

2. Моркун В.С. Ультразвуковой контроль характеристик измельченных материалов и адаптивное управление процессами измельчения-классификации руд на его базе: / В.С. Моркун. - Дисс. ... докт. техн. наук: 0.5.13.07. - Кривой Рог, 1999. -401 с.

3. Maldonado M. A. Advances in estimation and control for flotation columns. Du programme de doctorat en génie électrique pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (PhD) .Québec. 2010. p. 135.

4. Titterington, D., Smith A., Makow U. Statistical analysis of finite mixture distributions. John Wiley and Sons, Ind Edition. UK. 1985. p. 7.

5. Olympus NDT. Introduction to phased array ultrasonic technology applications. R/D tech guideline. Canada, April 2007, p. 9.

6. Goodman J . W., Introduction to Fourier Optics, New York, 1968, p. 5.

7. Seip, R., VanBaren, P., Cain, C. A., and Ebbini, E. S., Noninvasive Real-Time Multipoint Temperature Control for Ultrasound Phased Array Treatments, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 43(6), 1996, p. 1063-1073.

8. Kohout B., Transducer Array Calculation (TAC) GUI., <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/35657-transducer-array-calculation-tac-gui>.

9. Church C.C. Prediction of rectified diffusion during nonlinear bubble pulsations at biomedical frequencies. J. Acoust. Soc. Am. 83, 1988, p. 2210-2217.

УДК 669

В. В. КАРМАЗИН докт. техн. наук, проф., П.А. СЫСА, аспирант
МГИ МИСИС

РАСШИРЕНИЕ ОБЪЕМОВ СЫРЬЯ БЕЗДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ ЗА СЧЕТ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ МАГНЕТИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ

Авторы предлагают получить высококачественные концентраты для бездоменной металлургии на основе нового процесса высокоградиентной сепарации в переменных магнитных полях с низкой напряженностью и оригинальных конструкций аппаратов, его реализующих.

Автори пропонують отримати високоякісні концентрати для бездоменної металургії на основі нового процесу високоградієнтним сепарації в змінних магнітних полях з низькою напруженістю і оригінальних конструкцій апаратів, його реалізують.

Authors offer to receive high-quality concentrates for without blastfurness metallurgy on the basis of new process highgradient separation in variable magnetic fields with low intensity and original designs of devices, its realising.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. В производстве стали доменный передел становится основным тормозом, потому, что: растут требования к качеству стали, а основное количество серы и фосфора попадает в чугуны при доменном переделе и ухудшает качество стали; кокс и коксующиеся угли все более труднодоступны, при этом есть огромные запасы природного газа и относительно дешевая электроэнергия. До настоящего времени в России основное количество черных металлов (более 98 %) получают по двух-ступенчатой схеме чугуны-сталь. При этом из всего производимого чугуна более 94% идет на производство стали (так называемый «переделный чугун»), и лишь небольшую часть составляет «литейный чугун», из которого в дальнейшем отливают готовые детали, т.е. нет необходимости в чугуне, как самостоятельном продукте. Сера и фосфор, попадают в чугуны и сталь преимущественно из кокса. При этом не имеет значения, как отмечал А.Н. Похвиснев, с какой долей скрапа (вплоть до 100 %) была получена сталь, так как скрап, в свою очередь, был получен из чугуна.

Анализ исследований и публикаций. Прогрессивным современным способом является получение стали прямым восстановлением из железорудных концентратов, минуя доменный процесс. Эти концентраты после окомкования восстанавливают конвертированным природным газом при температуре до 1000°C, затем поступают на горячее брикетирование в вальцевые прессы или в качестве шихты поступают в электропечи, откуда сталь после непрерывной разливки сразу идет на прокатку. Способ весьма экономичен, отпадают затраты на коксохимическое и флюсовое производство, а качество полученной стали высокое, поскольку в рудах Курской магнитной аномалии, где запасы железных руд, составляют более 82% прогнозных ресурсов России, и оцениваются в 123,6 млрд. т., практически отсутствуют фосфор и сера [1]. Производительность бездоменных процессов заметно выше традиционных способов выплавки стали. В России такое производство стали организовано лишь на Старооскольском электрометаллургическом заводе (1,5 млн. тонн в год), построенном в 1970-х годах с помощью ФРГ. Бездоменная металлургия позволяет отказаться от постоянно дорожающего и становящегося все более дефицитным кокса, от сложного хозяйства коксохимических, агломерационных и доменных цехов – она выгодно отличается и в экологическом отношении, так как исключает загрязнение окружающей среды сернистыми газами и другими вредными веществами. Полученная сталь содержит значительно меньше серы и фосфора.

Достоинствами перечисленных способов является возможность получения стали и сплавов очень высокой чистоты, применение которых об-

легчает массу конструкций, увеличивает надежность и долговечность машин и механизмов. С начала железного века существовала выплавка железа с использованием древесного угля (на ряде уральских заводов эта технология, позволяющая получать очень чистый металл, сохранялась до середины нашего века). Такая сталь необходима для атомной, реактивной и космической техники.

Однако расширение объемов бездоменного производства стали возможно только при наличии соответствующего ему сырья – высококачественных магнетитовых концентратов. Основным требованием, предъявляемым к железорудному сырью при бездоменных процессах переработки, является общее содержание $Fe_{\text{общ}}$ не менее 68%, при содержании кислых оксидов менее 2% (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2) и основных оксидов менее 3% (CaO , MgO) для поддержания оптимального кремниевого модуля. Лебединский горно-обогатительный комбинат обладает наиболее прогрессивной технологией самоизмельчения и магнитного обогащения железных руд позволивший ему выйти на уровень производства сырья для бездоменной металлургии (горячее брикетирование железа, электросталь и др.). Уникальная сырьевая база магнетитовых кварцитов, перерабатываемых на ОАО «Лебединский ГОК», позволяет производить высококачественные концентраты (более 70% $Fe_{\text{общ}}$) по магнитной схеме. Шамраевское месторождение гематита (маршалита) в Белгородской области, разрабатываемое методом гидродобычи, способно дать сырьё для бездоменной металлургии практически без доводки, причем металлургическая ценность гематита выше чем магнетита [2].

Все остальные ГОКи РФ получают концентраты с содержанием 65-66% $Fe_{\text{общ}}$. Для использования их в качестве сырья для бездоменной металлургии необходимо повышать их качество на 3-5% $Fe_{\text{общ}}$ и для этой цели разработано несколько различных направлений. Основной прирост массовой доли железа в железорудных концентратах получают за счет введения в технологию стадийного выделения концентратов с использованием более совершенных магнитных сепараторов, доводочных операций (тонкое грохочение, магнитно-гравитационная классификация, сепарация в бегущем поле, обратная катионная флотация и др.). Доводочные операции позволяют повысить массовую долю железа в концентратах до 67,5-71,8% и понизить содержание в них кремнезема до 0,5% и менее.

В России магнитное обогащение неизменно остается технологической основой использования руд черных металлов [4]. Одно только месторождение Курской магнитной аномалии (КМА) имеет запасы железистых кварцитов, примерно в 3 раза превышающие мировые (около 3 трлн. т.) и самые большие в мире запасы магнетитовых руд - свыше 22 млрд. т. Здесь работают четыре горно-обогатительных комбината: Лебединский, Стойленский, Михайловский и Белгородский, Яковлевский рудник, и объединение КМАруда, которые производят более 30 млн т/год концентратов с качеством от 65% (МГОК) до 69% (ЛГОК) [2]. В связи с этим, нами про-

водились исследования по решению этой проблемы именно магнитными методами.

Результаты исследований и их обсуждение. Новым направлением совершенствования технологии обогащения магнетитовых кварцитов с получением высококачественных концентратов является применение сепараторов с бегущим магнитным полем. 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%) [3]. В стандартной схеме Лебединского ГОКа после первой стадии магнитной сепарации, получают хвосты с содержанием железа общего 10,08% и магнитный продукт крупностью 46% класса -0,045мм, с содержанием железа общего 58,4% и с объемным содержанием раскрытых рудных зерен 57,6%.

Промышленные испытания сепарации этого продукта на разработанных в НТЦ МГГУ высоко-селективных магнитных сепараторов типа ВСП БМ-32,5/25 с вращающейся магнитной системой и сепаратора типа ВСПМ-90/50, защищенного патентом РФ №236421, показали возможность получения высококачественных концентратов для бездоменной металлургии стали с общим содержанием $Fe_{\text{общ}}$ не менее 68% при его выходе около 15-20% от исходного. Внедрение предлагаемой нами новой техники и технологии в проект строящихся ГОКов позволит уменьшить фронт измельчения и обогащения не менее чем на 15-25%, уменьшая процессы переизмельчения и ошламования магнетита с потерями его в отвальных хвостах и устойчиво получать высококачественные концентраты для бездоменной металлургии стали, что позволит уменьшить эксплуатационные и капитальные затраты более чем на 30% и станет мощным технологическим резервом отрасли [3].

С этой же целью предлагаемую для ГОКа будущего технологию, даже без доизмельчения концентратов, можно дополнить магнитогравитационной (в «бочках Зеленова»), которые успешно работают на Оленегорском ГОКе [4].

В докладе также изложены результаты наших новых оригинальных исследований о использовании магнитных полей с высокими градиентами во времени и пространстве для повышения качества товарных магнетитовых концентратов до уровня, требований бездоменной металлургии. Для этой цели было необходимо создать новые высокоселективные сепараторы, позволяющие отделять чистые зерна минералов от их сростков и мелких зерен пустой породы. Вариантом решения поставленной задачи является применение для этой цели высокоградиентной магнитной сепарации в слабом поле, что успешно испытано А.М. Туркеничем и его сотрудниками на рудах Ингулецкого и Полтавского ГОКов. [2].

На самом деле этот процесс начали использовать гораздо раньше - в процессах магнитного анализа магнетитовых кварцитов на трубке Дэвиса (рис. 2.) удается получать высококачественные магнетитовые концентраты.

ты до 68% $Fe_{\text{общ}}$ при выходе до 40% (рис. 3). Это связано с высокими градиентами конических полюсных наконечников по обе стороны трубки и хорошей гидромеханической отмывкой этих концентратов. Именно этим процессом и воспользовался А.М. Туркенич в своих экспериментах.

При применении слабого магнитного поля с напряженностью до 300 э (уровень максимальной магнитной восприимчивости магнетита) и высоко-градиентной осадительной системы в рабочей зоне флокулируют только магнетитовые зерна, а для полной флокуляции не хватает напряженности магнитного поля, и сростки остаются в относительно свободном взвешенном состоянии. Однако в точках высоких градиентов осадительных полюсов, таких как магнитная стальная вата (объемная стальная сетка) создается магнитная сила, достаточная для удерживания магнетита. Учитывая то, что размеры проволочек стальной сетки сравнимы с размерами обогащаемого материала, а приконтактные зоны с высоким градиентом магнитного поля в этой сетке имеют размеры на 10-15мкм меньше среднего размера частиц и, в соответствии со стерическим фактором, закрепляться на них в точках максимальных градиентов могут только чистые магнетитовые зерна, вытесняя сростки.



Рис. 1. Магнитный анализатор - «трубка Дэвиса»

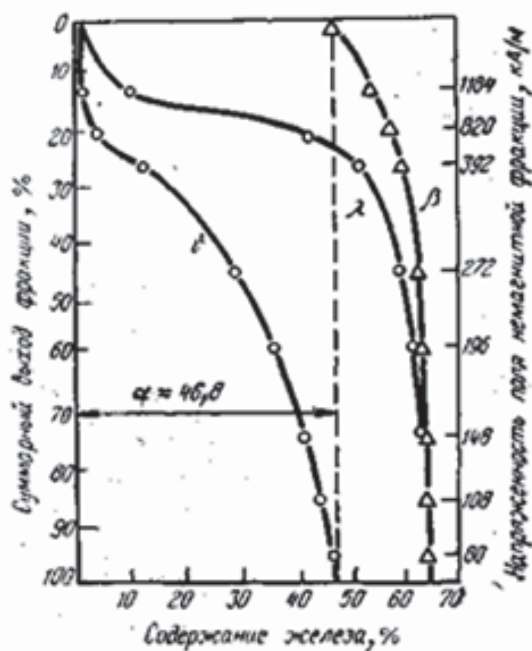


Рис. 2. Кривые обогатимости магнетитовых кварцитов на магнитном анализаторе

Нами предлагается совершенно новый процесс – высокоградиентная сепарация в слабом переменном магнитном поле. 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 $\Delta E_m = A$ (работа сепарации), то средняя магнитная сила, действующая в рабочем пространстве по направлению к полюсу (по оси $N-S$),

$$F_M = -\partial E_M / \partial x \approx -\Delta E_M / \partial x; \quad F_M \approx 0,5 J^2 N S, \quad (1)$$

где S - площадь полюсной поверхности, ортогональной силовым линиям.

Учитывая, что последняя зависит от «микрорадиуса» элементов поверхности, можно с некоторыми дополнительными оговорками (для случая $N \approx \text{const}$; $J/V = \text{const}$) 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,

$$S = V 4\pi r^2 / (2r)^3 = \pi V / 2r; \quad F_M = J^2 N V / 16r \approx C_c / r, \quad (2)$$

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. Возвращаясь к формуле (2) легко заметить, что внутреннее поле материала полюса зависит от C_c , а внешнее определяется величиной $1/r$.

Из этого следует, что при низком уровне напряженности поля возбуждения и высоком градиенте можно достичь уровня пондеромоторных сил, достаточных для извлечения тонкоизмельченных сильномагнитных минералов, начиная с зерен магнетита. При таком соотношении компонентов магнитной силы засорение магнетитового концентрата будет значительно ниже, чем при обычной сепарации

Возвращаясь к формуле (2) легко заметить, что внутреннее поле материала полюса зависит от C_c , а внешнее определяется величиной $1/r$, которая не зависит от уровня поля возбуждения и магнитных свойств извлекаемых частиц.

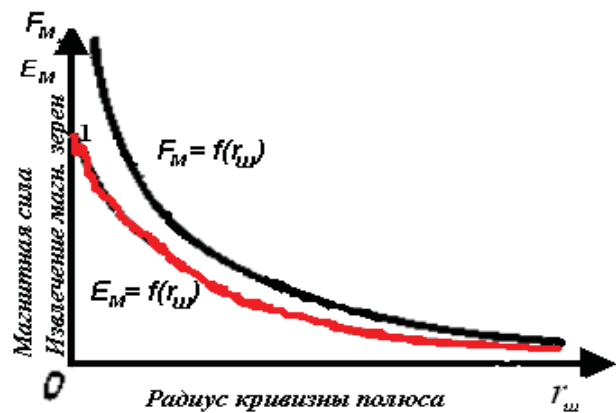


Рис. 3. Зависимость магнитной силы и извлечения от радиуса кривизны поверхности, образующей полюс магнита

Теоретически и экспериментально установлено [6], что в процессах сепарации используются в основном две из известных магнитных сил: адгезионная (ближнего действия – потокосцепления) и градиентная (пондеромоторная сила дальнего действия). Первая вызывает флокуляцию магнитных частиц (образование агрегатов – флокулов за счет энергии свободных полюсов), а вторая их сепарацию от немагнитных [4].

Первая сила – $F_{n.c.} = B^2 S / 2\mu_0$ не селективна, существует даже в слабых полях, но только при контакте между магнитными частицами, причем прочно удерживает механически захваченные немагнитные частицы.

Вторая сила – $F_{sp.} = G\chi H \text{grad}H$ селективна, действует на достаточно большом расстоянии от осадительной поверхности (\square 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_0 – магнитная постоянная.

Из этого следует, что при низком уровне напряженности поля возбуждения и высоком градиенте можно достичь уровня пондеромоторных сил, достаточных для извлечения тонкоизмельченных сильномагнитных минералов, начиная с магнетита. При таком соотношении компонентов магнитной силы засорение магнетитового концентрата будет значительно ниже, чем при обычной сепарации. В конечном счете понижение напряженности поля (поля возбуждения) снижает силы, вызывающие магнитную флокуляцию, что повышает качество магнитной фракции на полюсных элементах высокоградиентной среды (матрицы).

Предложенная нами замена постоянного магнитного поля переменным создаёт его градиент не только в пространстве, но и во времени, что существенно повышает эффективность этого выталкивания более бедных сростков из зоны захвата. Упругие свойства стальной ваты или шаров позволяют им сжиматься и расправляться в затопленном слое пульпы при изменении направления магнитного поля. Такая пульсация вызывает отмывку флокулов гидромеханическими силами (вибромеханическая сепарация).

Условием начала сближения частиц в квазистатических условиях должно быть преобладание иницирующих магнитных сил F_M над препятствующими гидромеханическими F_{TM} и электрическими силами $F_{ЭЛ}$ отталкивания за счет двойного электрического слоя, возникающего при окислительно-восстановительных реакциях с водой и ее солями, а также хемосорбцией различных реагентов, т. е.

$$F_M(\bar{r}) \geq F_{TM}(\bar{r}) + f_{ЭЛ}(\bar{r})$$

Так как сила $f_{ЭЛ}(\bar{r})$ действует только на расстоянии молекулярного порядка, F_H растет обратно пропорционально квадрату расстояния между частицами, а F_{TM} зависит от скорости суспензии, т. е. практически не

зависит от координат, то гидромеханические силы препятствуют элементарному акту флокуляции (двух частиц), главным образом в начальный период.

Так как основные параметры процесса флокуляции и свойства образованных флокул определяют весь ход процесса сепарации в рабочих пространствах сепараторов и его результаты, то представляется необходимым установить между ними связь

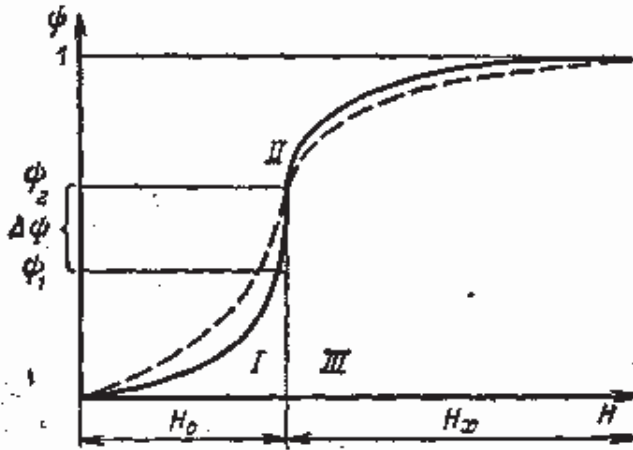


Рис. 4. Зависимость степени флокуляции частиц минерала-ферромагнетика от напряженности поля (сплошная линия — быстрое намагничивание, пунктирная — медленное).

Флокуляция является необратимым переходным процессом, который в режиме лавинного флокулообразования является неравновесным. Наиболее действенным инструментом изучения динамики и кинетики процесса флокуляции остается параметрический анализ на основе экспериментальных и теоретических исследований [5].

Зависимость степени флокуляции суспензии ψ от напряженности намагничивающего поля H_e изучалась экспериментально с использованием различных методик (рис. 4).

Степень флокуляции обычно определяют как отношение сфлокулированных частиц к общему содержанию твердого в суспензии

$$\psi = 100 \gamma_f / \gamma_{\text{общ}}$$

так как $\gamma + \gamma_f = 1$.

На участке I, который соответствует равновесной части процесса, степень флокуляции пропорциональна F_M . В этой зоне $F_M \leq F_{GM}$, что обуславливает равновесный характер процесса. Так как F_M пропорциональна H^2 , то $\Psi_1 = kH^2$.

При $H_{кр}$ (участок II) за счет того, что F_M становится больше F_{GM} , устойчивость суспензии теряется и происходит свертывание инфлюэнтных объемов суспензии вокруг центров кристаллизации. Однако после резкого увеличения Ψ на величину $\Delta\Psi$ процесс флокулообразования снова замедляется. Это вызвано значительным снижением концентрации ферромагнитной фазы в пульпе, что увеличивает расстояние между частицами ($R > R_{кр}$). После этого этапа в пульпе остаются флокулы, размер которых соответствует объему ферромагнитной фазы в инфлюэнтной зоне, и несфлокулированные частицы ферромагнитной фазы, оказавшиеся за пределами инфлюэнтных зон «сработавших» центров флокуляции. В процессе

магнитной сепарации образовавшиеся флокулы притягиваются к барабану или оседают в процессе флокуляции, но так или иначе уходят из суспензии.

В суспензии остаются только несфлокулировавшиеся частицы, концентрация которых настолько мала, что флокуляция при $H = const$ практически приостанавливается, т. е. $d\psi / dt = 0$.

Обобщая изложенное, можно представить зависимость в виде ступенчатой, кусочно-гладкой функции

$$\psi = k_1 H_0^2 + \Delta\psi_{\text{лав}} + (1 - \psi_2) \left\{ 1 - \exp[-k_2(H_x - H_{\text{кр}})] \right\} \quad (1)$$

где k_1, k_2 - коэффициенты, зависящие от концентрации флокул в пульпе, удельной магнитной восприимчивости, числа Рейнольдса; H_0 - начальная напряженность магнитного поля, вызывающая равновесную флокуляцию; $\Delta\psi_{\text{лав}}$ - прирост степени флокуляции при лавинной флокуляции; ψ_2 - степень флокуляции к моменту прекращения лавинного флокулообразования [$\psi_2 = f(C, N, d, \chi)$]; H_x - напряжённость поля, позволяющая завершить процесс флокуляции а ($H_x > H_{\text{кр}}$); $H_{\text{кр}}$ - критическая напряженность поля, вызывающая лавинную флокуляцию.

С точки зрения кинетики, процесс флокуляции в равновесной части (при $H_e > H_{\text{кр}}$) подчиняется, как было показано выше, закону действующих масс:

$$\psi = (1 - \psi_2)(1 - e^{-kt}),$$

где $k \approx H_e^2$ — коэффициент скорости процесса флокуляции.

График $\psi = f(H)$ можно описать с помощью следующего уравнения

$$\psi = k_1 H_0^2 + \Delta\psi \int_0^H \delta(H - H_{\text{кр}}) dH + (1 - \psi_2) \left\{ 1 - \exp[-k_2(H_x - H_{\text{кр}})] \right\} \quad (2)$$

где ψ_1 и ψ_2 — степень флокуляции соответственно в начале и в конце лавинного процесса; $\delta(H - H_{\text{кр}})$ - функция Дирака от напряженности

$$\int_{H_{\text{кр}} - \Delta}^{H_{\text{кр}} + \Delta} \delta(H - H_{\text{кр}}) dH = 1$$

Здесь Δ - малое число.

Таким образом, при $H_e > H_{\text{кр}}$ процесс флокуляции может завершиться и без дальнейшего повышения напряженности, но время, необходимое для этого, тем меньше, чем больше H_e .

Основное уравнение динамики разделения минералов для предложенного нами процесса повышения качества концентрата высокоградирентной сепарации можно записать так:

$$F_{зр} + F_{пс} - A_{магн.} + G - F_{эдс} - F_{зм} - F_c = 0, \quad (3)$$

где $F_{зр}$ - сила, обусловленная градиентом магнитного поля,

$F_{п.с.} = B^2 S / 2\mu_0$ - сила потокосцепления,

$A_{магн.}$ - магнитная сила Архимеда

G - сила тяжести,

$F_{эдс}$ - электродинамическая сила;

$F_{зм} =$ - гидромеханическая сила;

$F_c = ES h/l$ сила сжатия проволоочной матрицы

Напряженность поля магнитной системы недостаточна для полной флокуляции пульпы, и некоторые частицы магнетита находятся в ней в свободном состоянии. Зона захвата сростков ($K_\beta < 1$) и вероятность их захвата ниже, чем у зерен магнетита, где $K_\beta = 1$, однако после закрепления сростки покрываются слоем чистых магнетитовых зерен, которые при высокоградиентной сепарации их прочно удерживают. Снижение напряженности поля и вибрации при переменном магнитном поле делают магнетитовый осажденный слой подвижным и слабомагнитные сростки выталкиваются из него магнитными силами Архимеда (см. ф-лу 1):

$$A_{магн.} = (\chi_{магн.} - \chi_{ср.}) m \cdot H \cdot \text{grad}H, \quad (4)$$

где: $\chi_{магн.}$ и $\chi_{ср.}$ - удельные магнитные восприимчивости магнетита и сростков, m - масса зерна.

Кроме этого, воздействие силы, вызывающей упругие деформации и магнитной силы разнесены по фазе на, что позволяет встряхивать материал, накопившийся в узлах решетки. «Дрожание» матрицы, кроме этого, способствует лучшему прохождению пульпы и препятствует накоплению немагнитных отложений. Удерживающую силу - $F_{yд}$ можно рассчитать по формуле:

$$F_{yд} = \pi d^2 / 4 \cdot V \cdot \chi \cdot H \cdot \text{grad}H \cdot \sin(\omega t) - A_{магн.} - F_{зм}, \quad (5)$$

где: d , ρ , χ - размер, плотность и удельная магнитная восприимчивость частицы магнетита, ω , t - угловая частота магнитного поля и время, $F_{зм}$ - сила гидромеханических и деформационных пульсаций осадительной поверхности, выталкивающая из слоя сростки магнетита с кварцем. Суть процесса состоит в том, что сростки, контактирующие с металлом полюса магнетитовой частью и удерживаемые большими силами потокосцепления переворачиваются при изменении направления поля и, контактируя кварцевой стороной, удерживаются только пондеромоторной силой дальнего действия, которая значительно меньше, что ведет к их отрыву в хвосты и повышению качества концентрата.

Переменное магнитное поле вызывает гармонические колебания или «дрожание» частиц магнетита по закону:

$$v = \frac{h}{t} \cos \omega t, \quad (6)$$

а само движение может быть описано уравнением:

$$(m' + m) \frac{dv_r}{dt} = m_0 \Delta g + m_0 \Delta \frac{h}{t^2} \sin \omega t + F(v_r), \quad (7)$$

где m – масса частицы; m' – присоединенная масса, возникающая при ускоренном движении частиц относительно слоя в зоне высокого градиента; m_0 – масса слоя в объеме проходящей через него частицы (для частиц, размер которых существенно больше размера частиц слоя, а для частиц равновеликих по объему частицам слоя, за m_0 следует принимать массу частиц, составляющих слой); $\Delta = (\rho_m - \rho_n) / \rho_n$; ρ_m, ρ_n – соответственно плотность основной частицы и постели; v_r – скорость частицы относительно слоя; h – размах колебаний слоя; $F(v_r)$ – сила сопротивления постели, зависящая в общем случае от относительной скорости частиц: положительная при движении частицы к полюсу и от полюса.

Все процессы обогащения мелких классов, как правило, имеют стохастическую природу. В её основе лежат как детерминированные, так и вероятностные (случайные) физические явления. Случайные воздействия на частицу минерала, взвешенную в турбулизованной вязкой среде, обусловлены разрушением турбулентных пульсаций (ТП) в окрестности частицы. ТП являются основным элементом турбулентной диффузии, в которой броуновское движение совершают не молекулы, как в молекулярной диффузии, а вихри или «вихревые пакеты», участвующие в процессе массопереноса. Участие в сепарационном массопереносе порций частиц в «вихревых пакетах», вместо отдельных зерен, безусловно, ухудшает результаты сепарации. В силу вязкостных свойств среды, время разрушения ТП намного меньше времени релаксации, возникающего при этом в системе «среда + частица» возмущения. Таким образом, временные (лагранжевы) корреляции координат случайных силовых воздействий очень малы во временных интервалах, характерных для гидромеханических процессов, а сами случайные воздействия можно рассматривать в качестве стационарного случайного процесса типа "белого шума" [6]. Траектория такой частицы динамической системы с "белым шумом" удовлетворяет системе стохастических дифференциальных уравнений движения - уравнений Ланжевена.

$$d\bar{x}/dt = \bar{f}(t, \bar{x}) + \bar{m}(t, \bar{x}) \cdot \bar{\xi}(t) \quad (8)$$

где $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_{2n})$ - совокупность координат $2n$ -мерного фазового пространства; $\bar{f} = (f_1, f_2, \dots, f_{2n})$, $\bar{\xi} = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{2n})$ - совокупность детерминированных, а взаимно независимых случайных воздействий на "частицу" системы; \bar{m} – матрица нормирующих случайные воздействия коэффициентов.

Решение уравнения Ланжевена (7) при соответствующих начальных условиях $[x(0) = x_0]$, $[x = x(t)]$ описывает так называемый марковский случайный процесс, который однозначным образом задается условной

двумерной плотностью вероятности $W = W(t, \bar{x}, t_0, \bar{x}_0)$, $t = t_0 + \tau$ перехода за время τ "частицы" из точки (t_0, x_0) в точку (t, x) обобщенного фазового пространства и одномерной плотностью вероятности начального состояния $W_0 = W(t_0, \bar{x}_0)$.

Если начальное состояние детерминировано, то марковский случайный процесс однозначно характеризуется одномерной плотностью вероятности конечного состояния:

$$W(\tau, \bar{x}) = \int_0^\infty dt_0 \cdot \int V_{x_0}^- \cdot W(t_0 + \tau, \bar{x}, t_0, \bar{x}_0) \cdot \delta(\bar{x}_0 - \bar{x}_{0s}) \cdot \delta(t_0 - t_{0s}) \cdot dV_{x_0}^- \quad (8)$$

где $V_{x_0}^-$ и $dV_{x_0}^-$ - пространство начальных состояний и его элементарный объем;

точка (t_{0s}, x_{0s}) - фиксированная точка начального состояния системы $\delta(\bar{x}_0 - \bar{x}_{0s}) \cdot \delta(t_0 - t_{0s})$ - δ -функции Дирака.

В свою очередь, условная (переходная) плотность вероятности (8) удовлетворяет [7] как функция параметров конечного состояния в координатах (t, x) 2-му уравнению Колмогорова:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left[-aW + \frac{b}{2} \cdot \frac{\partial W}{\partial x} \right] \quad (9)$$

Если предположить, что случайное воздействие $\zeta(t)$, вызванное стесненностью движения частиц, есть δ -коррелированная функция времени с нулевым средним значением, то описываемое случайное радиальное блуждание частицы может быть охарактеризовано одномерной плотностью вероятности $W(t, r)$ [6] и истолковано как концентрация частиц C в момент t в сечении r . Определение ее, как уже отмечалось, возможно решением уравнения Колмогорова-Фоккера-Планка:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = B\nabla^2 C - A\nabla C \quad (10)$$

Хорошим решением уравнения Эйнштейна-Фоккера-Планка описывающим кинетику сепарационного процесса, является формула Ерофеева-Колмогорова [7]:

$$\varepsilon = 1 - e^{-kt^n} \quad (11)$$

где n - коэффициент, учитывающий вязкость слоя, форму частиц, их магнитную флокуляцию, коэффициенты трения частиц и другие неучтенные параметры.

Отношение площади зоны захвата полюсных элементов матриц (магнитоаттрактивного пространства), в котором захват магнитных зерен происходит со 100%-ной вероятностью, к общей площади порового канала в

магнитоадгезионной среде (например, в слое шаров), является по существу вероятностью P захвата магнитного зерна в одном цикле [5,7]:

$$P_3 = S_{\text{захв.}}/S_{\text{общ.}} \quad (12)$$

Эта вероятность относится к зернам с максимальными магнитными свойствами, определяемыми содержанием ферромагнитного минерала, т. е. зернами чистого минерала (магнетита, гематита, вольфрамита и т. п.). Для сростков с пустой породой: кварц, граниты, глина и др. зона захвата уменьшается соответственно снижению содержания ферромагнитных минералов в них:

$$P_3 = K_\beta \cdot S_{\text{захв.}}/S_{\text{общ.}}, \quad (13)$$

где $K_\beta = \beta_{\text{ср.}}/\beta_{\text{фер.мин.}}$, а для магнетита $K_\beta = 1$.

Вероятность не захвата или «проскока» того же зерна при этом равна $P_{\text{пр.}} = (1 - K_\beta P_3)$, а для n слоев согласно правилу перемножения вероятностей суммарная вероятность последовательных частных равна динамических сил $(1 - P_3)^n$.

Произведение такой вероятности на массу исходной навески q сепарируемого материала является ожидаемым извлечением магнитной фракции, которое можно определить на основе приведенных выше соображений

$$\varepsilon = q[1 - (1 - K_\beta P_3)^n]. \quad (14)$$

Зависимость вероятности извлечения от времени сепарации и числа слоев шаров можно определить из формул (12) и (13).

В соответствии с изложенным выше

$$\varepsilon = 1 - (1 - K_\beta P_3)^n, \quad (15)$$

а с другой стороны по формуле кинетики сепарации: $\varepsilon = 1 - \exp(-kt)$;

$$(1 - K_\beta P_3)^n = 1 - \exp(-kt); \quad (16)$$

$$K_\beta P_3 = \exp(-kt/n)$$

При $t \rightarrow 0$, $P_3 \rightarrow 0$, а увеличение времени пребывания зерна в рабочей зоне (уменьшение скорости пульпы) повышает вероятность его извлечения. Для каждой зоны захвата (отдельного слоя) вероятность извлечения зависит только от коэффициента сепарации и времени. В предельном случае удерживания магнетитовой частицы на осадительной поверхности определяется силой потокосцепления, но площадь контакта проволоочки с частицей близка к нулю, поэтому эту силу – $F_{y\partial}$ можно рассчитать по формуле

$$F_{y\partial} = F_{y\partial} = \pi d^2 / 4 \rho \chi \text{HgradH} \sin \omega t F_{z\text{мн}}, \quad (17)$$

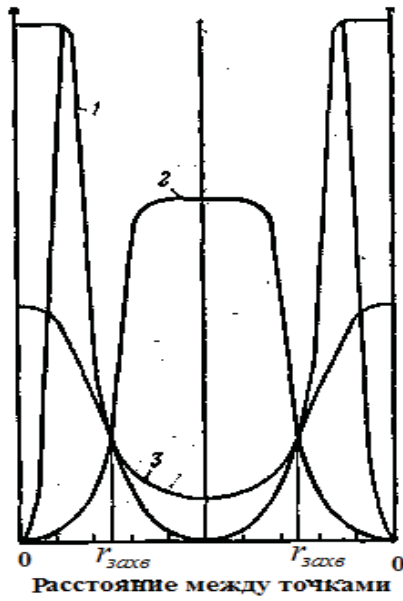


Рис. 5. Эпюры магнитных F_m (1), гидро-механических $F_{z\text{м}}$ (2) сил и напряженности поля H (3) в поровом канале.

где: d , ρ , χ – размер, плотность и удельная магнитная восприимчивость частицы магнетита, ω , t – угловая частота магнитного поля и время, $F_{гмп}$ – сила гидр омеханических и деформационных пульсаций осадительной поверхности, выталкивающая из слоя сростки магнетита с кварцем.

На основе изучения рассмотренной выше модели процесса высокоградиентной мокрой сепарации в слабом переменном магнитном поле (на основе уравнение диффузии в силовом поле с учетом магнитных вибраций) нами были рассчитаны основные параметры процесса высокоградиентной сепарации, которые проверялись в лабораторных условиях [8].

Лабораторные исследования выполнялись на установке, показанной на рис. 6.

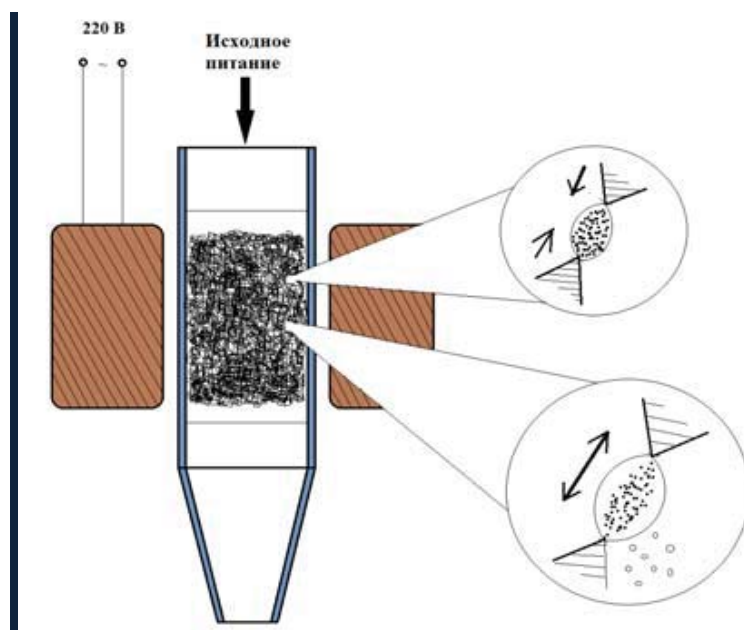


Рис. 6. Устройство стендовой установки и принцип работы упруго-деформируемых селективных осадительных матриц в переменном магнитном поле.

Лабораторная установка состоит из кассеты с металлической проволокой, помещенной внутри соленоида, подключенного к источнику переменного тока. Напряженность магнитного поля в рабочем пространстве регулируется напряжением, подаваемым от внешнего источника в пределах от 0 до 40 кА/м. Исходный материал подается сверху в рабочую матрицу, промпродукт сливается самотеком, а концентрат накапливается в рабочей матрице и периодически разгружается после отключения электропитания.

В качестве исходного продукта был взят товарный концентрат Михайловского ГОКА с содержанием Fe 65,1%. В результате обогащения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты высокоградиентной сепарации концентрата Михайловского ГОКА в слабом переменном магнитном поле.

Продукт	Выход, %	Содержание, %	Извлечение, %
---------	----------	---------------	---------------

Концентрат Михайловского ГОКА	100	65.1	100
Полученный концентрат	28.44	68,1	29.24
Промпродукт	71.56	57.8	70.76

Применение данного метода в сочетании с тонким грохочением или магнитно-гравитационной концентрацией позволяет получать концентраты с качеством, пригодными для использования в бездоменной металлургии не используя флотацию, что повышает экологическую безопасность, значительно сокращает затраты и соответственно повышает эффективность производства.

Список литературы:

1. Железородная база России / под ред. Орлова В.П., Веригина М.И., Голивкина Н.И. –М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998. –842 с. –ISBN 5–900357–07–4.
2. Остапенко П. Е. Обогащение железных руд. -М., Недра, 1985.
3. В.В. Кармазин Совершенствование технологии обогащения магнетитовых кварцитов на основе сепараторов с бегущим магнитным полем // Горный журнал. –2006. -№6.
4. В.В. Кармазин, В.И. Кармазин. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных. Том I, Москва, Издательство МГГУ. 2005 г.
5. Плаксин И.Н., Кармазин В.И., Олофинский Н.Ф., Норкин В.В., Кармазин В.В. Новые направления глубокого обогащения тонковкрапленных железных руд. -М., Наука, 1964.
6. Кармазин В.В., Пилов П.И. Принципы сепарационного массопереноса в турбулентных потоках пульпы, содержащих полидисперсные и гетерогенную твердую фазу. -М. МГГУ ГИАБ №4, 2001 г.
7. В.М. Авдохин, С.Л. Губин Современное состояние и основные направления развития процессов глубокого обогащения железных руд. М. Горный журнал, -№3, 2007 г.
8. Отчеты НТЦ МГГУ о выполнении работ по хоздоговорам с ОАО ЛГОК, ОАО МГОК и ОАО Рудгормаш (темы ОПИ: 101, 104, 111, 228, 239, 248, 363) Москва-Губкин 2004-2007 гг.

УДК 622.272

ФЕДОРЕНКО П.Й., д-р техн., наук. ТИЩЕНКО С.В., д-р техн. наук,
 ГАПОНЕНКО И.А., аспирант
 ГВУЗ «Криворожский национальный университет»