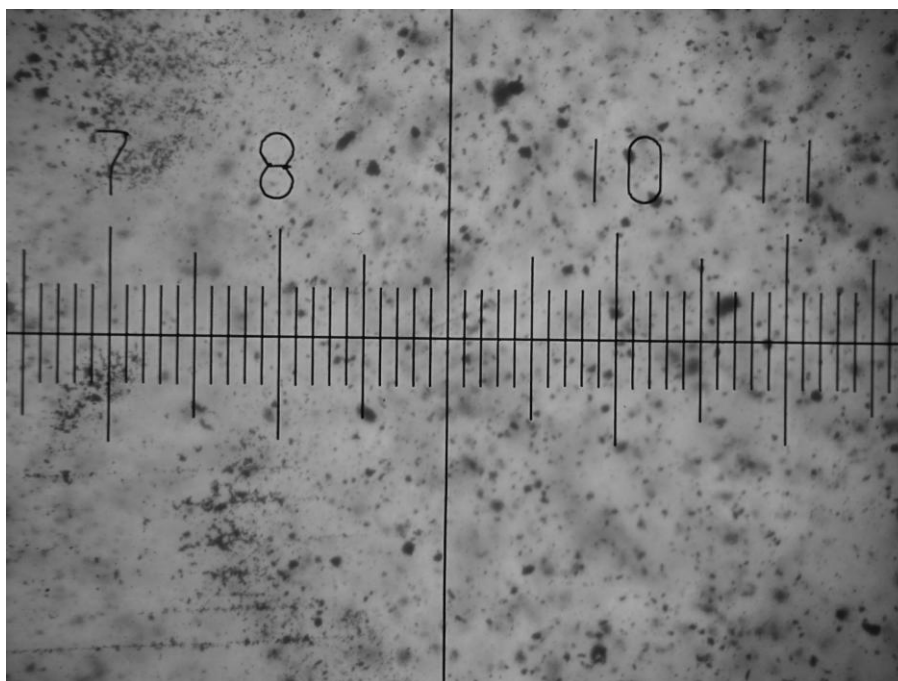


Рис. 5. Частицы пульпы после обработки полем 70 кГц

Изучение размеров частиц на рис. 5 дает основание заключить, что практически все частицы имеют размер менее 20 мкм. При классификации таких частиц, например, в гидроциклоне, они все уйдут в сливной продукт в отличие от намагниченных частиц, значительная часть которых в виде флокул попадет в песковый продукт и вернется в мельницу. Следовательно, применение полного размагничивания частиц магнетита перед их классификацией снизит величину циркулирующей нагрузки на мельницу, что повысит эффективность ее работы. Разделять частицы такой крупности возможно в чувствительных аппаратах. Это могут быть гидроциклоны с диаметром цилиндрической части 50 мм и менее, глазированные в области рабочей части.

Кроме того, минералы магнетита в частицах такой крупности практически полностью раскрыты, что теоретически позволяет получать концентраты сверхвысокого качества.

При попадании размагниченных частиц в зону действия магнитного поля существующих магнитных сепараторов они намагничиваются и образуют флокулы, в которых защемляются породные частицы и снижается качество концентрата. Для предотвращения снижения качества необходимо обогащать размагниченные частицы или немагнитными методами, например, флотацией, или в магнитных сепараторах с переменным магнитным полем высокой частоты.

### *Вывод*

Размагничивание ферромагнитных частиц, обладающих остаточной намагниченностью, в магнитных полях высокой частоты может обеспечить показатели качества концентратов, близкие к теоретически возможным.

### Список литературы

1. Бозорт Р. Ферромагнетизм / Р. Бозорт. – М.: Иностранная литература, 1956. – 784 с.
2. Деркач В.Г. Специальные методы обогащения полезных ископаемых / В.Г. Деркач. – М.: Недра, 1966. – 423 с.
3. Кармазин В.В. Магнитные и электрические методы обогащения полезных ископаемых / В.В. Кармазин, В.И. Кармазин. – Москва: МГГУ, 2005. – 669 с.
4. Ломовцев Л.А. Магнитное обогащение сильномагнитных руд / Л.А. Ломовцев, Н.А. Нестерова, Л.А. Дробченко. – М.: Недра, 1979. – 235 с.
5. Младецкий И.К. Размер частиц магнитного утяжелителя после выхода их из магнитного поля / И.К. Младецкий // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 48(89). – С. 77-82.
6. Петрова Г.Н. Исследование порошкообразных магнетитов / Г.Н. Петрова // Изв. АН СССР; серия географическая и геофизическая. – 1948. – Т.12. – №6 – С. 549-556.
7. Тихонов О.Н. Введение в динамику массопереноса процессов обогатительной технологии / О.Н. Тихонов. – Л.: Недра, 1973. – 240 с.
8. Трухин В.И. Введение в магнетизм горных пород. – М.: МГУ, 1973. – 275 с.

© Березняк А.А., Березняк Е.А., Куваев В.Н., Куваев Я.Г., Младецкий И.К., 2017

*Надійшла до редколегії 22.12.2017 р.  
Рекомендовано до публікації к.т.н. К.А. Левченко*

УДК 622.778

**П.И. ПИЛОВ**, д-р техн. наук,

**В.Ю. ШУТОВ, Н.Г. КАБАКОВА,**

**Л.А. ШАТОВА**

(Украина, Днепр, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет")

### **СЕПАРАЦИЯ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ СЛАБОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В СВЕРХСИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ**

В последние годы существенно повысились требования потребляющих отраслей к качеству керамического сырья во всем мире. Это касается как химического, так и гранулометрического состава фарфоровой массы.

Наиболее важным требованием к сырью для производства тонкой керамики (фарфоровой массе, которая, как правило, имеет следующий состав: полевошпат (25...30%), каолин (30...35%), кварцевый песок (30...35%), глина) является низкое содержание (не более 0,2%) вредных примесей (в первую очередь окислов железа и титана). Окислы железа и титана придают изделиям тонкой керамики нежелательную окраску и понижают прозрачность фарфора. При производстве электротехнического фарфора эти примеси повышают его теплопроводность, снижая качество и надежность изоляции. Окислы титана и железа уменьшают также стойкость кислотоупорного оборудования.