

Purpose. Analysis of the information resource database of mathematical modeling of the set parameters of equilibrium systems with a set of local transformations of complicated transport of mass and energy in the high-gradient wet magnetic separation of weakly magnetic intermediate products and slimes beneficiation of manganese ore from the waste tailings pond.

Methodology. Synthesis and critical analysis of the information resource of data on theoretical and experimental developments in the field of enrichment of the weakly magnetic intermediate products of manganese oxide ores and sludges by high-gradient wet magnetic separation.

Findings. We obtained results of the analysis of the information resource of data on regularities of the phenomena, processes and technological parameters of the kinetics of the MS middlings and slimes beneficiation of manganese ore.

Originality. Analyzed source of information about the patterns of data in the system of differential equations of the kinetics of weakly magnetic products MS enrichment

of manganese oxide ore and tailings pond sludge waste by the MS.

Practicality value. The data obtained are of great practical importance for sovershentvovaniya through technological scheme and enrichment processes of the original manganese ore by conventional techniques and the sludge of waste sludge tanks by the MS, to produce manganese concentrates class size 10–1 mm and 1–0 mm.

Key words: high-gradient magnetic separation, manganese ore, sludge, mathematical model, kinetics of the separation process, magnetic field, flow resistance, inertial forces, system of differential equations, weakly magnetic particles.

Рекомендована к публикации
д. т. н. М. И. Гасиком

Поступила 26.12.2016



УДК 669.213.3:669.15-198

С. П. Шуваев

М. И. Гасик /д. т. н./

**П. И. Пилов /д. т. н./, Ю. С. Мостыка /д. т. н./,
В. Ю. Шутов, Л. З. Гребенюк /к. т. н./**

Производство

ПАО «Орджоникидзевский ГОК»,
г. Покров, Украина

Национальная металлургическая академия
Украины, г. Днепро, Украина
e-mail: tehnosplavy@ua.fm

ГВУЗ «Национальный горный университет»,
г. Днепро, Украина
e-mail: mineraltech@mail.ru

Комплексное обогащение марганцевых продуктов со стадией высокоинтенсивной магнитной сепарации и определение магнитных свойств марганцевых концентратов и агломерата

S. P. Shuvaev

M. I. Gasik /Dr. Sci. (Tech.)/

P. I. Pilov /Dr. Sci. (Tech.)/,

Yu. S. Mostika /Dr. Sci. (Tech.)/,

**V. Yu. Shutov,
L. Z. Grebenyuk /Cand. Sci. (Tech.)/**

PJSC «OGOK», Pokrov, Ukraine

National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine

e-mail: tehnosplavy@ua.fm

National Mining University, Dnipro, Ukraine

e-mail: mineraltech@mail.ru

Integrated enrichment of manganese products ore with high-intensity magnetic separation stage and the determination of the magnetic properties of manganese concentrate and agglomerate

Цель. Анализ технологических схем и оборудования для обогащения марганцевых продуктов и определение магнитных свойств марганцевых концентратов и агломерата.

© С. П. Шуваев, М. И. Гасик /д. т. н./, П. И. Пилов /д. т. н./, Ю. С. Мостыка /д. т. н./, В. Ю. Шутов, Л. З. Гребенюк /к. т. н./, 2017 г.

Методика. Анализ литературных данных и проведение собственных опытно-промышленных испытаний магнитных сепараторов и экспериментальных исследований магнитных свойств марганцевых продуктов.

Результаты. Выполнен анализ схем обогащения марганцевых руд и шламов и применяемых типов магнитных сепараторов, а также определены магнитные свойства марганцевых концентратов и агломерата.

Научная новизна. Разработана технология высокоинтенсивной магнитной сепарации марганцевых шламов с применением магнитных сепараторов с высоким уровнем напряженности магнитного поля, позволяющая получать концентраты с содержанием марганца не менее 36–42 %. Разработана методика определения магнитных свойств марганцевых продуктов методом малого образца.

Практическая значимость. Полученные в работе результаты экспериментального исследования магнитных свойств марганцевых концентратов и агломерата позволяют определять технологические параметры процесса магнитной сепарации и конструктивные параметры высокоинтенсивных магнитных сепараторов при переработке марганцевых руд и шламов. (Ил. 2. Табл. 5. Библиогр.: 14 назв.)

Ключевые слова: марганцевая руда, схема обогащения, высокоградиентная магнитная сепарация, шламы, магнитный сепаратор, магнитная восприимчивость.

Постановка проблемы. В работе [1] была обоснована научно-технологическая направленность и актуальность проводимых теоретических разработок и опытно-промышленных исследований по обогащению методом мокрой высокоградиентной магнитной сепарации промпродуктов (песков, шламов) обогащения сырой руды и шламов отработанных шламонакопителей.

В начале статьи была представлена и проанализирована принципиальная аппаратно-технологическая схема обогащения марганцевой оксидной руды и шламов Чкаловской обогатительной фабрики. Поступающая руда со средним содержанием 23,47 % Mn подвергается дроблению, промывке, грохочению, отсадке. Промпродукты (пески, шламы) обогащаются методом высокоградиентной магнитной сепарации. Товарными концентратами являются 1-й сорт (43,7 % Mn) и 2-й сорт (37,0 % Mn), химсостав которого формируется с учетом поступления концентрата магнитной сепарации.

Следует отметить высокое содержание марганца в отвальных шламах (до 12 %), количество которых составляет порядка 50 % от исходной марганцевой руды, подаваемой на обогащение. В связи с этим решение задачи дальнейшего развития теоретических предпосылок совершенствования технологии обогащения марганцевой руды и снижение потерь марганца с отвальными шламами является весьма актуальным.

Теория процессов добычи и обогащения марганцевых руд – это фундаментальная наука, которая не только исповедует новые достижения механики, физики, математического моделирования, но и сама оказывает влияние на развитие электрометаллургической промышленности производства марганцевых ферросплавов, производство чугуна и стали в черной металлургии, а также смежных процессов в химической промышленности.

В числе других актуальной задачей является сравнительный анализ ресурса теоретических и экспериментальных данных о магнитных свойствах стехиометрических кислородных соединений марганца (оксидов, по химсоставу адекватных рудным марганцевым минералам) и удельной магнитной восприимчивости рудных минералов (пирролюзита, псиломелана, браунита и др.).

Необходимость постановки экспериментальных исследований по определению магнитной восприимчивости марганцевых минералов, концентратов, обусловлена тем, что добываемые в семи карьерах Орджоникидзевского ГОК марганцевые руды могут существенно различаться по химическому, минералогическому, гранулометрическому составам, и не только потому, что они добываются в различных карьерах или даже отдельных их участках. Эти различия характерны даже по высоте и протяженности рудного пласта марганцевой руды.

Как будет приведено далее, удельная магнитная восприимчивость рудного минерала пирролюзита равна $38 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, а псиломелана $(80-120) \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ [3]. В рудном пласте может содержаться до 20–30 % рудного вещества, так называемого мангангеля. Кроме достаточно изученных пирролюзита и браунита, в последующие периоды времени достоверно определены криптомелан $\text{K}_{<2}(\text{Mn}^{4+}, \text{Mn}^{2+})_8\text{O}_6$, тодорокит $\text{Ca}(\text{Mn}^{4+}, \text{Mn}^{2+})_8\text{O}_6$, бернессит $(\text{Na}, \text{K}, \text{Ca})\text{MgMn}_6\text{O}_{14} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ [35, 50, 152] [3].

Карбонатные рудные стяжения представлены изоморфным рядом минералов: кальцит – манганокальцит – кальциевый родохрозит.

Таким образом, существенно изменяющиеся по высоте и простирацию химический и минералогический составы марганцеворудного пласта обуславливают необходимость системного пополнения банка экспериментальных данных

о физических (магнитных), электрических свойствах и структурах марганцевых минералов и получаемых продуктов обогащения руд и шламов, отработанных в ретроспективе шлакоаккумуляторов, богатых по содержанию марганца.

Результаты экспериментов по определению свойств рудных марганцевых минералов, равно как и концентратов шламов, позволяют проводить корректировку прогностических расчетов полезного извлечения марганца вследствие совершенствования технологии и оборудования для магнитного обогащения марганцевых продуктов.

1. Общая характеристика магнитных сепараторов, применяемых при опытно-промышленном магнитном обогащении промпродукта шламов обогащения марганцевой руды и шламов отработанного шламоаккумулятора

На стадии опытно-промышленной отработки параметров малотоннажного обогащения шлама отработанного шламоаккумулятора использовали магнитный сепаратор ПБМ-90/250 со следующими характеристиками: производительность 100–160 т/ч, магнитная индукция в рабочей точке (0,16 Тл), скорость вращения барабана 26 об/мин, диаметр разгрузочных насадок 30–45 мм. На этом сепараторе производилось удаление из пульпы сильномагнитных частиц (металлические предметы, окалина и др.) [4; 5].

Высокоградиентное мокрое магнитное обогащение подрешеточных продуктов грохотов (класс – 1 мм) производилось на магнитном сепараторе ВМС-100/1Т: индукция магнитного поля в воздушном зазоре – 1,0 Тл; скорость вращения ротора – 3 об/мин; минимальное давление циркуляционной воды в замкнутом контуре охлаждения – 3 атм; минимальный нагрев циркуляционной воды охлаждения катушек – 60 °С; намагничивающий ток – 100–300 А; объем циркуляционной воды замкнутого контура охлаждения катушек – 2,0 м³; рабочее давление насоса циркуляционной воды – 7,0 атм; производительность сепаратора – до 100 т/ч.

По действующей технологической схеме обогащения исходной марганцевой руды на стадиях магнитного обогащения промпродуктов (песков) и шламов применяются сепараторы с сильными магнитными полями для магнитной сепарации этих продуктов. Ниже приведена характеристика сепаратора 4ЭВМ-38/250: диаметр

и длина валка 380 и 2500 мм соответственно; напряженность магнитного поля 1350 кА/м; частота вращения валков до 40 об/мин; мощность привода 33 кВт; производительность 16–22 т/ч. Из технологических параметров важными являются: крупность подвергаемого сепарации марганецсодержащего сырья – не более 5 мм; содержание твердого в питании – 70–80 %; расход воды 40–50 м³/ч [6].

Разработаны новые конструкции магнитных сепараторов [7; 9] для переработки марганцевых руд и шламов.

Характеристика магнитного барабанного сепаратора с неодим-железо-бор магнитной системой: индукция магнитного поля – 0,7 Тл; скорость вращения барабанов – до 120 об/мин; максимальная крупность питания – 8 мм; установленная мощность приводов – до 4 кВт; производительность сепаратора – до 20 т/ч.

У магнитного валкового сепаратора следующие характеристики: индукция магнитного поля – 1,8 Тл; скорость вращения валков – до 180 об/мин; максимальная крупность питания – 5 мм; установленная мощность приводов – 10 кВт, тип применяемых постоянных магнитов – NdFeB; производительность сепаратора – до 15 т/ч.

Опытно-промышленные испытания магнитных сепараторов [7; 9] при переработке марганцевых шламов показали следующее. При содержании марганца в исходных продуктах на уровне 8,7–21,5 % получают концентраты с содержанием марганца не менее 36–42 % при извлечении ценного компонента на уровне 95 %.

2. Магнитные свойства кислородных соединений марганца, рудных марганцевых оксидных и гидрооксидных минералов

Важнейшей характеристикой рудных марганцевых минералов, которые при магнитном обогащении слабомагнитных руд, промежуточных продуктов (песков) и шламов извлекаются в полезные товарные марганцевые концентраты, является магнитная восприимчивость оксидных, гидрооксидных и карбонатных минералов. Магнитная восприимчивость χ в статических полях равна отношению намагниченности вещества J к напряженности H намагничивающего поля $\chi = J/H$, величина χ – безразмерная¹.

По существующей классификации магнитных свойств марганцевые рудные минералы, как и стехиометрические кислородные соеди-

¹ Магнитная величина, рассчитанная на 1 кг (или 1 г) вещества, называется удельной ($\chi_{уд} = \chi/\rho$), где ρ – плотность вещества, м³/кг, а магнитная восприимчивость одного моля – молярной (или атомной): $\chi = \chi_{уд} \cdot M$, где M – молекулярная масса вещества с магнитной проницаемостью μ ; магнитная восприимчивость в статических полях (в системе СИ) связана соотношением $\mu = 1 + \chi$.

нения марганца, относятся к группе парамагнетиков². Как известно [9; 10], парамагнетик представляет вещество, намагничивающееся во внешнем магнитном поле, т. е. силовом поле, действующем на движущиеся электрические заряды и на тела, обладающие магнитным моментом (независимо от состояния их движения). Магнитное поле характеризуется вектором магнитной индукции B , измеряемой в теслах ($1 \text{ Тл} = 10000 \text{ Гс}$).

В отсутствии внешнего магнитного поля парамагнетик немагнитен. Под действием внешнего магнитного поля магнитные моменты ориентируются преимущественно по направлению поля. В результате парамагнетик приобретает намагниченность J , пропорциональную напряженности поля H .

Чистый марганец ниже температуры $173 \text{ }^\circ\text{C}$ антиферромагнитен, при более высоких температурах парамагнитен. Магнитная восприимчивость марганца как парамагнетика равна $+9,6 \cdot 10^{-6}$. Молярная магнитная восприимчивость $7,699 \cdot 10^{-3}$ (90,1 К). Магнитная восприимчивость стехиометрического состава кислородных соединений марганца приведена в табл. 1.

Из гидроксидов марганца стехиометрическими являются только $\text{Mn}(\text{OH})_2$, $\text{MnO}(\text{OH})_2$, HMnO_4 . Другие гидроксиды представляют собой гидратированные оксиды марганца переменного состава, близкие по химическим составам соответствующим оксидам.

Известен карбонат MnCO_3 (аналог природного минерала родохрозита). Хотя магнитную восприимчивость в известной нам литературе не обнаружено, вместе с тем надо отметить, что растворимость осажденного MnCO_3 в $100 \text{ г H}_2\text{O}$ составляет $0,0065 \text{ г}$, а в насыщенном CO_2 водном

растворе $0,015 \text{ г}$ в $100 \text{ г H}_2\text{O}$ при $15 \text{ }^\circ\text{C}$. При этом образуются геми-, моно- и дигидраты, которые могут оказывать влияние на магнитную восприимчивость технологической пульпы.

3. Удельная магнитная восприимчивость ($\chi_{\text{уд}}$) рудных минералов марганца

Проведенные в ретроспективе экспериментальные исследования, результаты которых обобщены в известной монографии Я. И. Фомина [5], показали, что рудные минералы марганца (оксидные, гидроксидные, карбонатные) по удельной магнитной восприимчивости относятся к группе парамагнетиков (табл. 2) [6].

Современная магнетохимия парамагнитных частиц основывается на трудах Х. Бете (1929 г.) и Дж. Ван Флека (1933 г.), приведших к созданию теории кристаллического поля и теории поля лигандов [9; 10].

Из числа оксидных минералов, приведенных в табл. 2, следует, что наибольшими величинами удельной магнитной восприимчивости характеризуются браунит (Mn_2O_3) ($\chi_{\text{уд}} = 153 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$) и псиломелан ($\text{mMnO} \cdot \text{MnO}_2 \cdot \text{nH}_2\text{O}$) ($\chi_{\text{уд}} = (80-120) \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$), а среди карбонатных минералов – родохрозит (MnCO_3) ($\chi_{\text{уд}} = 172 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$) и манганокальцит (Mn, CuCO_3) ($\chi_{\text{уд}} = 172 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$).

4. Магнитная восприимчивость воды

Добываемая из недр марганцевая руда из-за относительно низкого содержания марганца подвергается мокрому обогащению практически на всех стадиях сквозной сложной технологии, а именно: промывке, отсадке и высокоградиягентной сепарации (промпродуктов, шламов). Вода входит в составы гидратированных оксидов марганца рудных минералов, а также минералов пустой породы (глины и др.).

Таблица 1

Магнитная восприимчивость стехиометрического состава кислородных химических соединений марганца при 293 К и нормальных условиях

Кислородные соединения марганца	Минералы марганца	Магнитная восприимчивость при 293 К	Магнитные свойства
MnO монооксид	Манганозит	$+4,85 \cdot 10^{-3}$	Парамагнетик, обладает слабомагнитными свойствами
Mn_2O_3 сесвиоксид	Браунит	$+1,41 \cdot 10^{-5}$	Парамагнетик
Mn_3O_4 оксид марганца (II, III)	Гаусманит	$+1,24 \cdot 10^{-5}$	Парамагнетик
MnO_2 диоксид	Пиролюзит	$+2,28 \cdot 10^{-3}$	Парамагнетик

²Термин «парамагнетизм» (как и «магнитное поле») ввел в 1845 г. М. Фарадей, который разделил вещества (кроме ферромагнетиков) на диамагнитные и парамагнитные.

Удельная магнитная восприимчивость основных рудных минералов марганца

Минерал	Формула минерала	Содержание Mn, %	Плотность, г/см ³	Удельная магнитная восприимчивость, $\chi \cdot 10^{-8}$, м ³ /кг
Пирролюзит	MnO ₂	55-63	4,7-5	38
Браунит	Mn ₂ O ₃	60-69	4,7-5	153
Гаусманит	Mn ₃ O ₄	65-72	4,7-9	72
Манганит	Mn ₂ O ₃ ·H ₂ O	50-62	4,2-4,4	62
Вернадит	MnO ₂ ·nH ₂ O	40-45	3-3,2	52
Псиломелан	mMnO·MnO ₂ ·nH ₂ O	35-60	4,4-4,7	80-120
Родохрозит	MnCO ₃	40-45	3,6-3,7	172
Манганокальцит	(Mn, Ca)CO ₃	7-25	3-3,4	172
Олигонит (манганосидерит)	(Mn, Fe)CO ₃	43-32	3,7-3,8	75
Родонит	MnSiO ₃	32-36	3,4-3,8	-
Тефроит	Mn ₂ SiO ₄	-	-	-
Бустамит	(Mn, Ca)SiO ₄	12-20	3-3,2	-

При анализе факторов, влияющих на процессы мокрой высокоградиентной магнитной сепарации промпродуктов обогащения марганцевой руды, шламов в виде пульпы, вода с растворенными рудными и нерудными минералами, хотя и в небольших количествах, может иметь различную магнитную восприимчивость и, вероятно, оказывать влияние на удельную магнитную восприимчивость пульпы.

Сведения о магнитных свойствах воды, в том числе и растворенных в ней минералов (взвесей), в литературных источниках по мокрой высокоинтенсивной сепарации, например шламов отработанных шламонакопителей, ограничены. В общем известно, что вода (оксид водорода) характеризуется следующими свойствами: магнитная восприимчивость при 25 °С - $12,985 \cdot 10^{-6}$; диэлектрическая проницаемость $\epsilon^3 = 78,3$; электрическое сопротивление при 20 °С - $18,9 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Таким образом, вода характеризуется диамагнитными⁴ свойствами. Индуцированный магнитный момент M , приобретенный единицей объема диамагнитного тела, пропорционален напряженности магнитного поля H , т. е. $M = \chi \cdot H$, где χ - коэффициент магнитной восприимчивости.

5. Теоретическая база экспериментального исследования магнитной восприимчивости марганцевых концентратов и агломератов

При помещении образца испытываемого концентрата (агломерата) в магнитное поле на него действует магнитная сила F_m , которая может быть вычислена по формуле [14]:

$$F_m = \mu_0 \alpha V_{обр} H \frac{dH}{dy} \quad (1)$$

где μ_0 - магнитная постоянная, $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; α - объёмная магнитная восприимчивость (безразмерная величина); $V_{обр}$ - объём образца, измеренный либо вычисленный по длине образца $L_{обр}$ и площади поперечного сечения образца $S_{обр}$:

$$V_{обр} = S_{обр} \cdot L_{обр} \quad (2)$$

H - напряженность магнитного поля, А/м; y - координата по нормали к поверхности магнитной системы.

Так как измеряется индукция, то используем формулу для определения напряженности магнитного поля:

$$H = \frac{B}{\mu_0},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Так как измеряется масса, а не объём образца, то записываем формулу магнитной силы через массу образца, а не через объём. Учитывая, что $V = m/\rho$, магнитная сила определится по формуле:

$$F_m = \mu_0 \alpha \frac{m}{\rho} H \frac{dH}{dy} \text{ или с учетом } \alpha / \rho = \chi$$

где ρ - плотность материала образца; χ - удельная магнитная восприимчивость;

После преобразования получаем формулу для определения магнитной силы в виде:

$$F_m = \mu_0 \chi m H \frac{dH}{dy} \quad (3)$$

В формуле (3) известны величины F_m , μ_0 , m , H , $\frac{dH}{dy}$, поэтому формула является уравнением

³Безразмерная величина ϵ , называемая диэлектрической проницаемостью, которая всегда больше единицы и зависит от химсостава и строения диэлектрика [11-13].

⁴Диамagnetизм от греч. dia - приставит, означающая здесь - расхождение (силовых линий).

с одним неизвестным χ , которое можно определить по формуле:

$$\left(\chi = F_m / (\mu_0 m H \frac{dH}{dy}) \right) \quad (4)$$

6. Характеристика представительных проб марганцевых концентратов и агломератов для определения их магнитных свойств

Расчеты прогнозных технологических показателей процесса обогащения слабомагнитных руд, марганцевых промпродуктов и шламов, в том числе и отработанных шламонакопителей, методом мокрой высокоградиентной магнитной сепарации производятся при наличии исходных данных: химического и гранулометрического состава материала, функции распределения частиц по классам крупности, магнитной восприимчивости, взаимосвязи величин удельной магнитной восприимчивости частиц и их химическим и минеральными составами в виде функций:

$$\gamma = f(R_p); \gamma = f(\chi_p); \gamma = f(\chi_p R_p^2); \beta = f(\chi R_p^2),$$

где γ – выход продуктов обогащения; R_p – размер (радиус) частицы; χ_p – удельная магнитная восприимчивость частицы; β – содержание марганца в концентрате.

В аспекте этих задач логичным является постановка экспериментов по определению магнитных свойств концентратов различного химсостава, полученных как гравитационным методом обогащения исходной руды, так и методом высокоградиентной сепарации промпродуктов и шламов, в том числе отработанного шлаконакопителя ПАО «ОГОК» (табл. 3). Марганцевые концентраты состава проб 1, 2 и 3 получены гравитационным способом. Концентраты двух классов крупности 10–1 и 1–0 мм (пробы 4 и 5) получены высокоградиентной магнитной сепарацией шлама отработанного шламонакопителя по опытно-промышленной технологии

[3; 4], отличаются повышенным содержанием кремнезема, а также тонким и весьма тонким классами крупности.

Наряду с оксидными в табл. 3 представлен химсостав карбонатного концентрата, который применяют в смеси аглошихты при спекании марганцевого агломерата марки АМ-2. Все концентраты соответствуют нормам, предусмотренным ТУ У 13.2-00190928-001:2014 ПАО «ОГОК». Результаты рентгеноструктурного анализа проб концентратов подтвердили наличие кварца в концентрате, полученном из шлама отработанного шламонакопителя. Силикаты марганца сложного состава выявлены в структуре спеченных минеральных образований, сформированных при агломерационном процессе.

7. Характеристика лабораторной установки и методика определения магнитных свойств марганцевых концентратов и агломерата

Экспериментальное определение магнитной восприимчивости марганцевых концентратов и агломерата проводили на стенде⁵, схема которого представлена на рис. 1, а последовательность проведения операций изложена ниже [14].

Установка состоит из магнитопровода с катушкой (4), подвеса с пробиркой для исследуемых образцов (2), связанного нитью с весоизмерительным устройством (1). Для размещения образца на центральной оси соленоида нить пропускали через отверстие в крышке. Весоизмерительное устройство перед началом измерений включается в сеть, и производится его прогрев в течение 15 мин.

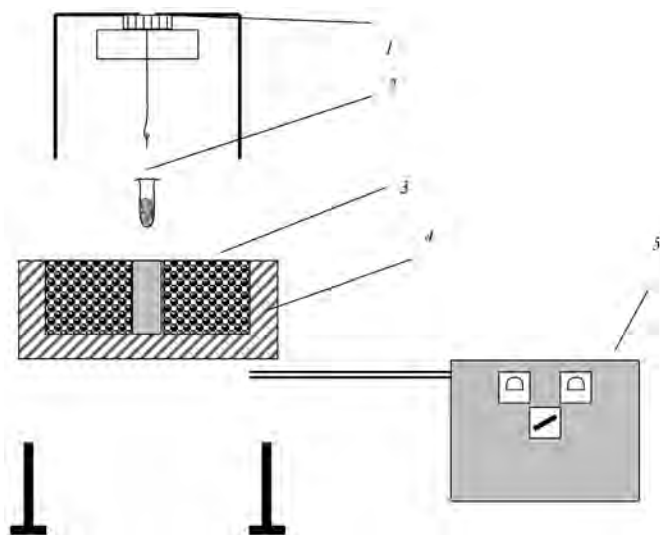
Исследуемый образец пробы загружается в пробирку на высоту примерно 1 см (L образца) от дна пробирки, закрепляется на подвес и вводится симметрично оси катушки на расстоянии, максимально приближенном к верхнему срезу катушки. Производится взвешивание пробирки с образцом. Затем включается источник питания (5) и на катушку подается напряжение. Из-

Таблица 3

Химические составы представительных проб марганцевых оксидных, карбонатных концентратов марганцевого агломерата для определения магнитных свойств

№ п/п	Наименование концентрата, агломерата	Содержание компонентов, % масс.							
		Mn	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe	П.П.П.	W _p
1	1-й сорт	45,3	13,1	2,2	1,4	2,0	2,1	12,2	15,2
2	2-й сорт	25,7	21,1	2,4	2,1	2,4	4,3	11,5	15,2
3	2-й сорт	38,0	15,1	4,7	2,4	2,2	1,9	16,2	10,0
4	2-й сорт	37,4	24,5	2,2	1,4	1,9	1,7	10,6	15,2
5	Карбонатный	29,4	9,5	12,2	1,9	2,1	1,5	30,0	9,8
6	Агломерат АМ-2	41,6	23,1	5,7	2,3	3,0	2,9	-	-

⁵Опыты проведены на установке кафедры обогащения полезных ископаемых Национального горного университета под научным руководством доктора технических наук профессора Ю. С. Мастыки.



1 – весоизмерительное устройство; 2 – пробирка с образцом; 3 – электромагнитная катушка; 4 – магнитопровод; 5 – источник питания

Рис. 1. Принципиальная схема стенда для измерения магнитных свойств материалов

меренные значения массы пробирки с образцами при включении магнитного поля и без него заносятся в табл. 4.

Таблица 4

Результаты измерений и определения удельной магнитной восприимчивости исследуемых образцов проб

№ пробы	Масса образца, г	Магнитная сила, Н	Удельная магнитная восприимчивость, $10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$
1	1,0	0,0048	0,36
2	0,92	0,004	0,326
3	0,90	0,0047	0,396
4	0,95	0,0045	0,36
5	0,92	0,0065	0,54
6	1,1	0,0165	1,137

В формуле (4) фигурирует напряженность магнитного поля H , которая соответствует среднему значению H по объему образца. Ее можно определить двумя способами (два различных приближения к точному значению).

1-й способ. Измеряется индукция на нижнем и верхнем торцах засыпки образца:

$$\text{среднее значение индукции: } B = \frac{(B_1 + B_2)}{2};$$

$$\text{среднее значение напряженности: } H = \frac{B_{cp}}{\mu_0}$$

2-й способ. Измеряется индукция в точке $y = y_{cp}$, соответствующей центру засыпки образца.

Координата y этого центра определяется по формуле:

$$y_{cp} = h_0 + \frac{h_{обр}}{2}$$

(см. обозначения $h_0, h_{обр}$ на рис. 2).

В одном из примеров было задано $h_{обр} = 10 \text{ мм}$; $h_0 = 3 \text{ мм}$; $y_{cp} = 8 \text{ мм}$.

После измерения индукции $B(y_{cp})$ в точке $y = y_{cp}$, занимаемой центром образца, находили напряженность магнитного поля:

$$H = \frac{B_{cp}}{\mu_0}$$

После сравнения полученных значений H по первому и второму способу можно выбрать один из них (второй в дальнейшем не рассматриваем).

Предположительно лучшим способом можно считать измерение по варианту № 1 (используются значения измерений в двух точках).

Если бы значения $B(y)$ была линейной, то результаты по 1-му и 2-му способам совпадали бы. Ввиду того, что зависимость нелинейна (близка к экспоненциальной), то результаты будут различаться, а более точное значение было бы получено при среднеинтегральном значении индукции при измерении ее по многим точкам (порядка 10 точек).

Производная $\frac{dH}{dy}$ определяется в результате измерения индукции и последующего пересчета напряженности в 2 точках по формуле:

$$H = \frac{B}{\mu_0},$$

лежащих на малом расстоянии $dy/2$ выше и ниже средней точки образца по формуле:

$$H = (H_2 - H_1) / \Delta y,$$

где $H_1 = H_{y(cp)} - \Delta y/2$ $H_2 = y_{cp} + \Delta y/2$

$$\frac{dH}{dy} = (H_1 - H_2) / \Delta y,$$

где $H_1 = H(y)$, т. е. в точке $y = y_1 = y_{cp} - \Delta y/2$ и в точке $y_2 = y_{cp} + \Delta y/2$.

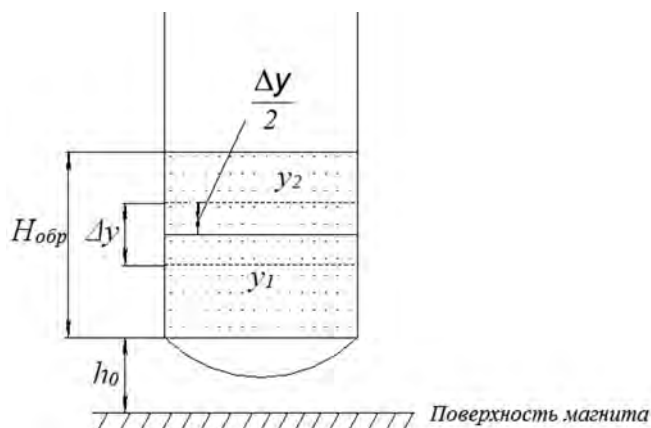


Рис. 2. Схема размещения исследуемого образца относительно магнитной системы

Результаты измерений массы образцов проб и магнитной силы, действующей на пробу, представлены в табл. 4.

8. Результаты экспериментального определения магнитной восприимчивости марганцевых концентратов и агломерата

В приведенной ниже табл. 5 представлены данные вычисленных значений объемной магнитной восприимчивости χ марганцевых концентратов и агломерата по формуле (4):

$$\left(\chi = F_m / (\mu_0 m H \frac{dH}{dy}) \right).$$

По результатам измерений видны различия в значениях величин магнитной восприимчивости слабомагнитных марганцевых продуктов. При дальнейших исследованиях способов переработки данных образцов проб будут рекомендованы и соответствующие параметры магнитных силовых полей при их высокоинтенсивной магнитной сепарации.

9. Краткая характеристика основных направлений повышения качества марганцевых концентратов и агломерата, получаемых по технологии высокоградиентной магнитной сепарации руды и шламов

В рамках рассматриваемых в настоящей статье проблемных задач повышения эффективности полезного использования марганца при обогащении марганцевых руд и шламов отработанных шламонакопителей полезным информационным ресурсом являются материалы двух научных, научно-технологических мероприятий, а именно IV Международной научной конференции «Перспективные технологии обогащения полезных ископаемых», посвященной 104-й годовщине со дня рождения доктора технических наук профессора В. И. Кармазина, и научно-технической конференции, посвященной 50-летию ввода в эксплуатацию ПАО «Никопольский завод ферросплавов».

На конференции по обогащению полезных ископаемых два из трех направлений были посвящены анализу состояния и перспектив дальнейшего развития теории процессов магнитного обогащения полезных ископаемых, в том

числе преимущественно марганцевых руд, богатых марганцем отработанных шламонакопителей, и, что следует особо выделить, конструированию магнитных сепараторов.

Среди главных направлений докладов на электроферросплавной конференции были отмечены проблемные задачи повышения коэффициента полезного использования отечественных марганцевых концентратов, в том числе и получаемых ВМС шламов отработанных шламонакопителей, снижение расхода природного газа при агломерации концентратов с замещением его колошниковым газом ферросплавных печей, и, что следует особо выделить, снижение удельного расхода электрической энергии и других задач, примыкающих к изложенным выше.

Выводы

1. В рамках выполнения опытно-промышленных разработок по повышению полезного извлечения марганца проанализирована комплексная качественно-количественная схема обогащения сырой оксидной марганцевой руды со стадиями высокоинтенсивной магнитной сепарации полупродуктов (песков) и шламов с возможным использованием в схеме шламов отработанных в ретроспективе шламонакопителей. Проанализированы характеристики магнитных сепараторов, применяемых при высокоинтенсивной магнитной сепарации шламов.

2. Проанализированы магнитные свойства (магнитная восприимчивость) кислородных химсоединений марганца и рудных марганцевых минералов (парамагнетиков) и количественные значения величин магнитной восприимчивости.

3. В отличие от соединений марганца с кислородом и рудных марганцевых минералов-парамагнетиков, вода (оксид водорода) характеризуется диамагнитными свойствами; магнитная восприимчивость воды равна $12,985 \cdot 10^{-6}$.

4. Приведена теоретическая объяснительная база, методика и результаты экспериментального определения магнитной восприимчивости марганцевых концентратов, получаемых грави-

Таблица 5

Результаты определения магнитной восприимчивости марганцевых концентратов и агломерата

Наименование	Концентрат					Карбонатный концентрат	Агломерат сорта АМ-2
	1-й сорт	2-й сорт	2-й сорт (марка Б)	2-й сорт			
				10-1 мм	1-0 мм		
Mn, %	45,3	35,7	38,0	37,4	37,4	29,4	41,6
SiO ₂ , %	13,1	21,1	15,1	24,5	24,5	9,5	23,1
Fe, %	2,1	4,3	1,9	1,7	1,7	1,5	2,9
$\chi_{vol} \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$	0,36	0,326	0,396	-	0,36	0,54	1,137

тационным обогащением руды и шламов отработанных в ретроспективе шламонакопителей методом высокоградиентной магнитной сепарации.

5. Обсуждены основные направления повышения эффективности обогащения шламов методом высокоградиентной магнитной сепарации как одной из главных задач ресурсо-сырьевой концепции горно-металлургического комплекса Украины.

Библиографический список / References

1. Шуваев С. П. Анализ процесса и технологических параметров кинетики мокрой высокоградиентной магнитной сепарации шламов обогащения марганцевых руд и отработанных шламонакопителей / С. П. Шуваев, М. И. Гасик, П. И. Пилов, Ю. С. Мостыка, В. Ю. Шутов, Л. З. Гребенюк // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2017. – № 1. – С. 30–35.

Shuvaev S. P., Gasik M. I., Pilov P. I., Mostika Yu. S., Shutov V. Yu., Grebenyuk L. Z. *Process analysis and process parameters of the kinetics of wet high gradient magnetic separation of slimes beneficiation of manganese ore and waste tailings pond*. Metallurgical and mining industry. 2017, no. 1, pp. 30–35.

2. Марганцевые руды Украины: монография / Е. Ф. Шнюков, Г. Н. Орловский, И. А. Панченко [и др.]. – К.: Наукова думка, 1993. – 172 с.

Shnukov E. F., Orlovskiy G. N., Panchenko I. A. *Manganese ores of Ukraine*. Collective monograph. Authors: and other. Kyiv, Naukova dumka. 1993, 172 p.

3. Штрюбель Г. Минералогический словарь / Г. Штрюбель, З. Х. Циммер. – М.: Недра, 1987. – 494 с.

Shtrubel G., Zimmer Z. H. *Mineralogical dictionary*. Moscow, Nedra. 1987, 494 p.

4. Шуваев С. П. Разработка и промышленное освоение технологии производства марганцевого агломерата с применением в аглошихте концентрата обогащения шламов с отработанных шламоохранилищ ПАО ОГОК / С. П. Шуваев, В. И. Бондарец, Л. Л. Куцевол, М. И. Гасик // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2016. – № 2. – С. 59–67.

Shuvaev S. P., Bondarec V. I., Kucevol L. L., Gasik M. I. *Development and industrial mastering of technology of production of manganese agglomerate with application in the agglorburden of concentrate of enriching of shlamov from exhaust shlamokhranilisch of PAO OGOK*. Metallurgical and mining industry. 2016, no. 2, pp. 59–67.

5. Шуваев С. П. Модернизация агломашины, агломерационного оборудования, совершенствование технологии производства марганцевого агломерата и внедрение новых пыле-

очистных установок на БОАФ / С. П. Шуваев, В. И. Бондарец, Л. Л. Куцевол // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2016. – № 1. – С. 34–39.

Shuvaev S. P., Bondarech V. I., Kucevol L. L. *Modernisation of sintermachine, sintering equipment, perfection of technology of production of manganese agglomerate and introduction of new pyleochistnaya setting options on BOF*// Metallurgical and mining industry. 2016, no. 1, pp. 34–39.

6. Фомин Я. И. Технология обогащения марганцевой руды / Я. И. Фомин. – М.: Недра, 1987. – 247 с.

Fomin Ya. I. *Technology of enriching of manganese ores*. Moscow, Nedra. 1987, 247 p.

7. Пат. України № 13601, МПК В03С 1/10 Магнитный сепаратор / Л. З. Гребенюк, Ю. С. Мостика, А. Ю. Мостика, В. Ю. Шутов; опубл. 17.04.2006, бюл. № 4.

Grebenyuk L. Z., Mostika Yu. S., Mostika A. Yu., Shutov V. Yu. *Patent of Ukraine no. 13601, MPK B03C 1/10 Magnitniy separator*, opubl. 17.04.2006. Byul. No. 4.

8. Кармазин В. В. Магнитные и электрические методы обогащения / В. В. Кармазин, В. И. Кармазин. – М.: Недра, 1988. – 304 с.

Karmazin V. V., Karmazin V. I. *Magnetic and electric methods of enriching*. Moscow Nedra. 1988, 304 p.

9. Патент України № 31671, МПК В03С 1/00 Магнитный валковый сепаратор / Ю. С. Мостика, В. Ю. Шутов, А. Ю. Мостика, опубл. 25.04.2008, бюл. № 8.

Mostika Yu. S., Shutov V. Yu., Mostika A. Yu. *Patent of Ukraine no. 31671, MPK B03C 1/10 Magnitniy separator*, opubl. 25.04.2008. Byul. No. 8.

10. Чукуров П. М. Марганца оксиды / П. М. Чукуров // *Химическая энциклопедия*. – М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1990. – Т. 2. – С. 649–650.

Chukurov P. M. *Manganese oxides*. Chemical encyclopaedia. Moscow, Publishing house "Soviet encyclopaedia". 1990. Vol. 2, pp. 649–650.

11. Дорфман Я. Г. Парамагнетизм / Я. Г. Дорфман // *Физический энциклопедический словарь*. – М.: Советская энциклопедия, 1983. – С. 517–518.

Dorfman Ya. H. *Paramagnetism*. Physical encyclopaedic dictionary. Moscow, Soviet encyclopaedia. 1983, pp. 517–518.

12. Дорфман Я. Г. Диамагнетизм и химическая связь / Я. Г. Дорфман. – М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1961. – 231 с.

Dorfman Ya. H. *Diamagnetism and chemical connection*. Moscow, Publishing house fisic.-mat. lit. 1961, 231 p.

13. Вонсовский С. В. Магнетизм / С. В. Вонсовский. – М., 1971. – 1032 с.

Vonsovskii S. V. *Magnetism*. Moscow. 1971, 1032 p.

14. Гасик М. И. Теоретические и экспериментальные исследования магнитных свойств промышленного ферросиликомарганца / М. И. Гасик, О. И. Поляков, В. Л. Зубов, П. И. Пилов, Ю. С. Мостыка, В. Ю. Шутов, В. С. Куцин, Ю. Б. Дедов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2012. – № 5. – С. 18–22.

Gasik M. I., Polyakov O. I., Zubov V. L., Pilov P. I., Mostika Yu. S., Shutov V. Yu., Kucin V. S., Dedov Yu. B. *Theoretical and experimental researches of magnetic properties of industrial ferrosilicomanganese*. Metallurgical and mining industry. 2012, no. 5, pp. 18-22.

Objective. Analysis of technological charts and equipment for enriching of manganese products and determination of magnetic properties of manganese concentrates and agglomerate.

Methodology. Analysis of literary data and realization of own experience-industrial tests of magnetic separators and experimental researches of magnetic properties of manganese products.

Results. The analysis of charts of enriching of manganese ores and sludges and applied types of

magnetic separators is executed, and also magnetic properties of manganese concentrates and agglomerate are certain.

Scientific novelty. Technology of high-intensive magnetic separation of manganese sludges is worked out with the use of magnetic separators with the high level of tension of magnetic-field, allowing to get concentrates with maintenance of manganese no less than 36–42 %. Methodology of determination of magnetic properties of manganese products is worked out by the method of small standard.

Practicality significance. The results of experimental research of magnetic properties of manganese concentrates and agglomerate got in-process allow to determine the technological parameters of process of magnetic separation and structural parameters of high-intensive magnetic separators at processing of manganese ores and sludges.

Key words: manganese ore, chart of enriching, high-gradient magnetic separation, sludges, magnetic separator, magnetic receptivity.

**Рекомендована к публикации
д. т. н. М. И. Гасиком**

Поступила 12.01.2017

