12. **Пурій Г.М.** Активізація інвестиційної діяльності банківської системи в контексті розвитку глобалізації / **Галина Пурій** // Науковий вісник НЛТУ України. Збірник науково-технічних праць. – 2009. – Випуск 19.12. – С. 255 – 263.

Рукопис подано до редакції 13.05.2020

УДК [658.562:622.7.016]: 66.085.3

А. А. АЗАРЯН, д-р техн. наук, проф., Д. В. ШВЕЦ, ст. преподаватель
Криворожский национальный университет

ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ КАК ИСТОЧНИК ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОДЕРЖАНИЯ ЖЕЛЕЗА В ЖЕЛЕЗОРУДНОМ СЫРЬЕ

Цель. Усовершенствование существующего ядернофизического метода контроля содержания железа в железной руде и продуктах переработки для повышения его точности в области высоких содержаний полезного компонента. Проведение экспериментальных исследований для определения зависимостей интенсивности рассеянного и поглощенного гамма-излучения от содержания полезного компонента в железной руде. Получение аналитических формул для вычисления содержания железа в железорудном сырье на основе рассеянного и поглощенного гамма-излучения.

Метод. Предлагается вместе с известным ядернофизическим методом, основанным на регистрации комптоновского рассеяния, использовать метод учета интенсивности поглощенного гамма-излучения для повышения точности контроля качества железорудного сырья в области высоких содержаний железа.

Научная новизна. Впервые предложено при контроле содержания железа в железорудном сырье ядернофизическими методами контролировать как интенсивность рассеянного гамма-излучения, так и учитывать интенсивность поглощенного гамма-излучения.

Практическая значимость. Известный ядернофизический метод контроля качества железорудного сырья, основанный на измерении интенсивности рассеянного гамма-излучения, обуславливает недостаточную точность при анализе содержания железа в исходной руде рудообогатительных фабрик и продуктах переработки. Применение полученных результатов исследований даст возможность повысить точность контроля содержания железа в железорудном сырье и продуктах переработки в условиях рудообогатительных фабрик, что позволит уменьшить колебания содержания железа в конечном продукте рудообогатительных фабрик – концентрате, а также создаст предпосылки для увеличения производительности металлургического производства.

Результаты. Проведены исследования по определению содержания железа в железорудном сырье при помощи ядернофизических методов, основанных на регистрации интенсивности рассеянного и поглощенного гамма-излучений. Анализ полученных результатов экспериментальных исследований показал, что для контроля качества железорудного сырья с высокими значениями содержания железа целесообразно применять ядернофизический метод контроля, основанный на учете интенсивности поглощенного гамма-излучения. Получены аналитические формулы для вычисления содержания железа в железорудном сырье на основе рассеянного и поглощенного гамма-излучения.

Ключевые слова: железорудное сырье, комптоновское рассеяние, ядернофизические методы, гамма-излучение, оперативный контроль.

doi: 10.31721/2306-5451-2020-1-50-153-159

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Доля Украины в мировом производстве железной руды составляет около 6%. На территории Украины располагается 20% мировых запасов железной руды. По запасам железорудного сырья Украина занимает первое место в мире, а по объемам производства – седьмое [1]. При этом, годовой объем открытой и подземной добычи железорудного сырья в Кривбассе составляет более 60 млн тонн.

В то же время существует проблема колеблемости показателей содержания железа в железорудном сырье (ЖРС), поступающем на переработку на рудообогатительные фабрики (РОФ). Колебания показателей качества исходного ЖРС приводит к колеблемости содержания железа в промпродукте и в концентрате. В связи с этим, стабилизация содержания железа в ЖРС является одной из наиболее важных задач в горнообогатительной промышленности, обусловленной необходимостью повышения качества концентрата в условиях жесткой конкуренции на мировом рынке ЖРС.

Анализ исследований и публикаций. На РОФ контроль содержания железа в ЖРС осуществляется при помощи ядернофизических, магнитометрических и ультразвуковых методов

[2]. Магнитометрический метод [3-11] позволяет определять содержание магнитного железа в ЖРС в зависимости от изменения магнитной проницаемости. Ультразвуковые методы контроля [12-14], основанные на измерениях процессов распространения ультразвуковых объёмных и поверхностных волн, также находят свое применение в условиях РОФ.

Для контроля содержания общего железа в ЖРС, как правило, применяется ядернофизический метод, основанный на регистрации комптоновского рассеяния [15-18]. Данный метод показывает хорошие результаты в зоне низких содержаний железа в ЖРС, однако его точность уменьшается при повышении содержания полезного компонента в ЖРС. Ядернофизический метод контроля содержания железа в ЖРС, основанный на регистрации рассеянных гамма-квантов, является одним из наиболее перспективных, однако целесообразным является рассмотрение возможности использования интенсивности поглощенного гамма-излучения для определения содержания железа в ЖРС.

Постановка задания. Целью экспериментальных исследований является усовершенствование ядернофизического метода определения содержания железа в ЖРС.

В связи с этим были поставлены следующие задачи:

провести эксперименты, позволяющие исследовать зависимости интенсивностей рассеянного и поглощенного гамма-излучения от содержания железа в ЖРС;

получить аналитические формулы для вычисления содержания железа в ЖРС на основе рассеянного и поглощенного гамма-излучения.

Изложение материала и результаты. Математическое моделирование интенсивностей рассеянного и поглощенного ЖРС гамма-излучения, проведенное в работе [2], позволило исследовать влияние особенностей устройств, реализующих облучение ЖРС. Вместе с тем, главным остается вопрос об исследовании гамма-излучения как источника информации о содержании железа при учете рассеянного и поглощенного ЖРС гамма-излучения. С этой целью были проведены эксперименты, позволяющие исследовать зависимости интенсивностей рассеянного и поглощенного гамма-излучения от содержания железа в ЖРС. На рис.1 представлены в виде точек графики результатов экспериментов.

С увеличением содержания железа в ЖРС при неизменных условиях, реализуемых при лабораторных исследованиях, интенсивность рассеянного гамма-излучения монотонно уменьшается, асимптотически приближаясь почти к фоновым значениям. С другой стороны, интенсивность поглощенного ЖРС гамма-излучения монотонно возрастает при увеличении содержания железа в ЖРС.

Рис. 1. Зависимости интенсивности рассеянного и поглощенного гамма-излучения от содержания железа в ЖРС

Важной особенностью исследуемых зависимостей является то, что при некотором содержании железа в ЖРС интенсивности обоих гамма-излучений сравниваются, а соответствующие графики пересекаются. Такие результаты экспериментов наводят на мысль о возможности дуального подхода к измерению содержания железа в ЖРС. При достаточно низких содержаниях железа в ЖРС естественно использовать информацию о рассеянном

гамма-излучении, так как его интенсивность выше интенсивности поглощенного ЖРС гамма-излучения. В свою очередь, при сравнительно высоких содержаниях железа в ЖРС, когда интенсивность поглощенного гамма-излучения превышает интенсивность рассеянного гамма-излучения, целесообразно использовать информацию о поглощенном ЖРС гамма-излучении. Для получения аналитических формул, описывающих на рис. 1 результаты экспериментов, представим эту информацию в оцифрованном виде, сводя их в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость интенсивности гамма-излучения от содержания железа в ЖРС

Содержание железа в руде, %	Интенсивность гамма-излучения, имп/сек	Рассеянное гамма-излучение	Поглощенное гамма-излучение
8		20000	2000
15		12000	3000
20		8000	4000
25		5000	5000
30		3000	7000
35		2000	10000
40		1000	15000
45		800	20000
50		600	25000
55		400	30000
60		200	37000
65		100	45000

Для получения аналитических формул согласно данным, приведенным в табл. 1, воспользуемся методом наименьших квадратов (МНК). Анализ результатов экспериментов, приведенных на рис. 1 и в табл. 1, указывает на нелинейность исследуемых зависимостей интенсивностей гамма-излучений от содержания железа в ЖРС. Поэтому возникает вопрос о выборе структуры формулы, которая аналитически описывает исследуемые зависимости. Согласно общему подходу к выбору структур формул, одним из наиболее важных требований является условие минимального количества параметров, входящих в эту формулу. Величины этих параметров определяются как результат идентификации на заданном статистическом материале с помощью МНК, поэтому минимальное их количество позволяет решать соответственно минимальное количество уравнений. Вместе с тем, параметры должны входить в формулу так, чтобы путем алгебраических преобразований формулу можно было бы свести к линейному виду относительно параметров, и тем самым воспользоваться в наиболее удобно реализуемом виде МНК. Качественный анализ зависимостей, приведенных на рис. 1, позволяет предположить о целесообразности выбора структуры формулы в виде степенной зависимости интенсивности гамма-излучения от содержания железа в ЖРС

$$N=a \cdot q^b, \quad (1)$$

где a, b – параметры.

Возможность выбора структуры, задаваемой формулой (1), объясняется также тем, что величины интенсивности гамма-излучения и содержания железа в ЖРС, представляющие статистический материал, приведенный в табл. 1, являются положительными. Для применения МНК в линейном виде преобразуем формулу (1) путем логарифмирования к виду

$$y=\alpha+b \cdot x, \quad (2)$$

где $y=\ln N, x=\ln q, \alpha=\ln a$.

В формулу (2) параметры входят линейно, что упрощает применение МНК. Принимая во внимание данные, приведенные в табл. 1, получаем систему из 12 уравнений с двумя неизвестными α и b

$$\alpha+b \cdot x_i=y_i, i=1, \dots, 12. \quad (3)$$

Очевидно, что система (3) является несовместной, так как число неизвестных меньше числа уравнений. Как один из возможных путей преодоления этой трудности является обобщение определения решения системы уравнений (3). Несовместную систему уравнений (3) можно решить с помощью МНК, минимизируя суммарную невязку правых и левых частей уравнений этой системы.

В качестве функции суммарной невязки в МНК используется сумма квадратов невязок каждого из уравнений

$$\Phi(\alpha, b) = \sum_{i=1}^{12} (\alpha + b \cdot x_i - y_i)^2. \quad (4)$$

Таким образом, для решения несовместной системы уравнений (3) необходимо минимизировать функцию (4) по параметрам α, b , то есть

$$\min_{\alpha, b} \Phi(\alpha, b). \quad (5)$$

Простой вид функции (4) позволяет решить задачу минимизации (5), приравняв нулю частные производные функции $\Phi(\alpha, b)$, то есть

$$\begin{aligned} \partial \Phi(\alpha, b) / \partial \alpha &= 0, \\ \partial \Phi(\alpha, b) / \partial b &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Так как функция (2) является линейной относительно параметров α и b , то (4) – квадратичная функция, что обуславливает линейность системы уравнений (6). Действительно, подставляя (4) в (6) и вычисляя частные производные, получаем систему двух линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} 12\alpha + b \sum_{i=1}^{12} x_i = \sum_{i=1}^{12} y_i; \\ \alpha \sum_{i=1}^{12} x_i + b \sum_{i=1}^{12} x_i^2 = \sum_{i=1}^{12} x_i y_i. \end{cases} \quad (7)$$

Эта система уравнений легко решается стандартными способами. Систему уравнений (7) можно записать в упрощенной форме, воспользовавшись обозначениями для средних

$$\begin{cases} \alpha + b\bar{x} = \bar{y} \\ \alpha\bar{x} + b\bar{x}^2 = \bar{xy} \end{cases} \quad (8)$$

где $\bar{x} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} x_i$, $\bar{y} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} y_i$, $\bar{x}^2 = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} x_i^2$, $\bar{xy} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} x_i y_i$.

Тогда решение системы (8) согласно формулам Крамера запишется в виде

$$\alpha = \frac{\bar{y} \cdot \bar{x}^2 - \bar{x} \cdot \bar{xy}}{\bar{x}^2 - (\bar{x})^2}, \quad b = \frac{\bar{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\bar{x}^2 - (\bar{x})^2}. \quad (9)$$

Ниже в табл. 2 представлены результаты расчетов по формулам (9).

Таблица 2

Информация для расчетов параметров аппроксимирующих формул

№	q, %	x	x ²	N _p	y _p	xy _p	x	x ²	N _п	y _п	xy _п
1	8	2.08	4.32	20000	9.90	20.59	2.08	4.32	2000	7.60	15.81
2	15	2.71	7.33	12000	9.39	25.44	2.71	7.33	3000	8.01	21.68
3	20	3.00	8.97	8000	8.99	26.92	3.00	8.97	4000	8.29	24.85
4	25	3.22	10.36	5000	8.52	27.42	3.22	10.36	5000	8.52	27.42
5	30	3.40	11.57	3000	8.01	27.23	3.40	11.57	7000	8.85	30.11
6	35	3.56	12.64	2000	7.60	27.02	3.56	12.64	10000	9.21	32.75
7	40	3.69	13.61	1000	6.91	25.48	3.69	13.61	15000	9.62	35.47
8	45	–	–	–	–	–	3.81	14.49	20000	9.90	37.70
9	50	–	–	–	–	–	3.91	15.30	25000	10.13	39.62
10	55	–	–	–	–	–	4.01	16.06	30000	10.31	41.31
11	60	–	–	–	–	–	4.09	16.76	37000	10.52	43.07
12	65	–	–	–	–	–	4.17	17.43	45000	10.71	44.73
среднее	–	3.09	9.83	–	8.47	25.73	3.47	9.83	–	9.31	32.87

При расчете параметров для интенсивности рассеянного гамма-излучения были приняты во внимание содержания железа в ЖРС до 40%. При более высоких содержаниях железа в ЖРС интенсивность рассеянного гамма-излучения слишком мала и, как следствие, ошибка измерений значительна.

Подставляя данные последней строки табл. 2 в формулы (9), находим

$$\alpha_p = \frac{8,59 \cdot 9,83 - 3,09 \cdot 25,73}{9,83 - 3,09^2} = 13,32 \quad b_p = \frac{25,73 - 3,09 \cdot 8,47}{9,83 - 3,09^2} = -1,785 \quad (10)$$

$$\alpha_{п} = \frac{9,31 \cdot 12,40 - 3,47 \cdot 32,87}{12,40 - 3,47^2} = 3,86 \quad b_{п} = \frac{32,87 - 3,47 \cdot 9,31}{12,40 - 3,47^2} = 1,57 \quad (11)$$

Согласно (10), интенсивность рассеянного ЖРС гамма-излучения вычисляется по формуле

$$N_p = 608162 q^{-1,785}, \quad (5\% \leq q \leq 40\%) \quad (12)$$

Согласно (11), интенсивность поглощенного ЖРС гамма-излучения вычисляется по формуле

$$N_p = 47,33q^{1,57}, \quad (5\% \leq q \leq 65\%) \quad (13)$$

Для проверки значимости формул (12) и (13) воспользуемся статистическими методами. Учитывая, что имеет место нелинейная парная регрессия, вычислим индекс корреляции по формуле [19]

$$\rho_{xy} = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (14)$$

где y_i – статистические данные, $\hat{y}_i$ – результаты расчета по функции, $\bar{y}$ – среднее значение.

Для оценки значимости индекса детерминации ρ_{xy}^2 используется F – критерий Фишера. Фактическое значение критерия Фишера находится по формуле

$$F_\phi = \frac{\rho_{xy}^2}{1 - \rho_{xy}^2} \frac{n - m}{m - 1}, \quad (15)$$

где n – число опытов, m – число параметров в функции.

Вычисленное фактическое значение критерия Фишера (15) сравнивается с табличным значением критерия Фишера F_T для уровня значимости α , числа степеней свободы числителя $k_1 = m - 1$ и числа степеней свободы знаменателя $k_2 = n - m$. Если $F_\phi > F_T(\alpha, k_1, k_2)$, то нулевая гипотеза о статистической незначимости и ненадежности выбранной функции отклоняется с вероятностью $1 - \alpha$. В противном случае, то есть при $F_\phi \leq F_T(\alpha, k_1, k_2)$, нулевая гипотеза принимается.

В табл. 3 приведены необходимые расчеты для оценки значимости функций (12) и (13).

Таблица 3

Информация для статистической проверки значимости функций (12) и (13)

№	N_p	$\bar{N}_p$	$(N_p - \bar{N}_p)^2$	$(N_p - \bar{N}_p)^2$	N_n	$\bar{N}_n$	$(N_n - \bar{N}_n)^2$	$(N_n - \bar{N}_n)^2$
1	20000	14859	26424931	161653424	2000	1239	579484	222506944
2	12000	4838	51289374	22224624	3000	3324	104673	193673611
3	8000	2895	26058835	510224	4000	5221	1490838	166840278
4	5000	1944	9339133	5224424	5000	7411	5815020	142006944
5	3000	1404	2547312	18367224	7000	9868	8223825	98340278
6	2000	1066	871895	27938624	10000	12570	6603123	47840278
7	1000	840	25561	39510024	15000	15501	251394	3673611
8	–	–	–	–	20000	18650	1822348	9506944
9	–	–	–	–	25000	22005	8970620	65340278
10	–	–	–	–	30000	25557	19742312	171173611
11	–	–	–	–	37000	29298	59324968	403340278
12	–	–	–	–	45000	33221	138748854	788673611
Сред.	7286	–	–	–	16917	–	–	–
Сумма	–	–	116557041	275428571	–	–	251677459	2312916667

Расчеты по формулам (14) и (15) дали следующие результаты.

Для рассеянного гамма-излучения

$$\rho_{qN_p} = \sqrt{1 - \frac{116557041}{275428571}} = 0.759, \quad F_{\phi p} = \frac{0,577}{1 - 0,577} \frac{12 - 2}{2 - 1} = 31,6; \quad (16)$$

для поглощенного гамма-излучения

$$\rho_{qN_n} = \sqrt{1 - \frac{251677459}{2312916667}} = 0.891, \quad F_{\phi n} = \frac{0,944}{1 - 0,944} \frac{12 - 2}{2 - 1} = 168,7. \quad (17)$$

По таблице распределения Фишера для 95%-квантилей находим [20]

$$F_T = F(0.05, 1, 10) = 4,96. \quad (18)$$

Так как фактические значения критерия Фишера (16) и (17) больше его табличной величины (18), то нулевая гипотеза о статистической незначимости и ненадежности функций (12) и (13) отклоняется с вероятностью 0,95.

Вместе с тем, на практике необходимо решать обратную задачу, а именно: по интенсивности гамма-излучения (рассеянного или поглощенного ЖРС) оценить величину содержания железа в ЖРС. В этом случае полученные функции (12) и (13) необходимо преобразовать в обратные. Учитывая монотонность и непрерывность функций (12) и (13), можно сделать, что обрат-

ные функции существуют [21]. Сама структура функций (12) и (13) позволяет записать аналитические выражения для их обратных функций.

Для функции (12) обратной является функция

$$q = 1739N_p^{-0,569}. \quad (19)$$

В свою очередь, для функции (13) обратной является функция

$$q = 0,0857N_n^{0,637}. \quad (20)$$

Анализ формул показывает, что диапазон вычисления содержания железа по измеренной интенсивности у них разный. Так, формулу (19) целесообразно применять в области малых содержаний железа в ЖРС, то есть при достаточно большой интенсивности рассеянного гамма-излучения. А формулу (20) необходимо применять в области больших содержаний железа в ЖРС, то есть при достаточно большой интенсивности поглощенного гамма-излучения. Для нахождения момента перехода от одной формулы к другой рассмотрим условие, при котором содержания железа, вычисленные по формулам (19) и (20), будут равны, то есть

$$1739N_p^{-0,569} = 0,0857N_n^{0,637}. \quad (21)$$

Решая уравнение (21), находим

$$N_1 = 3739. \quad (22)$$

Таким образом, при интенсивности, определяемой формулой (22), рассеянное и поглощенное гамма-излучения будут равны. В результате общая формула для вычисления содержания железа может быть записана в виде

$$q = \begin{cases} 1739N^{-0,569}, & \text{если } N < 3739; \\ 0,0857N^{0,637}, & \text{если } N \geq 3739. \end{cases} \quad (23)$$

В пересчете на величину содержания железа в ЖРС, граничная величина содержания железа составит величину

$$q_1 = 16\%. \quad (24)$$

В заключение необходимо отметить особенность формул (19) и (20), которая характеризуется коэффициентом эластичности [21]. Коэффициент эластичности показывает, на сколько процентов изменится функция, если аргумент изменится на один процент. Коэффициент эластичности вычисляется по формуле

$$E_{y/x} = \frac{x}{y} \frac{dy}{dx}. \quad (25)$$

Для формул (19) и (20) коэффициенты эластичности, соответственно, равны

$$E_{Np/q} = -0,569 \quad E_{Nn/q} = 0,637. \quad (26)$$

Важно подчеркнуть, что коэффициенты эластичности являются постоянными, что важно при проведении расчетов.

Выводы и направления дальнейших исследований. Проведены исследования по определению содержания железа в ЖРС при помощи ядернофизических методов, основанных на регистрации интенсивности рассеянного и поглощенного гамма-излучений. Анализ полученных результатов экспериментальных исследований показал, что для контроля качества ЖРС с высокими значениями содержания железа целесообразно применять ядернофизический метод контроля, основанный на учете интенсивности поглощенного гамма-излучения. Получены аналитические формулы для вычисления содержания железа в ЖРС на основе рассеянного и поглощенного гамма-излучения.

Список литературы

1. Азарян А. А. Разработка комплексной системы для повышения качественных показателей железной руды / А. А. Азарян, В. Ю. Зубкевич, Д. В. Швец // Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. – 2018. – Вип. 47. – С. 68–75. – DOI: 10.31721/2306-5451-2018-1-47-68-76.
2. Using the intensity of absorbed gamma radiation to control the content of iron in ore / A. Azaryan, A. Gritsenko, A. Trachuk, V. Serebrennikov, D. Shvets // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 3, issue 5 (99). – P. 29–35. – DOI: 10.15587/1729-4061.2019.170341.
3. Азарян А. А. Контроль содержания магнитного железа в пылевых продуктах рудообогатительной фабрики / А. А. Азарян, В. Г. Кучер, Ю. Е. Цыбулевский, Д. В. Швец // International Academy Journal «Web of Scholar». – 2017. – № 1(10). – С. 9–12.

4. Азарян А. А. Разработка измерительного канала для оперативного контроля содержания железа магнитного во взрывных скважинах / А. А. Азарян, А. А. Трачук, А. Н. Гриценко, Д. В. Швець // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. – 2019. – № 32. – С. 138–145.
5. Швець Д. В. Розробка системи стабілізації масової долі заліза магнітного у зливі класифікатора та дослідження можливості автоматизації процесу подрібнення залізної руди та підготовки її до збагачення / Д. В. Швець // Качество минерального сырья : сб. науч. тр. – Кривой Рог, 2014. – С. 252–264.
6. Азарян А. А. Перспективы построения систем автоматического регулирования процесса магнитной сепарации на базе погружных анализаторов содержания магнитного железа / А. А. Азарян, В. Г. Кучер, Д. В. Швець // Качество минерального сырья : сб. науч. тр. – Кривой Рог, 2017. – С. 214–228.
7. Дрига В. В. Исследование и классификация факторов снижающих точность непрерывного контроля качества магнетитовых руд / В. В. Дрига // Качество минерального сырья : сб. науч. тр. – Кривой Рог, 2011. – С. 168–179.
8. Дрига В. В. Исследование влияния изменения пространственного расположения рудного материала в магнитном поле накладного индуктивного преобразователя на точность непрерывного контроля качества магнетитовых руд / В. В. Дрига // Качество минерального сырья : сб. науч. тр. – Кривой Рог, 2011. – С. 64–80.
9. Цыбулевский Ю. Е. Исследование влияния физических характеристик материала железосодержащей пробы на размеры индуктивных датчиков. / Ю. Е. Цыбулевский, А. В. Швыдкий // Качество минерального сырья : сб. науч. тр. – Кривой Рог, 2011. – С. 208–212.
10. Марюта А. Н. Автоматическое управление технологическими процессами обогатительных фабрик / А. Н. Марюта, Ю. Г. Качан, В. А. Бунько – Москва : Недра, 1983 – 277 с.
11. Марюта А. Н. Контроль качества минерального сырья / А. Н. Марюта, П. К. Младецкий, П. А. Новицкий. – Киев : Техніка, 1976. – 220 с.
12. Morkun V. The study of volume ultrasonic waves propagation in the gas-containing iron ore pulp / V. Morkun, N. Morkun, A. Pikilnyak // Ultrasonics. – 2015. – Volume 56. – P. 340–343.
13. Поркуян О. В. Комбинированный метод определения относительного содержания магнетита в твердой фазе железорудной пульпы / О. В. Поркуян, Т. Г. Сотникова // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ". – Харьков, 2010. – № 12. – С. 29–36.
14. Morkun V. Investigation of the effect of characteristics of gas-containing suspensions on the parameters of the process of ultrasonic wave propagation / V. Morkun, N. Morkun, V. Tron, S. Hryshchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 6, issue 5(90). – P. 49–58.15.
15. Azaryan A. Use of Bourger-Lambert-Bera law for the operative control and quality management of mineral raw materials / A. Azaryan, V. Azaryan // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 1. – P. 4–9. – URL: <https://bit.ly/39L1yFZ>.
16. Azaryan A. Research of influence single crystal thickness NaJ (TL) on the intensity of the integrated flux of scattered gamma radiation / A. Azaryan // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 2. – P. 43–46. – URL: <https://bit.ly/2UMMbBQ>.
17. Azaryan A. Complex automation system of iron ore preparation for beneficiation / A. Azaryan, A. Pikilnyak, D. Shvets // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – Issue 8. – P. 64–66. – URL: <https://bit.ly/2Xf1Vpx>.
18. Development of the method to operatively control quality of iron ore raw materials at open and underground extraction / A. Azaryan, A. Gritsenko, A. Trachuk, D. Shvets // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – Vol. 5, issue 5 (95). – P. 13–19. – DOI: 10.15587/1729-4061.2018.144003.
19. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами / Д. Химмельблау. – Москва : Мир, 1973. – 958 с.
20. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления / Г. М. Фихтенгольц. – Москва : Наука, 1969. – Т. I. – 551 с.
21. Лавріненко Н. М. Основи економіко-математичного моделювання : навчальний посібник / Н. М. Лавріненко, С. М. Латинін, В. В. Фортуна, О. І. Бескровний. – Львів : Магнолія 2006, 2010. – 540 с.

Рукопись поступила в редакцию 15.04.2020

УДК 622.7.017

Г.Г. ГУБИН, Л.Н. САИТГАРЕЕВ, Т.П. ЯРОШ, кандидаты техн. наук, доценты
Криворожский национальный университет

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА И ФЛОКУЛООБРАЗОВАНИЕ ЧАСТИЦ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МИНЕРАЛОВ ОКИСЛЕННЫХ РУД

Цель. В связи с трудностями магнитного обогащения в сильном поле окисленных кварцитов, которые не позволили получить высокосортные концентраты, авторы провели исследования по изучению магнитных свойств минералов и определили возможность их флокуляции.

Методы исследования. Применялись магнитные методы.

Научная новизна заключается в получении новых результатов в магнитных свойствах минералов окисленных руд в магнитных полях напряженностью до 800 кА/м.