© В.В. Кармазин, 2013

В.В. Кармазин

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ МАГНИТНОГО ОБОГАЩЕНИЯ

Описаны магнитные методы обогащения, являющиеся важнейшими процессами при обогащении руд черных, цветных, редких и благородных металлов, алмазов, при обессеривании угля и очистке различных типов сырья от магнитных примесей. Эти методы тесно переплетаются с гравитационными и другими в комбинированных процессах: магнитогидродинамической (МГД), магнитогидростатической (МГС) и электродинамической сепарации (ЭДС), а также при обогащении в тяжелых средах с магнитной регенерацией, в новых специальных, подготовительных и вспомогательных процессах. Проведен анализ перспектив сепарации слабомагнитных тонковкрапленных руд, связаных с ВГМС в сепараторах с постоянными магнитами или со сверхпроводящими магнитными системами на низко-температурных безгелиевых криостатах.

Ключевые слова: магнитная сепарация, руды, вспомогательные процессы, подготовительные процессы, концентрат, комбинированные процессы, методы обогащения.

Магниты известны человечеству более трёх тысяч лет — им посвящены труды Аристотеля, Плиния, Фалеса Милетского, Тита Лукреция Кара и многих других учёных древней Греции и Рима. В них упоминаются первые попытки применения магнетизма и электричества в различных технологиях. В средневековом трактате Георгия Агриколы «О горном деле и металлургии» подробно описана магнитная сепарация касситерита и вольфрамита от магнетита (книга 8. «Обогащение полезных ископаемых»). Однако, только после работ Гильберта, Фарадея, Максвелла, Лоренца, Ампера, Столетова, Аркадьева и многих других великих физиков электромагнитное поле было полностью поставлено на службу человечеству и без этого уже не мыслима современная цивилизация, её техника и технология, включая магнитное обогащение [1]. Первым патентом считают английский патент от 1792 года, выданный Уильяму Фулартону на магнитную сепарацию железной руды [1], однако промышленное внедрение магнитного обогащения, главным образом для железных руд, началось в конце XIX века.

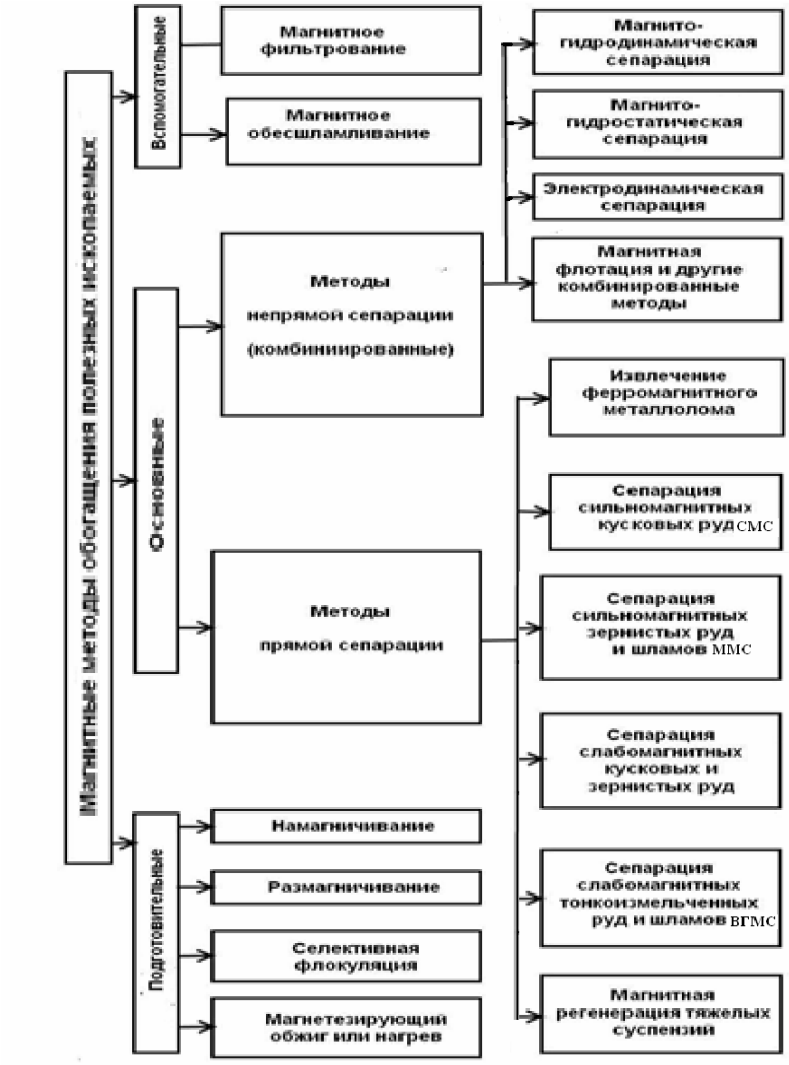


Рис. 1. Классификация магнитных методов обогащения

В последнее время магнитные методы бурно развиваются и являются важнейшими процессами при обогащении руд железа, марганца, хрома, титана, вольфрама, тантала и ниобия и многих других цветных, редких и благородных металлов, при обессеривании угля и очистке различных типов сырья от магнитных приме-

сей. Они тесно переплетаются со всеми методами обогащения полезных ископаемых в различных комбинированных процессах: магнитогидродинамической (МГД), магнитогидростатической (МГС) и электродинамической сепарации (ЭДС), в процессах сгущения, магнитной фильтрации, флотации с использованием магнитного поля, а также при обогащении в тяжелых средах с магнитной регенерацией. До настоящего времени в этой области зарождаются и внедряются в практику все новые процессы и аппараты (рис. 1).

По областям применения процессы магнитного обогащения делятся на три группы: *подготовительные, основные и вспомогательные* (см. рис. 1).

К *подготовительным* относят процессы магнитного улавливания металлолома, намагничивания и размагничивания, процессы управления магнитной агрегацией (селективная флокуляция и др.). Сгущение или обезвоживание в магнитном поле и т. д. относятся к *вспомогательным* процессам обогащения. Область применения этих методов часто выходит за рамки горного дела. Удаление железных и других слабомагнитных примесей магнитными методами производится в стекольной, абразивной, керамической, пищевой, фармацевтической и других отраслях промышленности, при переработке твердых бытовых отходов, скраповых металлов, строительных материалов, теплоносителей и др.

Общее технологическое преимущество магнитных методов обогащения состоит в достижении значительных извлекающих сил, которые для сильномагнитных зерен они могут превышать силу тяжести более чем в 100 раз, высокой селективности действия на частицы минералов (как правило, контрастность по магнитным свойствам разделяемых минералов бывает весьма высокой $\chi_1/\chi_2 \geq 10$), безопасности для обслуживающего персонала, безвредности магнитной технологии для окружающей среды, относительно низкой себестоимости магнитного обогащения, удобстве управления и автоматизации процессов магнитного обогащения и т. д. Сегодня в мире на магнитное обогащения поступает около 3 млрд магнетитовых руд в год и хотя оно многие годы находится вне конкуренции с другими методами обогащения, благодаря высокому извлечению магнетита, минимальному времени сепарации и очень низкой себестоимости и все же технико-экономические показатели общепринятой технологии мокрого обогащения магнетитовых кварцитов на современных железорудных ГОКах всего

мира оставляет желать лучшего, так как для получения товарного концентрата требуется не менее трех стадий измельчения и пяти стадий сепарации и при этом не всегда удается получать концентраты для бездоменной металлургии.

Перспективность магнитного обогащения связана с непрерывным и интенсивным развитием технологии производства магнитных материалов и систем — источников сильных магнитных полей, включая сверхпроводящие, параметры которых постоянно улучшаются, а стоимость в пересчете на 1 т обогащаемого сырья резко снижается.

Эффективность магнитного разделения зависит от силового режима сепарации (векторная диаграмма разделяющих сил), а при оптимальных условиях массопереноса — от уровня тяговых пондеромоторных магнитных сил (формула Максвелла), ответственных за флокуляцию, извлечение или удерживание магнитных минералов. Теоретически и эксперимeтально установлено, что в процессах сепарации используются в основном две из известных магнитных сил: потокосцепления (ближнего действия или адгезионная) и градиентная (пондеромоторная сила дальнего действия). Первая вызывает флокуляцию магнитных частиц (образование агрегатов — флокул за счет энергии свободных полюсов), а вторая их сепарацию от немагнитных.

Первая сила — $F_{п.с.} = B^2S/2\mu_o$ не селективна, существует даже в слабых полях, но только при контакте между магнитными частицами, причем прочно удерживает механически захваченные немагнитные частицы.

Вторая сила — $F_{гр.} = G\chi HgradH$ селективна, действует на достаточно большом расстоянии от осадительной поверхности (~ до 100 мм), но требует более высоких значений напряженности магнитного поля — H и ее градиента, а также удельной магнитной восприимчивости — χ. Здесь: B — магнитная индукция, S — площадь контакта частиц, G — масса частицы, μ_o — магнитная постоянная.

В серийных сепараторах типа ПБМ сила потокосцепления и прочность флокул очень велики, а пондеромоторная сила притягивает к барабану только уже готовые флокулы на расстоянии не более 80 мм. Свободные кварцевые зерна при этом остаются в пульпе.

Пондеромоторная сила поля второго типа используется во всех процессах сепарации и зависит от величины *H grad H*, кото-

рый возрастает от одно — [$H = f(x)$] — 300 э^2/см, двух — [$H = f(x,y)$] — $5 \cdot 10^6$ э^2/см до трехмерной неоднородности $H = f(x,y,z)$, где H grad H достигает $2 \cdot 10^{11}$ э^2/см. Последняя характерна для высокоградиентных полей, применяемых в электро-магнитных высокоградиентных сепараторах с сильным полем.

Механическая работа по массопереносу частиц во всех процессах магнитной сепарации всегда сопровождается некоторым снижением общей магнитной энергии сложной системы «полюса-частицы». В целом она равна:

$$E_M = 0,5 \int_V BHdV \approx const \qquad (1)$$

но при сепарации и магнитной флокуляции частиц её изменение происходит за счет одной ее составляющей — энергии магнитных полюсов или магнитостатической энергии ΔE_m в рассматриваемом объеме рабочего пространства — V: $E_m = 0,5 J^2 N \cdot V$ (2), где H, B — соответственно напряженность поля и индукция в элементах системы — «полюса-частицы», заполняющих рабочее пространство; J, N — соответственно намагниченность и коэффициент размагничивания указанных элементов рабочего пространства.

Оценить работу, совершаемую при магнитной сепарации за счет снижения энергии свободных полюсов в результате флокуляции частиц и притяжения их к полюсам, можно следующим образом:

$$\sum_{i-1}^{n} E_{M_i}^p + \sum_{j-1}^{m} E_{M_j}^q - E_M = \Delta E_M \qquad (3)$$

где $\sum_{i-1}^{n} E_{M_i}^p$, $\sum_{j-1}^{m} E_{M_j}^q$ суммарная магнитостатическая энергия, соответственно, магнитных полюсов сепаратора и частиц магнитной фракции; ΔE_m — приведенная магнитостатическая энергия полюсов со слоем магнитных частиц.

Практически во всех процессах магнитного обогащения работа магнитной сепарации (или флокуляции) A определяется величиной уменьшения магнитостатической энергии ΔE_m. Так как процесс магнитной сепарации носит непрерывно-циклический характер, то работа сепарации совершается магнитной системой сепаратора в процессе притяжения частиц магнитных минералов к полюсам, а затем возвращается магнитной системе при отрыве этих

частиц в зоне разгрузки магнитной фракции за счет работы привода рабочего органа сепаратора (барабана или ролика и др.), совершающего отрыв. Этим можно объяснить столь длительный срок службы магнитной системы барабанных сепараторов с постоянными магнитами (до 2—3 лет) без дополнительного подмагничивания.

Если $\Delta E_m = A$, то средняя магнитная сила, действующая в рабочем пространстве по направлению к полюсу (по оси $N - S$),

$$F_M = -\partial E_M / \partial x \approx -\Delta E_M / \partial x; \qquad F_M \approx 0{,}5 J^2 N S, \tag{4}$$

где S — площадь полюсной поверхности, ортогональной силовым линиям.

Учитывая, что последняя зависит от «микрорадиуса» элементов полюсной поверхности, можно с некоторыми дополнительными оговорками (для случая $N \approx const$; $J / V = const$) найти зависимость уровня этой силы от радиуса кривизны полюсов. В простейшем случае, когда полюса представлены ферромагнитными шарами (например, полиградиентная сепарация), которые упакованы с координационным числом, равным шести,

$$S = V 4\pi r^2 / (2r)^3 = \pi V / 2r; \qquad F_M = J^2 N V / 16 r \approx C_c / r, \tag{5}$$

где r — радиус шара; $V / (2r)^3$ — число шаров в объеме V; c_c — постоянная магнитной силы, зависящая от размеров и магнитных свойств материалов полюсов и частиц.

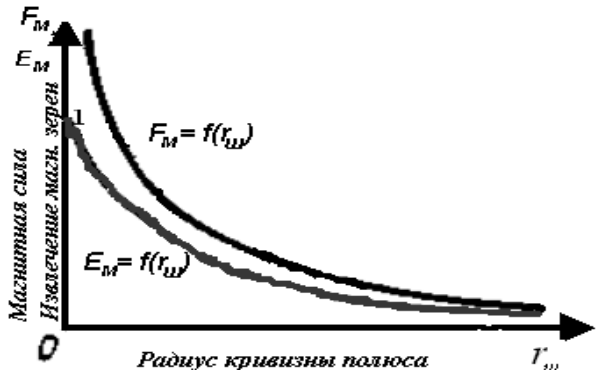


Рис. 2. Зависимость магнитной силы и извлечения от радиуса шаров

В числе важнейших технологических задач, стоящих перед магнитными методами обогащения, можно отметить следующие:

– увеличение эффективности магнитного обогащения сильномагнитных руд с получением высококачественных концентратов (≥70 % Fe) — сырья для процессов бездоменной металлургии. Это важнейшее условие прогресса в черной, цветной металлургии и смежных отраслях. Как показали наши исследования, это возможно с помощью ВСММС или высокоградиентной сепарации (данные НГАУ, ОАО «Магнис») даже без применения флотации;

– повышение извлечения металлов из слабомагнитных руд на основе высокоградиентной и сверхпроводящей сепарации шламов, промпродуктов и хвостов. Это наиболее важная задача при обогащении руд редких металлов, вольфрама, марганца, хрома и т. д.;

– комплексное использование месторождений полезных ископаемых на основе применения комбинированных с магнитными методов обогащения;

– рудоподготовка и предварительное обогащение руд в процессах открытых горных работ на основе передвижных установок с магнитными сепараторами, позволяющими не только резко повысить «бортовое содержание» и другие технологические показатели обогащения, но и сделает возможным эксплуатацию многочисленных месторождений руд редких металлов с малыми запасами, которые иначе обогащать невыгодно;

– предварительное обогащение полезных ископаемых в условиях подземных горных работ наиболее приемлемо магнитными и комбинированными методами, не требующими очистки сточных вод от токсичных реагентов.

Эти задач проанализированы в настоящем докладе в такой же последовательности. При проектировании магнитных систем с чередую-щейся полярностью для барабанных сепараторов нами учитывался также критерий соотношения размеров частиц и шага полюсов $\boldsymbol{K_r}$, определяющий область их применения (ММС, СМС и магнитная рудоразборка в карьере.

Мокрая магнитная сепарация измельченных магнетитовых кварцитов на серийных сепараторах типа ПБМ выделяет, как известно, в конечный продукт (отвальные хвосты) только немагнитные зерна пустой породы и бедные сростки. Рудная смесь (магнетит, богатые и средние сростки) переходит в магнитный продукт, захватывая немагнитные зерна кварца и пустой породы за счет магнитной флокуляции сильномагнитных зерен и физико-механической адгезии, и передается на доизмельчение из стадии в стадию.

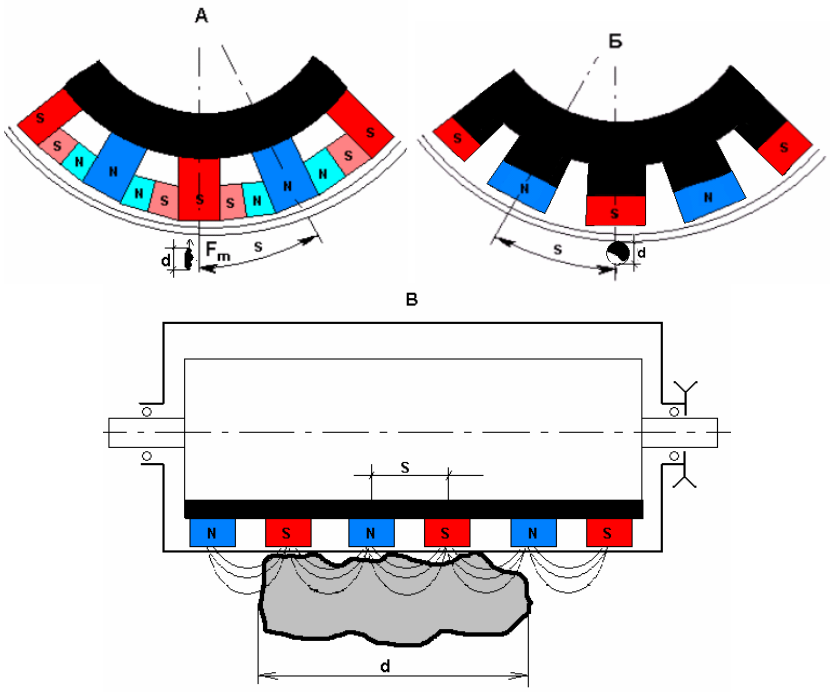


Рис. 3. Основные диапазоны критерия K_r = d/S: А (0,01- 0,0001); Б (0,1 — 1,0); В (1 — 10)

Анализируя вещественный состав измельченной руды, можно увидеть кроме большого количества раскрытых зерен пустой породы, также значительную часть раскрытых зерен магнетита уже после первой стадии самоизмельчения (30—50 %) [2]. Это готовый концентрат, который по законам обогащения должен быть выведен из циклов измельчения, уменьшая расход энергии на процессы переизмельчения, вызывающего ошламование магнетита, а также потери его в отвальных хвостах. Для стадиального выделения магнетитового концентрата разработаны и испытаны в НТЦ МГГУ в рамках договорных работ с МГОКом и ЛГОКом различные конструкции сепараторов и на их основе создан экспериментальный образец такого сепаратора ВСПБМ-32,5/20. На основе этих испытаний по патенту РФ №236421 был выполнен проект нового опытно-промышленного высоко-селективного сепаратора ВСПБМ-90/100, который был изготовлен в 2010 г. Воронежским заводом «Рудгормаш». В конструкции этого се-



Рис. 4. Внешний вид сепаратора опытно-промышленного сепаратора ВСПБМ-90/100, испытанного на Лебединском и Михайловском ГОКах

сепаратора уже заложены значительные диапазоны регулировки его оптимальных конструктивно-технологических параметров (модуляция амплитуды и частоты магнитного поля и др.), а большая длина рабочей зоны (угол охвата — 360^0) повышает его производительность (рис. 4) [2]. Его промышленные испытания показали возможность выделения из магнитного продукта первой стадии обогащения на Лебединском ГОКе концентрата с 68,8 % Fe при выходе до 20 % (повышение качества исходного продукта на 17 %), а на Михайловском ГОКе после второй стадии обогащения (магнитный продукт после первой стадии содержит много скрапа) концентрата с 65,1 % Fe при выходе 17—20 % (повышение качества исходного продукта на 11 %).

После успешных промышленных испытаний сепаратор должен стать основой серийного сепаратора ВСПБМ 120/300. На использование такого сепаратора рассчитана предлагаемая нами новая технология, основанная на данных многочисленных промышленных и стендовых испытаний всех сепараторов этого типа [2].

В роликовых, валковых и высокоградиентных сепараторах с сильным полем верхний предел магнитной индукции полей в сепараторах с электромагнитными системами теоретически составляет 2 Тл, но практически достигают индукций не выше 1.5 — 1,8 Тл, что связано с приближением к магнитному насыщению материала сердечников, удорожанию таких систем и утяжелению сепараторов. Опытно-промышленный образец сепаратора 4ЭВМ-38/275, изготовленного Поваровским опытным заводом в исполнении для обогащения слабомагнитных руд крупностью 1–0,1 мм, прошел приемочные испытания на обогатительной фабрике Лисаковского ГОКа имени 60-летия СССР и принят в серийное производство. Его производительность 35 т/час на материале крупностью –3 мм, соответствует его весу — 38 т. Этот

сепаратор также эффективен при обогащении мелких классов марганцевых руд.

Магнитные свойства гематита в 1000 раз ниже, чем у магнетита, поэтому обогащать магнитными методами окисленные кварциты также легко как магнетитовые не удавалось до середины прошлого столетия, но для этой цели в 70-е годы в СССР и за рубежом уже был разработан и испытан ряд высокоградиентных магнитных сепараторов с высокой напряженностью магнитного поля возбуждения (ВГМС): электромагнитный сепаратор 6ЭРМ-35/315 («Магнис ЛТД», Украина); такого же типа высокоградиентный магнитный сепаратор для мокрого обогащения «Jones» DP-317 (фирма KHD, ФРГ) и его уменьшенная копия сепаратор ShP-2000 (ЧГМНИИ, Китай); высокоинтенсивный сепаратор с вертикальным ротором «SLON» (Китай); высокоинтенсивный сепаратор с вертикальным ротором (Чехия); сепаратор типа «Карусель» фирмы «Сала», сепаратор «Соло» фирмы Крупп и многие другие.

Общим недостатком всех сепараторов ВГМС, ограничивающим их широкое внедрение, является их высокая энергоемкость, большая масса (до 200 т, что требует специальных фундаментов и перекрытий) и, как следствие — высокая стоимость. В Росси впервые сделана успешная попытка создания ВГМС на высокоэнергетичных постоянных магнитах типа Nd-Fe-B или Sm-Co (Евразпатент № 014396 от 29.10.2010г.). В этом сепараторе использована шариковая высокоградиентная среда, способня эффективно работать при напряженностях поля возбуждения, доступных постоянным магнитам. Их работоспособность было доказана экспериментально [3]. По существу основой этого процесса являются матрицы — высокоградиентные магнитные осадительные поверхности (рифленые пластины, слои шаров, стержней, сеток, проволочек, «стальной шерсти» и др.). Высокоградиентная среда, независимо от ее типа и формы, изготавливается из материалов с высокой магнитной проницаемостью, низкой остаточной индукцией, высокой коррозионной износостойкостью. Как показали многочисленные исследова-ния, с точки зрения уровня магнитной индукции в камере (или напряженности поля возбуждения) при заданной свободной м.д.с. на полюсах, наиболее удобной формой являются шары относительная магнит-ная проницаемость слоя которых достигает 2—2,5. Это позволяет снизить пороговый уровень напряженности возбуждения внешнего поля сил в объеме

рабочей камеры до значений достижимых в системах с постоянными магнитами типа Nd-Fe-B или Sm-Co.

При обогащении окисленных железных руд по магнитной и комбинированным технологиям можно получить суммарный магнетит-гематитовый железорудный концентрат с общим выходом до 49 %, при содержании 65 % Feобщ и извлечении в него до 81 % Fe. В принципе — это предел технологических возможностей магнитных методов, в частности процесса ВГМС.

Дальнейшее «форсирование» силового режима разделения минералов возможно только в полях сверхпроводящих магнитных систем. В России такие работы впервые начаты МГИ и ИМЕТ в 1969—73 г.г.на основе Nb-Ti — сверхпроводящего кабеля НТБ-1, разработанный ИМЕТ. [4]. Это многожильный, композиционный сверхпроводник, в медном чехле которого диаметром 0,5 мм находится 19 жил сплава «Ниобий-титан» диаметром 50 мкм. Его критическое поле $\boldsymbol{H_c} \geq 4$ МА/м, а плотность тока I_c=50 А/мм^2.

Для проведения лабораторных исследований с использованием сверхпроводимости МГИ совместно с ИМет им. Байкова АН СССР ещё в 1972 году был разработан и изготовлен сверхпроводящий (СП) соленоид, рассчитанный на напряженность магнитного поля в центре его рабочего объема $\boldsymbol{H}$ = 3,2 МА/м при плотности тока в композиционном сверх-проводнике (**N**bTi, кабель НТБ-1) $j = 2 \cdot 10^4$ А/см^2. Практическая проверка работы сверхпроводящего соленоида подтвердила полное соответствие фактических параметров расчетным.

Криостат разработанный в ФИАН им. Лебедева, имел азотный экран, вакуумные рубашки и канал для теплого поля внутренним диаметром 20 мм, наружным 40 мм (он же внутренний диаметр соленоида). Общая длина канала 250 мм, длина соленоида 100 мм. Минимальный объем гелия в криостате составлял 4 л, расход при нормальной работе установки 1,5 л/ч (не считая расхода на первоначальное охлаждение). Результаты проведенных на нем экспериментов показали возможность прямой, высокоградиентной и магнитногидродинамической сепарации тонкоизмельченных слабомагнитных материалов (окисленных железистых кварцитов ОГОКа, КМА и ЦГОКа, марганцевых шламов МГОКа, высокосернистых углей Подмосковья и Донбасса и др.) в сильных неоднородных магнитных полях, созданных сверхпроводящими соленоидами.

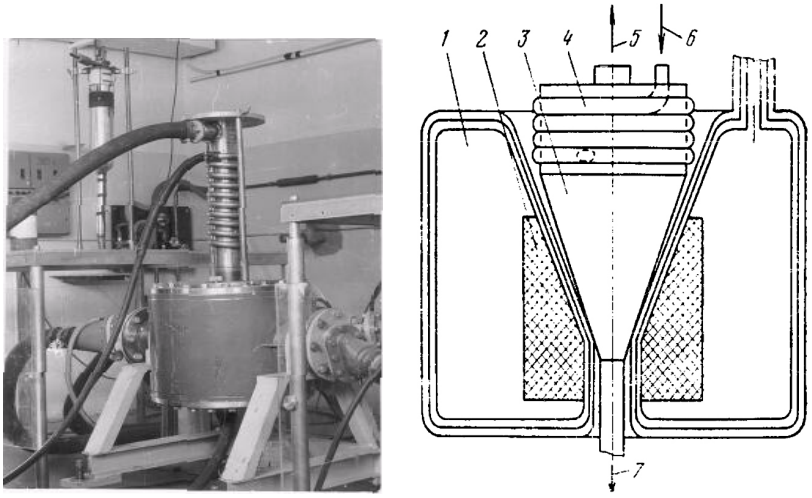


Рис. 5. Схема магнитного гидроциклона (а): *1* — криостат с теплым полем; *2* — сверхпроводящий соленоид; *3* — цилиндрический корпус; *4* — спиралеобразный патрубок; *5* — слив (немагнитная фракция); *6*–питание; *7* — пески (магнитная фракция) и внешний вид (*б*) магнитно-гидроциклонного сепаратора с напряженностью поля 12 МА/м и производительностью до 5 т/ч на испытательном стенде

В качестве аппаратом непрерывного действия, приемлемого для создания промышленного СП-сепаратора, был разработан и запатентован магнитный гидроциклон (А.с. № 522857, Бюл. изобр. №28, 1976 г.). Изменяя профиль соленоида (например, трапециевидный), можно регулировать градиент магнитного поля по оси соленоида.

Математическая модель процесса сепарации в магнитном гидроциклоне, учитывающая кроме сил тяжести, Архимеда, магнитных, центробежных и гидромеханических также силы реакции границ — выталкивание частиц из суспензии, утяжеленной магнитными и гравитационными полями, для одномерного случая (по вертикальной оси гидроциклона) имеет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial C}{\partial z^2} + \frac{1}{\alpha}\frac{\partial C}{\partial z}\left\{\left[g(\rho - \rho_{ср}) + k_м(\chi - \chi_{ср}) - \right.\right.$$

$$\left.\left. - k_c \upsilon_{ср}(z) - T\left[g(\rho - \rho_{ср}) + k_м(\chi - \chi_{ср})\right]\right\}, \qquad (6)$$

где C–концентрация магнитной фракции; D–коэффициент диффузии; $k_м$–коэффициент магнитной силы, зависящий от картины

магнитного поля сверхпроводящей магнитной системы $(H\nabla H)$; α, k_c — коэффициенты силы сопротивления среды (с учетом частиц и без них); T–коэффициент, учитывающий содержание твердого в магнитной фракции; $\rho_{ср}$, $\chi_{ср}$–соответственно плотность и магнитная восприимчивость суспензии.

Эксперименты по оптимизации процесса планировалтсь по методу Бокса–Уилсона. Уравнение регрессии, полученное в первой ступени экспериментов, помогло оценить степень влияния основных параметров этого процесса:

$$\varepsilon = 35,6 - 2,9(Dп - 10)/3 + 7,9(T - 10)/5 + 6,8(I - 1,5), \qquad (7)$$

где $D_п$–диаметр пескового отверстия магнитного гидроциклона, мм; T–содер-жание твердого в питании, %; I–ток магнитной системы гидроциклона, А.

Эта модель позволила разработать исходные данные для проектирования опытно-промышленного сверхпроводящего магнитного гидроциклона непрерывного действия.

Техническая характеристика магнитного гидроциклона

Производительность, т/ч	до 5
Диаметр, мм: гидроциклона	100
входного патрубка	25
шламового патрубка	50
песковой насадки	16
Угол конусности, градус	45
Давление на входе, кПа	350
Максимальная напряженность поля. МА/м	12

Испытания проводились на стенде с замкнутым циклом (слив пески объединялись в зумпфе насоса). Сепарация окисленных железистых кварцитов требовала полного удаления магнтита из исходного продукта. Марганцевые шламы Богдановской и Грушевской ОФ, содержащие около 20 % Mn, сепарировались спокойно, без забиваний и при этом в один прием сливы получились довольно бедными (менее 10 % Mn), а пески с содержали 27–30 % Mn, т.е. являлись концентратами 3-го сорта.

Сверхпроводящие системы уже в настоящее время позволяют достигать индукций 10 Тл, но учитывая при этом магнитное насыщение сепарируемых слабомагнитных минералов, вряд ли нуж-

на индукция более 5 Тл. По мнению ведущего специалиста в этой области — проф. Яна Свободы даже при очистке каолина в матрицах из стальной шерсти (ваты) индукция в рабочем пространстве не должна превышать 5 Тл [5]. Исключение составляют процессы МГД- и МГС–сепарации, при которых с ростом индукции уменьшается плотность тока или стоимость магнитных жидкостей, поэтому целесообразно значительное увеличение индукции, разумеется в допустимых технико-экономических пределах;

— основными процессами магнитной сепарации с применением сверхпроводящих магнитных систем могут быть: магнитная сепарация в криволинейных каналах, создающих надежные удерживающие силы; магнитогидродинамическая и магнитогидростатическая сепарация; магнито-адгезионная сепарация; магнитоцентробежная сепарация; флотация в магнитном поле и др.;

— перспективы развития магнитного обогащения тонковкрапленных слабомагнитных руд в ближайшем будущем связаны с применением сверхпроводящих и мощных соленоидных магнитных систем;

— использование сверхпроводящих систем стимулирует рождение новых процессов магнитного и электрического обогащения, но выбор типа системы (сверхпроводящей или мощной электромагнитной) для уже существующих конструкций магнитных сепараторов определяется только экономикой.

Высокая стоимость эксплуатации гелиевых криостатов сдерживает широкое внедрение сверхпроводящих магнитных систем. Появление азотных криостатов этой проблемы не решает из-за низкой плотности критических токов у высокотемпературной металлокерамики. Однако во многих странах ведутся исследования по разработке композитных азотных криостатов, где дополнительное снижение температуры осуществляется с помощью магнитокалорического эффекта или — эффекта Пельтье. Первый вызывает снижение температуры магнетика при его адиабатическом *намагничивании* (размагничивании), а второй поглощает тепло при прохождении электрического тока через контакт двух разнородных проводников. Величина тепла и его знак зависят от вида контактирующих веществ, силы тока и времени прохождения тока, то есть количество поглощаемого тепла пропорционально количеству прошедшего через контакт заряда. Если охлаждать нагревающуюся сторону элемента Пельтье (термопары), то температура холодной стороны становится ещё ниже. В одноступенчатых

элементах, в зависимости от типа элемента и величины тока, разность температур может достигать приблизительно 70°, что позволит достичь температуры, необходимой для успешной работы освоенных Nb-Ti Nb_3-Sn и других сильноточных сверхпроводящих кабелей в криостатах даже без использования гелия.

В магнитном обогащении, как правило, используют различия в удельной магнитной восприимчивости, так как она непосредственно связана с магнитной силой, но даже минералы с близкими значениями восприим-чивости можно разделять по различиям в температуре Кюри (термо-магнитная сепарация), по различию в скорости их намагничивания (динамическая гистерезисная сепарация), по различиям в коэрцитивной силе (магнитогравитационная сепарация и дешламация) и др.

В комбинированных процессах магнитногидростатической (МГС-) и магнитногидростатической (МГД-) сепарации силовое воздействие магнитного или скрещенных электрического и магнитного полей (сила Лоренца) вызывает разделение минералов даже без непосредственного действия электрической или магнитной силы на разделяемые частицы. Последние разделяются по плотности, электропроводности и т. д. Это своего рода обратная сепарация — магнитное выталкивание, которая получила широкое распространение при обогащении руд редких, благородных металлов, алмазов и т.п. [6].

В электродинамической сепарации магнитное извлечение осуществляется за счет взаимодействия магнитного момента, наведенного в проводящей частице внешним переменным электромагнитным полем индукционными токами, с постоянным, неоднородным магнитным полем сепаратора. Частота и амплитуда переменного электромагнитного поля определяются проводимостью и размерами извлекаемых частиц и позволяют отделять медь, алюминий, свинец другие металлы от непроводящих частиц. При сепарации цветного лома, когда размеры извлекаемых частиц относительно велики, ограничиваются бегущим неоднородным магнитным полем 3-фазного линейного статора, которое и наводит магнитный момент в металлических частицах и взаимодействует с ними, вызывая их высокое извлечение.

Особое место в магнитном обогащении занимают методы сепарации с предварительной магнитной подготовкой материалов, направленной на усиление магнитных свойств минералов или на повышение их контраст-ности. Методы такой подготовки могут быть самыми различными: физические, ядерно-физические, хими-

ческие, термохимические и т. д. Некоторые из них являются технологически самостоятельными: например обжигмагнитное обогащение, применяемое для обогащения окисленных железных руд и пиритсодержащих промпродуктов. Этот процесс достаточно хорошо освоен в промышленном масштабе.

Анализ обогатительной мировой техники и технологии показывает, что начиная с пятидесятых годов прошлого века по настоящее время ни один метод обогащения не развивался такими быстрыми темпами, как магнитный и комбинированные с ним. В этом направлении получено около тысячи патентов, а внедрение в промышленность новых магнитных методов приносит большие экономические эффекты, повышая извлечение металлов и минералов, повышая объёмы их производства, комплексное использование сырьевой базы, открывая дорогу новым процессам металлургии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кармазин В.В., Кармазин В.И.* Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. Изд. МГГУ, 2005 г.
2. *Кармазин В.В., Андреев В.Г., Палин И.В., Жилин С.Н., Пожарский Ю.М.* Создание техники для технологии полностадиального обогащения магнетитовых кварцитов. Горный журнал. 2010. № 12. стр. 85—89.
3. *Савицкий Е.М., Кармазин В.В., Барон В.В. и др.* Сепарация полезных ископаемых с применением сверхпроводящих магнитных систем.
4. *Svoboda Jan*. Manetic methods for treatment of minerals. — Elsevir, 2007.
5. *Черноплеков Н.А.* Академик РАН. Сверхпроводниковые технологии: Современное состояние и перспективы практического применения. РНЦ «Курчатовский институт», 2009 г. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Кармазин Виктор Витальевич — доктор технических наук,
Московский государственный горный университет, ud@msmu.ru