

14. **Lobov V.I.** Temperature distribution model of the iron ore pellets layer inside the combustion chamber of the belt kiln burning zone / **Lobov V.I., Kotliar M.O.** // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu.* - 2015. – No 2, p. p. 109-117. Режим доступу до журн.: <http://nvnngu.in.ua/index.php/uk/component/jdownloads/finish/53-02/8301-2015-02-lobov/0>
15. Математическая модель процесса обжига рудоугольных окатышей на конвейерной машине / **Швыдкий В. С., Ярошенко Ю. Г., Спириин Н. А., Лавров В. В.** // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* 2017. Т. 60, № 4. С. 329–335. doi: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-4-329-335>
16. **Barati M.** Dynamic simulation of pellet induration process in straight-grate system // *International Journal of Mineral Processing.* 2008. Vol. 89, Issue 1-4. P. 30–39. doi: <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2008.09.008>
17. **Кривонос В. А., Пирматов Д. С.** Математическая модель процесса обжига окатышей по зонам обжиговой машины для оптимизации режима // *Вестник Воронежского государственного технического университета.* 2010. № 5. С. 128–132.
18. **Panic B., Janiszewski K.** Model investigations 3D of gas-powder two phase flow in descending packed bed in metallurgical shaft furnaces // *Metalurgija.* 2014. Vol. 53, Issue 3. P. 331–334.
19. Патент № 109810 Україна. МПК С22В 1/02 (2006.01), G01N 21/00. Спосіб керування процесом випалювання котунів на конвеєрній машині / **Лобов В.Й., Лобова К.В., Кривенко Т.А.**; заявник і патентовласник ДВНЗ «Криворізький національний університет». - № u201601988; заявл. 29.02.2016; 12.09.2016, Бюл. №17.
20. Патент № 118787 Україна. МПК С22В F27 В G01G19/22 (2006/01). Спосіб керування процесом випалювання котунів на конвеєрній машині / **Лобов В.Й., Лобова К.В., Кривенко Т.А.**; заявник і патентовласник ДВНЗ «Криворізький національний університет». - № a201610043; заявл. 03.10.2018; 11.03.2019, Бюл. № 5.
21. **Абзалов, В. М.** Газодинамика слоя сырых окатышей на обжиговой машине/ **В.М. Абзалов, В.И. Клейн, В.Н. Леушин, С.В. Шаврин** // *Сталь.* – 2003. – №1. – С. 17-20
22. **Кривонос В. А.** Контроль температуры окатышей по зонам обжиговой машины. // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).* 2011. – №8. С. 189-194
23. **Буткарев А. А.** Исследование и совершенствование процесса управления термообработкой окатышей на обжиговых конвейерных машинах / **А. А. Буткарев** // *Сталь.* – 2011 – № 5. – С. 4-8.
24. **Мізерний В.М.** Аналіз стаціонарних режимів теплообмінних процесів у дисперсному шарі / **В.М. Мізерний, Т.А. Модебадзе** // *Вісник Вінницького політехнічного інституту.* – 2006. – № 4. – С. 82–102.
25. **Neskoromna M.V.** Modeling of iron-ore pellet firing in a conveyor-type kiln at pelletizing plant / **M.V. Neskoromna** // *Widening our horizons.* – 2016. – P. 42. 7
26. **Zade L. A.** “The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning”, *Information Sciences*, part 1, 2, 3, n. 8 pp.199-249, pp.301-357, n. 9 pp. 43-80.
27. *Прикладні нечіткі системи: Переклад з япон./К. Асаї, Д. Вагада, С. Іваї та ін; під ред. Т. Тера, К. Асаї, М. Сугено.* - М.: Світ, 1993.
28. **Рубан С.А., Лобов В.Й.** Розробка принципів керування температурним режимом процесу випалювання котунів з використанням прогнозуючих ANFIS-моделей [Текст] // *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління.* – 2008. – С. 69-74.

Рукопис подано до редакції 25.09.2019

УДК [658.562:622.7.016]: 66.085.3

Д. В. ШВЕЦ, ст. преподаватель
Криворожский национальный университет

КОНТРОЛЬ ХИМИКО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ ПРИ ПОМОЩИ УЧЕТА ИНТЕНСИВНОСТИ ПОГЛОЩЕННОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель. Усовершенствование существующего ядернофизического метода контроля содержания общего 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, поглощенного и интегрального гамма-излучения от содержания полезного компонента в железной руде.

Метод. Предложена модификация существующего ядернофизического метода, основанного на регистрации интенсивности рассеянного гамма-излучения (комптоновского рассеяния).

Научная новизна. Впервые предложено при анализе качества железорудных проб гамма-методом контролировать как интенсивность комптоновского рассеяния, так и учитывать количество поглощенных гамма-квантов (фотоэффект) в процессе облучения горной массы источником гамма-квантов.

Практическая значимость. Традиционный метод контроля с учетом интенсивности комптоновского рассеяния демонстрирует недостаточную точность при анализе качества богатых железных руд и продуктов переработки. Разработанный метод позволяет повысить точность измерения содержания общего железа в рудных пробах в облас-

ти высоких содержаний железа, что обусловлено высокой вероятностью возникновения фотоэффекта при повышении эффективного атомного номера исследуемой среды. Применение полученных результатов даст возможность повысить точность контроля качества железорудного сырья и продуктов переработки в условиях рудообогатительных фабрик, позволит стабилизировать качество концентрата, а также увеличит производительность металлургического производства.

Результаты. Разработан метод ядернофизического контроля качества минерального сырья, позволяющий уменьшить погрешность при определении содержания полезного компонента в железной руде с высоким содержанием металла. Предложена функциональная схема и реализована установка для определения содержания общего железа в железорудных пробах с использованием модифицированного ядернофизического метода, основанного на учете интенсивности поглощенного пробой гамма-излучения. Разработана методика проведения эксперимента для сравнения ядернофизических методов, основанных на регистрации комптоновского рассеяния и учета фотоэффекта. Осуществлены экспериментальные исследования, определены зависимости интенсивности рассеянного, поглощенного и интегрального гамма-излучения от содержания полезного компонента в железной руде, получены соответствующие аналитические выражения.

Ключевые слова: железная руда, комптоновское рассеяние, фотоэффект, гамма-излучение, оперативный контроль.

doi: 10.31721/2306-5451-2019-1-49-89-96

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.

Годовой объем открытой и подземной добычи железорудного сырья в Кривбассе составляет более 60 млн. тонн. Вместе с тем, высокие темпы развития промышленности требуют увеличения объемов добычи руд. Балансные запасы богатой руды Кривбасса со средней массовой долей железа 56,7% составляют 1,5 млрд. тонн, а железистых кварцитов со средней массовой долей железа 34,3% - 18 млрд. тонн [1].

Стабилизация параметров качества железорудного сырья является одной из наиболее актуальных задач.

Содержание железа в концентрате является одним из наиболее важных параметров для металлургического производства. Согласно данным [2], повышение содержания железа в руде на 1% увеличивает производительность доменного производства на 4-5% и снижает расход кокса на 1-3%.

Анализ исследований и публикаций. Контроль качества железорудного сырья традиционно осуществляется при помощи ядернофизических [3-8], магнитометрических [9-12] и ультразвуковых методов [13-15].

Следует отметить, что магнитометрический метод позволяет определять содержание только магнитного железа в исследуемой горной массе. Ультразвуковые методы контроля, основанные на измерениях процессов распространения ультразвуковых объемных и поверхностных волн, а также высокоэнергетического ультразвука, широко применяются в горном производстве. Однако, ультразвуковой контроль затруднительно использовать для контроля содержания железа в твердых средах.

Для контроля содержания общего железа традиционно применяется ядернофизический метод, основанный на регистрации рассеянных гамма-квантов (т.н. комптоновское рассеяние) [16,17]. Однако данный метод показывает хорошие результаты в зоне низких содержаний железа в рудном материале, в то время как точность измерений проб с высоким содержанием полезного компонента значительно уменьшается. В связи с этим представляется целесообразным модифицировать существующий метод для учета показателей интенсивности поглощенного исследуемой пробой гамма-излучения, дающего большую информативность в зоне высоких содержаний железа.

Постановка задания. Ядернофизический метод контроля содержания железа в рудном материале, основанный на регистрации рассеянных гамма-квантов, является одним из наиболее перспективных, однако обладает недостаточной точностью. Целью экспериментальных исследований является усовершенствование данного ядернофизического метода для уменьшения погрешности измерений.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

определить зависимость интенсивности рассеянного, поглощенного и интегрального гамма-излучения от содержания полезного компонента в железной руде;
разработать метод ядернофизического контроля, позволяющий уменьшить погрешность при определении содержания полезного компонента в железной руде.

Изложение материала и результаты. При использовании ядернофизического метода, основанного на комптоновском рассеянии, гамма-кванты с начальной энергией E_0 испускаются источником гамма-излучения 5 и попадают на горную массу 1 (рис.1). Часть гамма-квантов отражается от поверхности горной массы и рассеивается под определенным углом, зависящим от используемого источника гамма-излучения. При взаимодействии гамма-кванта с веществом часть его энергии поглощается, и данный квант выходит из поглотителя с энергией, меньшей на величину поглощенной энергии ($E_{\text{погл}}$). Рассеянные гамма-кванты регистрируются монокристаллом NaJ 3, превращаясь в световую энергию. Яркость и длительность вспышки зависит от энергии гамма-кванта. При помощи детектора 4 вспышки превращаются в электрические импульсы, количество которых определяется счетным устройством. По предварительно установленным зависимостям на основе количества зарегистрированных импульсов определяется содержание железа в горной массе.

Рис. 1. Геометрия взаимодействия гамма-излучения с горными породами: 1 – горная порода; 2 – свинцовая защита от источника излучения; 3 – монокристалл NaJ; 4 – детектор (фотоэлектронный умножитель); 5 – источник излучения ($\text{Am} - 241$)

Однако поскольку размер монокристалла датчика намного меньше облучаемой площади материала, то количество рассеянных гамма-квантов, зарегистрированных датчиком, составляет примерно 10-15 % от потока рассеянного гамма-излучения. Это обуславливает значительное число неучтенных рассеянных частиц, что приводит к погрешностям определения содержания полезного компонента в облучаемом материале. Увеличение площади монокристалла экономически нецелесообразно, а также делает установку более громоздкой и усложняет ее эксплуатацию.

В связи с этим, для повышения точности описанного метода принимается гипотеза о целесообразности учета не только комптоновского рассеяния гамма-квантов ($E_{\text{расс}}$), но также и поглощенных веществом частиц (фотоэффект, $E_{\text{погл}}$) и прошедших сквозь слой вещества гамма-квантов ($E_{\text{прош}}$).

Согласно закону сохранения энергии, энергию рассеянного гамма-кванта можно определить, как

$$N_0 = N_{\text{расс}} + N_{\text{погл}} + N_{\text{прош}}, \quad (1)$$

где N_0 – количество излученных источником гамма-квантов; $N_{\text{расс}}$ – количество рассеянных веществом гамма-квантов; $N_{\text{погл}}$ – количество поглощенных веществом гамма-квантов; $N_{\text{прош}}$ – количество прошедших сквозь слой вещества гамма-квантов.

Значение энергии первичных гамма-квантов E_0 , испускаемых источником, определяется экспериментально: источник частиц устанавливают напротив детектора и регистрируют мощность излучения за единицу времени.

В свою очередь, мощность зарегистрированного рассеянного гамма-излучения зависит от коэффициента поглощения μ , который меняется в зависимости от содержания полезного компонента в руде (Fe), а также от охвата монокристаллом угла рассеяния частиц ζ

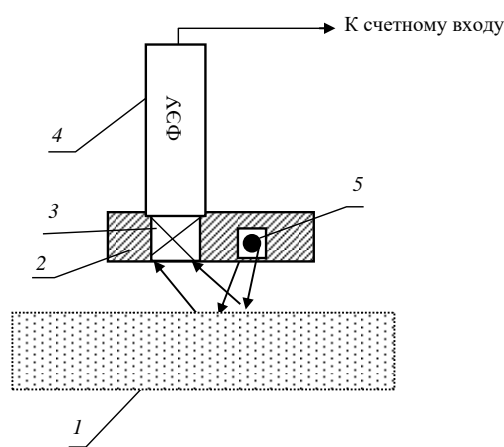
$$E_{\text{расс}} = f(E_{\text{погл}} * \mu * \zeta), \quad (2)$$

где $\mu = f(Fe). \quad (3)$

Интенсивность зарегистрированных детектором гамма-квантов подчиняется закону Лямперта-Бугера-Бэра и описывается уравнением (4)

$$N = N_0 * e^{-\mu_m * \rho * x}, \quad (4)$$

где N_0 – первичное количество γ -квантов, падающих на пробу, μ_m – массовый коэффициент ослабления. Величина $1/\mu_m$ – характеризует глубину проникновения γ -кванта, ρ – поверхностная плотность – $\text{г}/\text{см}^3$, x – толщина поглотителя, см.



В связи с тем, что при использовании низкоэнергетических источников гамма-квантов и значительной толщины насыпного слоя железной руды, количество прошедших сквозь горную массу гамма-частиц достаточно невелико, и им можно пренебречь, интенсивность поглощенного гамма-излучения можно вычислить по формуле:

$$N_{\text{отр}} = \frac{N_0 - N_{\text{погл}}}{K}, \quad (5)$$

где K представляет собой коэффициент $K \geq 1$, характеризующий отношение количества испущенных источником гамма-квантов к количеству зарегистрированных сцинтилляционным детектором гамма-квантов

$$K = \frac{N_0}{N_{\text{рег}}}. \quad (6)$$

С другой стороны, коэффициент K можно рассматривать как отношение телесного угла рассеяния гамма-квантов (полусфера, 2π) к телесному углу зоны регистрации гамма-квантов:

$$K = \frac{2\pi}{\mathcal{U}}, \quad (7)$$

где \mathcal{U} - телесный угол зоны регистрации гамма-квантов, рассчитываемый как

$$\mathcal{U} = \frac{S}{R^2}, \quad (8)$$

где S - площадь части сферы с центром в вершине угла, которая вырезается этим телесным углом; R - радиус сферы.

Количество зарегистрированных гамма-частиц при повышении содержания общего железа в облучаемой руде уменьшается в связи с тем, что при значительном поглощении энергии гамма-кванта угол его отклонения относительно начальной траектории увеличивается, в результате чего частицы рассеиваются за пределами зоны регистрации детектора.

Таким образом, суть предложенного ядернофизического метода состоит в следующем:

горная масса облучается источником гамма-квантов;

регистрируются рассеянные породой частицы и определяется количество поглощенных веществом гамма-квантов;

вычисляется содержание полезного компонента на основе мощности гамма-квантов, зарегистрированных в результате комптоновского рассеяния и фотоэффекта.

Функциональная схема экспериментальной установки изображена на рис. 2. Она состоит из источника гамма-излучения 2 на основе изотопа Am-241 с энергией излучения 60кэВ, которая обеспечивает необходимую чувствительность к изменению массовой доли полезного компонента в горной массе; детекторов рассеянного 4 гамма-излучения; вычислительного блока 5, определяющего количество поглощенных гамма-квантов. Содержание железа в руде вычисляется в зависимости от соотношения интенсивности рассеянного и поглощенного гамма-излучения. Результаты измерений выводятся на цифровой индикатор устройства.

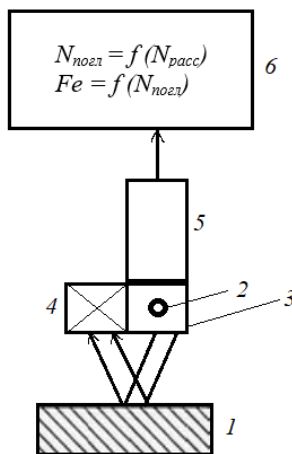


Рис.2. Общая функциональная схема взаимодействия гамма-излучения с веществом: 1 – горная порода; 2 – источник гамма-излучения; 3 – защитный контейнер; 4 – датчик регистрации рассеянного гамма-излучения; 5 – фотоэлектронный умножитель; 6 – блок вычисления содержания железа в руде

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем:

для проведения экспериментов были предварительно подготовлены пробы железной руды с содержанием общего железа в диапазоне 40-60% и железорудный концентрат содержанием общего железа в диапазоне 61-68%. Содержание железа в пробах предварительно было определено при помощи метода химического анализа. Для исследований в диапазоне 10-40% содержания железа использовались соответствующие ГСО;

экспериментальная проба подготавливалась путем заполнения рудным материалом цилиндрической кюветы высотой 5см и диаметром 10см. Поверхность пробы после заполнения разравнивалась, далее проба прижималась металлическим грузом для минимизации воздушных зазоров между гранулами, после чего производилась досыпка рудного материала в кювету и повторное разравнивание поверхности;

на кювету устанавливалось измерительное устройство и проводился замер общего железа в рудном материале методом реги-

страции комптоновского рассеяния. Время экспозиции составляло 60 секунд;

проводилось три измерения, после чего осуществлялась пересыпка (проба подготавливалась согласно пунктам б и в из другого рудного материала соответствующего содержания железа);

проводилось три пересыпки с тремя измерениями содержания железа в пробе по каждой; результаты измерений фиксировались в таблице;

пункты б..е повторялись для каждой пробы (с разным содержанием общего железа);

эксперименты с ГСО проводились путем установки на их поверхности измерительного устройства и трехкратного замера со временем экспозиции 60 сек.

Экспериментальные исследования проводились путем настройки измерительной аппаратуры на регистрацию рассеянных гамма-квантов. Предварительно, согласно установленной методике проведения эксперимента, были произведены замеры на ГСО (диапазон 10-40% содержания железа), и пробах железной руды с содержанием 40-60%, подтвержденным методом химического анализа. На основе проведенных измерений была осуществлена калибровка измерительного устройства, проведена аппроксимация и получена функциональная зависимость, характеризующая взаимосвязь интенсивности рассеянного гамма-излучения и процентного содержания железа в руде. Базируясь на полученных данных, была установлена зависимость между количеством поглощенных гамма-частиц и содержанием полезного компонента в руде. Результаты исследований представлены на рис. 3.

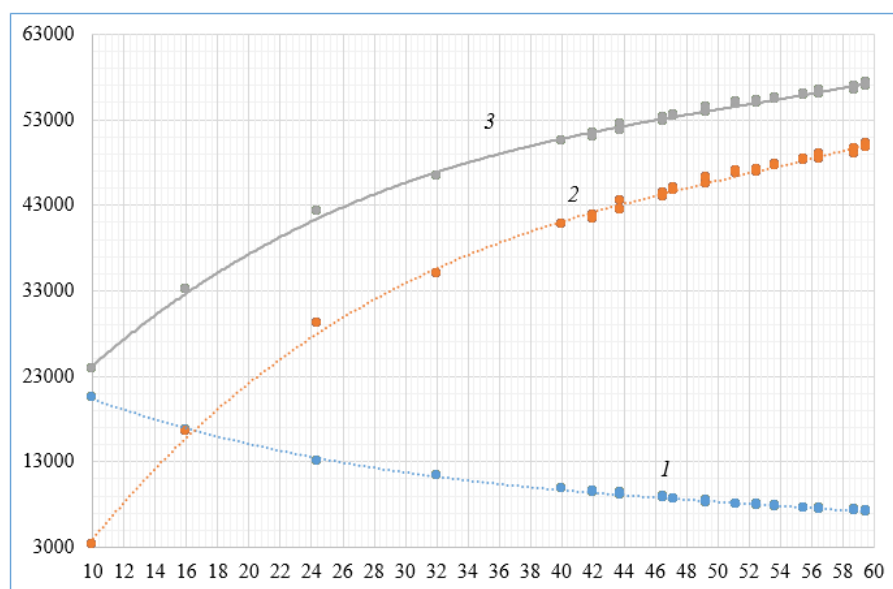


Рис.3. Зависимость интенсивности рассеянного, поглощенного и интегрального гамма-излучения от содержания полезного компонента: 1 – рассеянное, 2 – поглощенное, 3 – интегральное гамма-излучение

Как видно из графика, чувствительность ядернофизического метода контроля, основанного на регистрации интенсивности поглощенного гамма-излучения, в области высоких содержаний железа значительно выше, чем метода регистрации рассеянных частиц.

Далее согласно установленной методике был проанализирован диапазон содержания железа 61-68% на образцах железорудного концентрата. Были установлены расчетные значения содержания полезного компонента согласно методу регистрации рассеянного и поглощенного излучения.

Экспериментально полученные зависимости интенсивности рассеянного и поглощенного гамма-излучения от содержания полезного компонента приведены на рис. 4. Для удобства сравнения и увеличения масштаба корреляционного поля, показатели интенсивности поглощенного излучения конвертированы в количество рассеянных частиц (кривые 3 и 4). Как видно из графика, поглощенное излучение обеспечивает большую чувствительность к колебаниям полезного компонента в области высоких содержаний железа, в то время как использование рассеянного излучения приводит к значительным погрешностям в данном диапазоне.

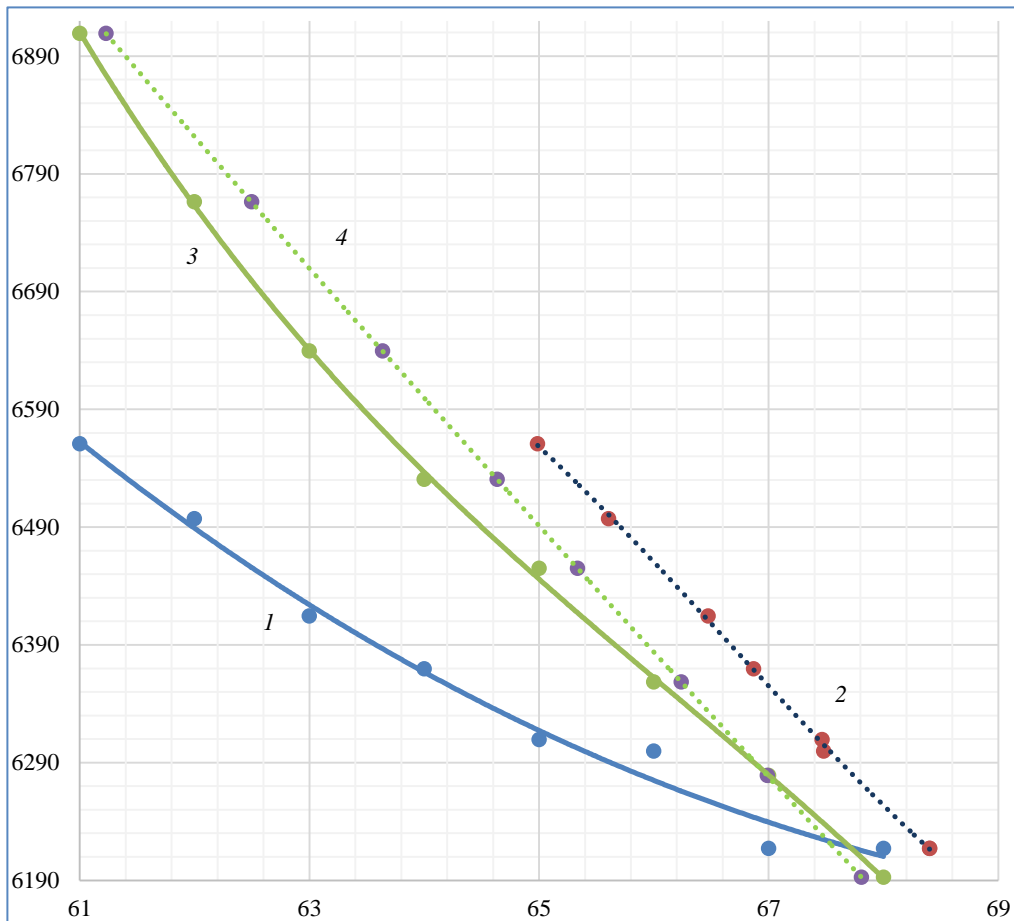


Рис. 4. Зависимости: 1 – содержания железа, определенного методом химического анализа, от интенсивности рассеянного излучения; 2 – расчетного содержания железа от интенсивности рассеянного излучения; 3 – содержания железа, определенного методом химического анализа, от интенсивности поглощенного излучения; 4 – расчетное содержание железа от интенсивности поглощенного излучения

Получены аналитические выражения по показанному семейству кривых:

1. $y = -0,0581x^3 + 14,926x^2 - 1250,1x + 40464$, надежность аппроксимации $R^2 = 0,98$.

2. $y = 1,9451x^3 - 388,95x^2 + 25819x - 562555$, надежность аппроксимации $R^2 = 0,99$.

3. $y = -0,9798x^3 + 194,57x^2 - 12961x + 295944$, надежность аппроксимации $R^2 = 0,99$.

4. $y = -0,0338x^3 + 7,2498x^2 - 622,1x + 25576$, надежность аппроксимации $R^2 = 0,99$.

График, демонстрирующий чувствительность двух ядернофизических методов в областях высокого содержания полезного компонента в исследуемом материале, изображен на рис. 5.

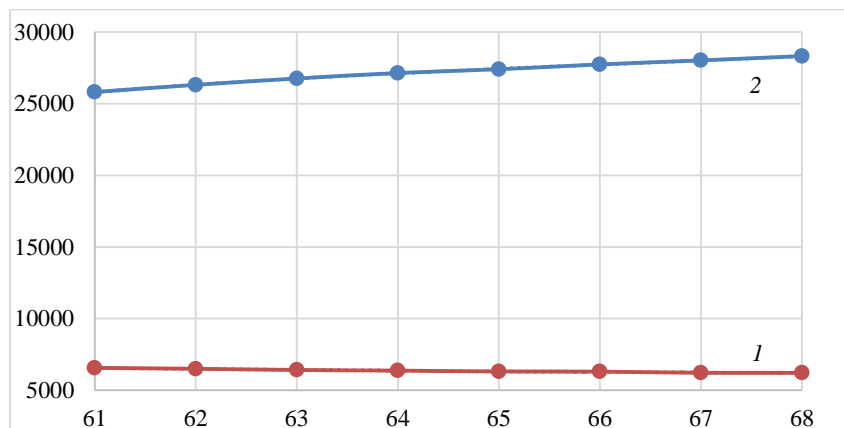


Рис. 5. Зависимость интенсивности рассеянного и поглощенного гамма-излучения от содержания полезного компонента в области высокого содержания железа (61-68%): 1 – рассеянное; 2 – поглощенное

Зависимость для интенсивности поглощенного гамма-излучения имеет следующий вид
 $y = 3,4293x^3 - 680,98x^2 + 45363x - 985806$, надежность аппроксимации $R^2 = 0.99$.

Выводы и направления дальнейших исследований. Проведенные исследования доказывают, что для контроля качества железорудного сырья и продуктов переработки с высоким содержанием общего железа целесообразно применять ядернофизический метод контроля, основанный на учете интенсивности поглощенного исследуемой пробой гамма-излучения, так как методы, основанные на регистрации комптоновского рассеяния предопределяют значительную погрешность в области высокого содержания полезного компонента. Дальнейшее направление исследований будет заключаться в установлении граничных значений коэффициента, характеризующего процент зарегистрированных гамма-квантов при измерении, а также в изучении его влияния на точность измерений.

Список литературы

1. Азарян А. А., Зубкевич В. Ю., Швец Д. В. Разработка комплексной системы для повышения качественных показателей железной руды // Вестник Криворожского национального университета: сб. науч. работ – 2018. – Вып. 47. – С. 68-76.
2. Азарян А. А., Колосов В. А., Ломовцев Л. А., Учитель А. Д. Качество минерального сырья. – Кривой Рог: Минерал, 2001 – 201 с
3. Azaryan A., Pikilnyak A., Shvets D. Complex automation system of iron ore preparation for beneficiation / Metallurgical and mining industry. No.8. 2015. p.p. 64 66. https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2015_8/011Azaryan.pdf
4. Kiran, K. (2015). Experimental and simulated study of detector collimation for a portable 3" * 3" NaI(Tl) detector system for in-situ measurements. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 8(4), 597-605. DOI: 10.1016/j.jrras.2015.07.006
5. Diaz-H, K., Cristancho, F. (2016) Effect of sample thickness on 511 keV single Compton-scattered gamma rays. AIP Conference Proceedings 1753, 080001. DOI: 10.1063/1.4955371
6. Awad A. Ibraheem, Algahatani, F. (2018) Analysis of alpha particles scattered from ^{32}S at 386 MeV. AIP Conference Proceedings 1976, 020022. <https://doi.org/10.1063/1.5042389>
7. Azaryan, A., Gritsenko, A., Trachuk A., Shvets D. (2018). Development of a method for operational control over quality of the iron ore raw materials during open and underground extraction. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5
8. Development of a method for operational control over quality of the iron ore raw materials during open and underground extraction / A. Azaryan, A. Gritsenko, A. Trachuk, D. Shvets // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Issue 5 (95). P. 13-19. doi: 10.15587/1729-4061.2018.144003
9. Швец Д. В. Автоматическое управление процессом измельчения магнетитовых руд на основе определения их прочности. / Сборник научных трудов "Качество минерального сырья", том 2. Кривой Рог. 2018.
10. Азарян А. А., Дрыга В. В., Цыбулевский Ю. Е. Исследование автогенераторного метода контроля содержания железа магнитного в продуктах обогащения // Качество минерального сырья: сб. науч. трудов. Академия горных наук Украины, КТУ, Укррудпром; гл. ред. В. Ф. Бызов. Кривой Рог. 2005. С. 117-123.
11. Марюта А.Н. Контроль качества минерального сырья / А.Н. Марюта, П.К. Младецкий, П.А. Новицкий. – К.: Техніка, 1976. – 220 с.
12. Ніколаснко К.В. Магнітні та електричні методи збагачення корисних копалин / К.В. Ніколаснко, Т.А. Олійник, В.Д. Прилипенко – К.:Фенікс, 2011. – 368с.
13. Morkun, V., Morkun, N., Pikilnyak, A. The study of volume ultrasonic waves propagation in the gas-containing iron ore pulp // Ultrasonics. Volume 56. 2015. p.p.340-343. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X14002443>
14. Поркуян О. В., Сотникова Т. Г. Комбинированный метод определения относительного содержания магнетита в твердой фазе железорудной пульпы / Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ". № 12. Харьков. НТУ "ХПИ". 2010. С. 29-36.
15. Morkun, V., Morkun, N., Tron, V., Hryshchenko S. (2017). Investigation of the effect of characteristics of gas-containing suspensions on the parameters of the process of ultrasonic wave propagation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(5-90), 49–58.
16. 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. No. 1. P. 4-9.
17. Azaryan, A. Research of influence single crystal thickness NaJ (TL) on the intensity of the integrated flux of scattered gamma radiation // Metallurgical and Mining Industry. 2015. №2. P. 43–46.

Рукопись поступила в редакцию 04.11.2019