

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Уральский государственный горный университет»



VI УРАЛЬСКИЙ  
ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ

**ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ОБОГАЩЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО И  
ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ**

Материалы  
научно-технической конференции

2–4 декабря 2015 г.,  
г. Екатеринбург

Екатеринбург – 2015

# РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ИННОВАЦИОННОЙ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ НА АО «ОЛКОН»

Опалев А. С.<sup>1</sup>, Щербаков А. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – ФГБУН «Горный институт Кольского научного центра РАН», г. Апатиты;

<sup>2</sup> – АО «Олкон», г. Оленегорск

Эффективная работа железорудных предприятий в условиях мировой конкуренции требует не только постоянного снижения затрат на производство конечной продукции, но и диктует необходимость расширения ассортимента выпускаемой продукции – от рядовых концентратов с содержанием  $Fe_{\text{общ}}$  не менее 68,5 % для доменного производства до концентратов для процессов внедоменного получения стали с содержанием  $Fe_{\text{общ}}$  более 70,0 %. При этом постоянное повышение качества продукции необходимо осуществлять на фоне общей тенденции снижения качества добываемых руд при существенном повышении себестоимости их добычи.

Основным направлением решения проблемы повышения качества производимых железорудных концентратов при одновременном снижении себестоимости переработки руды является внедрение новых принципов построения технологических схем обогащения с использованием мирового опыта эксплуатации современного высокоэффективного технологического оборудования.

Существующие технологические схемы магнитного обогащения железистых кварцитов большинства ГОКов построены по принципу стадийного выделения хвостов и получения готового концентрата в последней стадии обогащения, при этом общее количество стадий может достигать значений 4-5 /1-2/. Главным недостатком таких технологических схем является нерациональное использование энергии измельчающего оборудования, поскольку при данной организации массопотоков магнетитсодержащий промпродукт последовательно проходит через все стадии измельчения, что приводит к переизмельчению магнетита при низкой степени раскрытия его сростков с порообразующими минералами и, следовательно, высоким потерям тонких фракций магнетита с отвальными хвостами.

Одним из путей повышения энерго- и ресурсоэффективности технологических схем обогащения при переработке железистых кварцитов является внедрение стадийного выделения готового концентрата по мере раскрытия магнетита в каждой стадии измельчения. Практическая реализация данного принципа построения технологических схем позволит существенно снизить затраты в циклах измельчения, а также повысить выход концентрата и извлечение железа за счет снижения потерь тонких частиц магнетита в результате уменьшения степени его переизмельчения /3-5/.

Мировой опыт показал, что наиболее интересным и перспективным направлением работ по решению указанной выше задачи является применение операции тонкого вибрационного грохочения в циклах измельчения вместо традиционно применяемой операции классификации в гидроциклонах /6-7/. Очевидно, что разделение материала по крупности на сите более эффективно, чем разделение в гид-

роциклонах, поскольку при гидроциклонировании распределение частиц по продуктам классификации происходит по крупности и плотности и носит вероятностный характер. Операция же тонкого грохочения позволяет концентрировать в подрешетном продукте преимущественно раскрытый материал, а надрешетный продукт представлен нераскрытой рудной смесью, при измельчении которой в отдельном цикле резко повышается коэффициент измельчаемости, что предопределяет уменьшение циркуляционной нагрузки в цикле измельчения-классификации. При этом задача энергоресурсосбережения решается либо путем сокращения числа мельниц при неизменной производительности секции, либо увеличением объема переработки руды на секции при неизменном фронте измельчения без снижения выхода и качества концентрата /8-9/. Такой подход модернизации технологии производства железорудных концентратов уже широко применяется в мировой практике переработки железистых кварцитов, в том числе на ряде предприятий СНГ, таких как АО «Карельский окатыш», АО «Ковдорский ГОК», АО «Соколовско-Сарбайское ГПО» и ряде других. В настоящее время на ДОФ АО «Олкон» находятся в эксплуатации 20 единиц грохотов «Stack Sizer<sup>™</sup>» пятидечной модели 2S648-1STK американской фирмы «Derrick Corporation» производительностью более 250 т/час твердого (рис. 1), при этом достигнуто существенное снижение энергопотребления измельчительного передела, выразившееся в уменьшении количества эксплуатируемых мельниц шаровой загрузки с двух до одной во второй стадии измельчения.

Однако получение товарного железорудного концентрата в каждой стадии обогащения применением только тонкого грохочения и последующей стандартной магнитной сепарации подрешетного продукта весьма затруднительно, поскольку магнитная сепарация, осуществляемая в фабричных условиях на серийных сепараторах, позволяет выделить в хвосты только немагнитные зерна пустой породы, а вся рудная смесь (зерна магнетита, богатые и бедные сростки) переходит в магнитный продукт.



**Рис. 1. Общий вид грохотов «Stack Sizer<sup>™</sup>» корпорации «Derrick Corporation» на ДОФ АО «Олкон»**

Выделение готовых концентратов из магнетитсодержащих продуктов на магнитных сепараторах после каждой стадии измельчения практически невозможно по трем причинам:

- магнитная сепарация не обеспечивает эффективного разделения частиц магнетита и их сростков с порообразующими минералами из-за их низкой контрастности магнитных свойств;

- «жесткая» магнитная флокуляция частиц магнетита в магнитном поле рабочей зоны сепаратора приводит к механическому захвату бедных сростков и частиц пустой породы;

- высокая физико-механическая активация поверхности частиц кварца после измельчения приводит к адгезионному закреплению их на поверхности частиц магнетита.

Многолетними исследованиями Горного института КНЦ РАН показано, что операция магнитно-гравитационной сепарации (МГ-сепарации) при разделении магнетитсодержащих продуктов позволяет выделить фракции сростков в отдельный продукт (слив сепаратора), обеспечивая возможность получения готового концентрата из любой стадии технологического процесса в отличие от серийно выпускаемых магнитных сепараторов /10-11/. Соответствующим подбором управляющих параметров может быть достигнута значительная селективность процесса, обеспечивающая разделение минеральных зерен с близкими физическими свойствами. Микрофотографии сливов МГ-сепарации, полученных при доводке товарного концентрата ДОФ ОАО «Олкон», представлены на рис. 2.

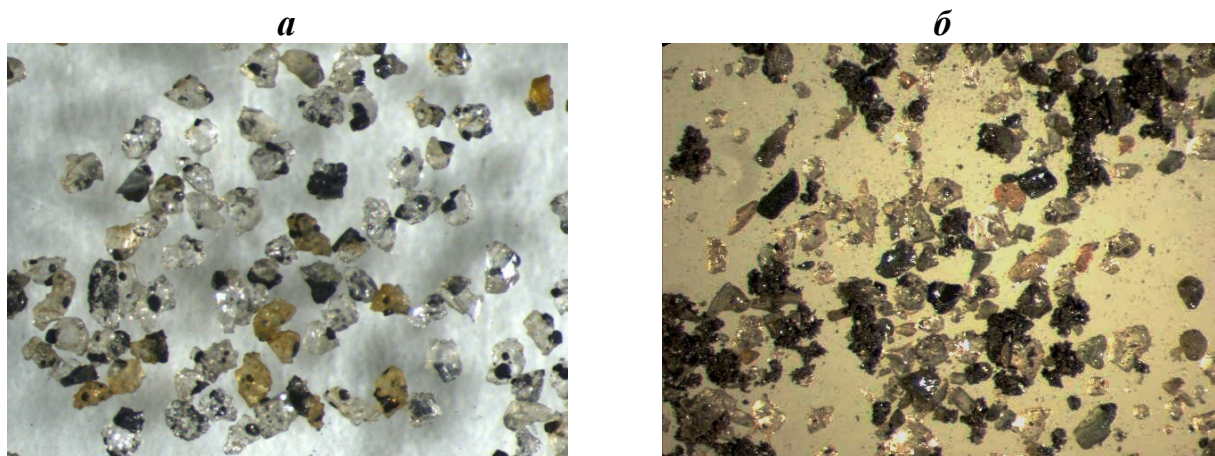


Рис. 2. Микрофотографии сливов МГ-сепарации с содержанием  $Fe_{общ}$ :

*a* – 16 %; *б* – 24 %

Значения напряженности магнитного поля и скорости восходящего водного потока, необходимые для гидротранспорта сростков через агрегированную оживленную ферросуспензию в верхнюю часть потока с последующим удалением их в слив могут быть определены из следующего теоретического представления процесса МГ-сепарации, базирующегося на теории магнитоустойчивых оживленных слоев (Magnetically Stabilized Fluidized Bed–MSFB), основы которой заложены и развиты в работах /12-16/. Агрегирование ферромагнитных частиц, находящихся в оживленном слое, на который воздействуют однородным магнитным полем с напряженностью  $H$  происходит за счет силы диполь-дипольного вза-

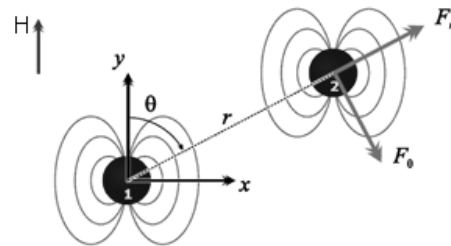
имодействия  $F_{mi}$  (силы потококосцепления), величина которой согласно рис. 3 может быть определена из выражения (1):

$$\bar{F}_{mi} = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \frac{p_1 p_2}{r^2} \cdot \bar{i}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость,  $p_1, p_2$ , – магнитные моменты частиц,  $r$  – расстояние между ними.

Продольная и поперечная составляющие этих сил, соответственно:

$$F_r = \frac{3\mu_0 |m|^2}{4\pi r^4} \cdot (1 - 3\cos^2\theta), \quad F_\theta = \frac{3\mu_0 |m|^2}{2\pi r^4} \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta. \quad (2)$$



**Рис. 3. Силы дипольного магнитного межчастичного взаимодействия во внешнем магнитном поле**

В MFSB, аналогично кипящему слою, ферромагнитные агрегаты подвижны и обладают упругими свойствами, растягиваясь в направлении действия вектора скорости жидкости. Физические свойства (крупность, плотность и магнитная восприимчивость) частиц, участвующих в структурообразовании ферромагнитных агрегатов, определяют технологические свойства магнитного продукта, концентрирующегося в нижней части сепарационной зоны МГ-сепаратора, а частицы, не участвующие в процессах агрегирования, выносятся восходящим водным потоком из межагрегатного пространства в верхнюю часть сепаратора.

Структурирование частиц слоя приводит к снижению коэффициента гидродинамического сопротивления для ферромагнитных частиц в  $D$  раз, где

$$D = \frac{C_{D0|B_0}}{C_{D0|B_0=0}}.$$

Теоретическая оценка коэффициента  $D$  дает значение

$$D = 1 - 0,56B^{0,62},$$

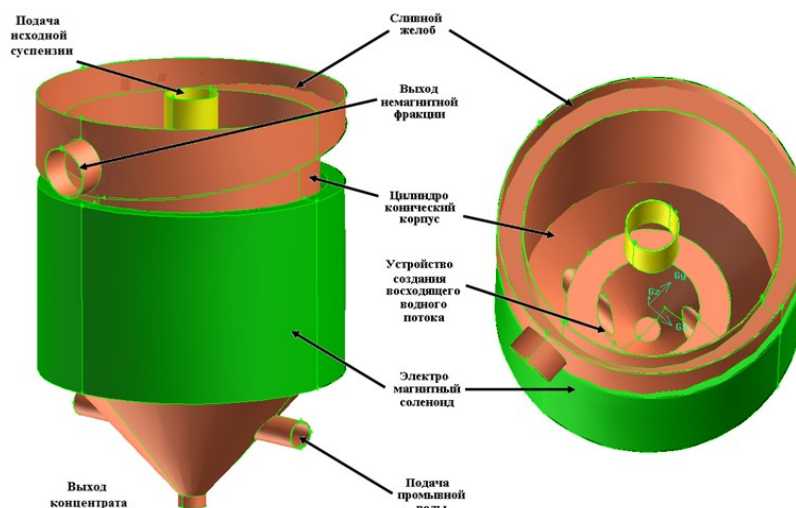
где  $B = \frac{|F_{IM, \max}|}{(\rho_p - \rho_f)gV_p}$ ,  $|F_{IM, \max}| = \frac{6\mu_0 m^2}{4\pi d^4}$  – максимальная сила магнитного взаимодействия.

В условиях непрерывной подачи исходной суспензии и непрерывного вывода слива с неструктурирующими частицами наблюдается процесс постоянного роста ферромагнитных агрегатов на верхней границе MSFB и их постоянного осаждения под действием гравитационной силы и вывода в концентрат сепаратора в виде суспензии с высокой плотностью.

В Горном институте Кольского научного центра РАН разработан ряд конструкций магнитно-гравитационных аппаратов различного назначения и произво-



дительности, способных селективно обогащать тонкоизмельченные сильномагнитные руды, обобщенная конструкция которых представлена на рис. 4. Аппарат состоит из цилиндро-конического корпуса из немагнитного материала (нерж. сталь, пластик), соленоидной катушки и снабжен системой автоматической разгрузки концентрата (САРК). Благодаря наличию этой системы в сепараторе поддерживается неизменный по высоте уровень ферромагнитного слоя, что необходимо для оптимизации массопотоков внутри корпуса аппарата.



**Рис. 4. Конструкция магнитно-гравитационного сепаратора**

Отличительной особенностью рассматриваемой конструкции является отсутствие вращающихся частей (восходяще-центробежная гидродинамика потоков промывной воды обеспечивается специальным устройством с тангенциальным подводом воды, расположенным в нижней части корпуса аппарата), простота обслуживания и отсутствие необходимости в профилактических ремонтных работах, так как износ в процессе работы аппарата практически не имеет места.

С 1980-х годов прошлого века по настоящее время процесс МГ-сепарации используется на ОАО «Олкон», в тот же период различные конструкции сепараторов испытывались на ряде ГОКов СССР (в т.ч. на Лебединском, Ингулецком, Костомукшском ГОКах), а также межведомственной комиссией Минчермета были рекомендованы для серийного производства. Однако в силу существовавших тогда экономических условий (перестроечные процессы и переход на рыночную экономику) широкого применения МГ-сепараторы не получили (кроме ОАО «Олкон», где на сегодняшний день находятся в эксплуатации более 20 единиц) (рис. 5).

В 1992-1993 г.г., после приобретения лицензии норвежской стороной, промышленный образец МГ-сепаратора (MGS-1750) в количестве 17 ед. был успешно внедрен на АО «Судварангер» в цикле классификации слива II стадии измельчения с целью исключения из процесса IV стадии измельчения и сепарации. Общий вид магнитно-гравитационного сепаратора MGS-1750 представлен на рис. 6.

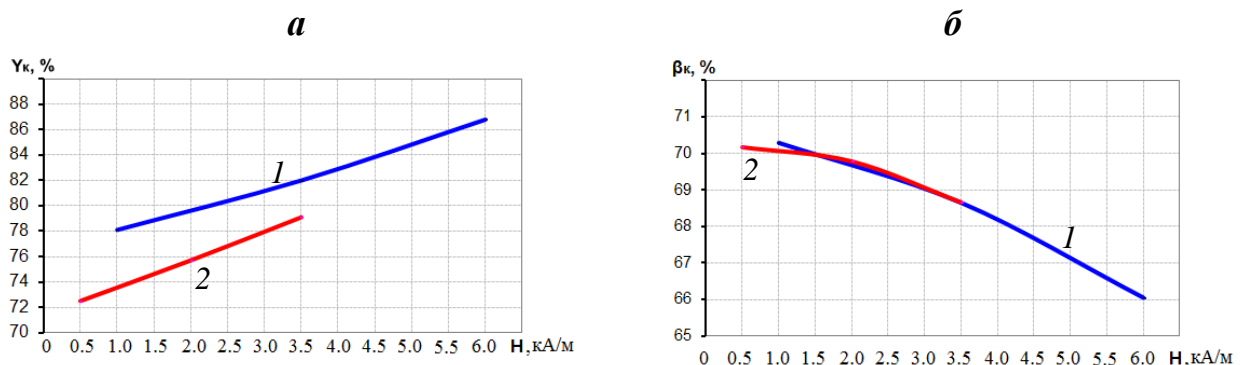


**Рис. 5. Общий вид стадии магнитно-гравитационных сепараторов (ЭМС-150) на ДОФ АО «Олкон»**



**Рис. 6. Общий вид стадии магнитно-гравитационной сепарации (MGS-1750) на АО «Судварангер» (Норвегия)**

Прогнозированием технологических показателей разделения магнитно-гравитационной сепарации различных продуктов обогащения железистых кварцитов с низкой контрастностью физических свойств в магнитно-стабилизированной ожиженной суспензии, основанной на закономерностях магнитного взаимодействия минеральных частиц в условиях центробежно-восходящей гидродинамики и учитывающей вещественный состав разделяемых продуктов, показано, что высокая эффективность разделения частиц магнетита и его сростков с породообразующими минералами достигается при сепарации подрешетных продуктов тонкого грохочения. В процессе технологических исследований по стадийному выделению готового концентрата на примере АО «Олкон» установлено, что напряженность магнитного поля в рабочем объеме магнитно-гравитационного сепаратора является определяющим параметром разделения, который позволяет изменять качество получаемых готовых концентратов в широком диапазоне. На рис. 7 и представлены зависимости выхода концентрата (*а*) и содержания  $Fe_{\text{общ}}$  в нем (*б*) от напряженности магнитного поля, показывающие рост выхода концентрата при увеличении значения поля и одновременном снижении содержания железа в нем.



**Рис. 7. Зависимость выхода концентрата (*а*) и содержания  $Fe_{\text{общ}}$  в нем (*б*) от напряженности магнитного поля для:**

*1* – первой стадии обогащения; *2* – второй стадии обогащения

Проведенные технологические исследования показали принципиальную возможность применения комбинации тонкого грохочения и МГ-сепарации для

получения магнетитовых концентратов с кондиционным содержанием  $Fe_{\text{общ}}$  и выше (до 70 %) в каждой стадии обогащения. Использование указанного выше технологических решений применительно к перерабатываемым на АО «Олкон» железистым кварцитам позволяет уже сейчас уменьшить энерго-ресурсозатраты при производстве концентрата, а в будущем решить вопросы стабилизации качества товарной продукции при внедрении соответствующих систем автоматизации технологических процессов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Остапенко П. Е. Обогащение железных руд. М., Недра, 1985. 270 с.
2. Кармазин В. В., Кармазин В. И. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. Том I, Москва, Изд-во МГГУ. 2005. С.672.
3. Пелевин А. Е. Стадиальное выделение железного концентрата // Обогащение руд, 2007, № 3, С.10-15.
4. Авдохин В. М. Основные направления развития процессов глубокого обогащения железных руд / В. М. Авдохин, С. Л. Губин // Прогрессивные технологии комплексной переработки минерального сырья: сб.тр. – Москва, издательский дом «Руда и металлы», 2008. С.164-179.
5. Патковская Н. А., Тасина Т. И. Модернизация технологии обогащения железосодержащих руд Северо-Запада России // Обогащение руд. 2011. №1. С.6-10.
6. Перспективы применения тонкого грохочения в технологии обогащения железорудного сырья: отчет о НИР / НИИ, «Уралмеханобр»; В. В. Стаханов, Г. В. Зайцев. Екатеринбург, 2000
7. Сухорученков А. И. Тонкое грохочение – высокоэффективный метод повышения технологических показателей обогащения тонковкрапленных магнетитовых руд / А. И. Сухорученков, В. И. Стаханов, Г. В. Зайцев // Горный журнал. 2001. №4. С.48-50.
8. Баранов В. Ф. Пути снижения расхода электроэнергии на железорудных обогатительных фабриках / В.Ф. Баранов, В.А. Сентемова, А.О. Ядрышников // Обогащение руд. 2000. №2. С.14-19.
9. Дремин А. А. Стратегия энергосбережения при добыче и переработке железных руд / А.А. Дремин // Горный журнал. 2006. № 12. С. 45-47.
10. Усачев П. А., Опалев А. С. Магнитно-гравитационное обогащение руд. Изд. КНЦ РАН, Апатиты, 1993. С. 92.
11. Усачев П. А. Получение высококачественных железных концентратов на обогатительной фабрике ОАО «Лебединский ГОК» // Горный журнал. 2000. № 3. С.41-44.
12. Кирко И. М., Филиппов М. В. Особенности взвешенного слоя ферромагнитных частиц в магнитном поле // Журн. техн. физики. 1960. Т. 30, № 9. С 1081-1084.
13. Филиппов М. В. Взвешенный слой ферромагнитных частиц и действие на него магнитного поля // Прикладная магнитогидродинамика. Рига, 1961. Т. 12 С 215-236.
14. Rosensweig R. E. Fluidization: Hydrodynamic stabilization with a magnetic field // Science. 1979. Vol. 204. P. 57-60.
15. Siegel, J. Magnetized-fluidized beds / J. H. Siegel. - Powder Technology, 64 (1991) - С.1.
16. Conan, J. Fee, Stability of The Liquid-Fluidized Magnetically Stabilized Fluidized Bed, AIChE Journal, Vol. 42, No.5 May (1996).