

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 622.7.09:621.039.84

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.108-114](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.108-114)А. А. Азарян¹, проф., д-р техн. наук, Д. В. Швець¹, доц., канд. техн. наук,А. А. Трачук¹, доц., канд. техн. наук, О. В. Швидкий²¹Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна²ТзОВ «Рудпромгеофізика», м. Кривий Ріг, Україна

e-mail: dmitriy.shvets@knu.edu.ua

Оперативний контроль вмісту заліза в пульпі зливу класифікатора з використанням гамма-випромінювання

Проведено дослідження можливості оперативного контролю вмісту заліза в гетерофазних середовищах з використанням гамма-абсорбційного методу. Розглянуто пристрій для оперативного визначення вмісту заліза в залізорудній пульпі в умовах рудозбагачувальної фабрики та досліджено вплив збурюючих факторів на точність контролю. Підготовлено набори зразків із вмістом заліза, характерним для концентрату, вихідної руди та хвостів збагачення. Проведено експериментальні дослідження впливу густини залізорудної пульпи і вмісту твердого в ній на інтенсивність зареєстрованого гамма-випромінювання при використанні гамма-абсорбційного методу контролю. Проведені експерименти підтвердили перспективність використання гамма-абсорбційного методу для визначення вмісту заліза в руді в разі сталості густини пульпи або при введенні поправки на фактичне значення густини.

ядерно-фізичні методи, гамма-випромінювання, контроль якості, пульпа

Постановка проблеми. Україна стабільно входить до першої десятки країн найбільших виробників сталі, і саме виробництво металу та видобуток руди є сьогодні головними галузями її спеціалізації в міжнародному розподілі праці. Згідно з [1], чорна металургія забезпечує до 40% усього експорту країни, виступаючи при цьому основною експортною галуззю. Цьому сприяє істотний обсяг запасів залізних руд в Україні, що розробляються як відкритим, так і підземним способом.

Сьогодні на особливу увагу заслуговує впровадження нових передових технологій з прямого відновлення заліза (Itmk3 [2], Midrex [3]). Опанування виробництва таких високотехнологічних видів підготовленої металургійної сировини, як металізовані брикети із вмістом заліза до 72 %, окатиші із вмістом заліза до 68 % і вмістом кремнезему менше 1,5 %, створять передумови для переходу на бездоменне виробництво сталі, а в подальшому – і прокату, безпосередньо на гірничо-збагачувальних комбінатах.

Водночас, якість залізорудного концентрату є критично важливою як для конкурентоспроможності вітчизняної сировини на світовому ринку, так і для її ефективної металургійної переробки. Одним із ключових показників технологічного процесу підготовки руди до збагачення є стабільність вмісту заліза в промпродукті. Другим суттєвим фактором є густина пульпи на зливі класифікуючого апарату, яка значною мірою визначає ефективність процесу збагачення та обсяг втрат корисного компонента у хвості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для контролю вмісту корисного компонента в залізорудній сировині традиційно застосовуються хімічні методи. Вони демонструють високу точність, проте не забезпечують достатньої оперативності - час отримання результатів хімічного аналізу становить близько двох годин [4]. У

виробничих умовах це дає змогу лише оцінювати відповідність технологічних параметрів процесу заданим показникам для вже переробленої залізорудної сировини. Тому виникає необхідність у застосуванні методів оперативного контролю для врахування стохастичності властивостей руди, що подається на першу стадію подрібнення і класифікації. Отримана при цьому інформація дасть змогу своєчасно здійснювати керуючі впливи на процес переробки руди для досягнення необхідних показників збагачення.

Серед методів, що дають змогу проводити оперативний аналіз, можна виділити магнітометричні [5], ультразвукові [6] і ядерно-фізичні [7]. Перші з зазначених засновані на вимірюванні зміни відносної магнітної проникності [8] під час взаємодії з досліджуваною пробою. Таким чином, магнітометричні методи не дають змоги отримувати дані про вміст загального заліза, тобто про сумарний вміст корисних мінералів, обмежуючись тільки тими, що виявляють магнітні властивості. Ультразвукові методи базуються на вимірюванні параметрів ультразвукових об'ємних і поверхневих хвиль, а також їхньому поширенні в рідких і твердих середовищах [9]. Вони можуть застосовуватися для контролю вмісту заліза в пульпі, що є гетерофазним середовищем, проте точність цього методу може погіршуватися через утворення бульбашок газу в зоні аналізу. Також істотний вплив на результати вимірювань чинить коливання в'язкості пульпи, що зумовлено зміною параметрів акустичного поглинання та розсіювання ультразвуку.

Ядерно-фізичні методи контролю позбавлені зазначених недоліків і дають змогу визначати вміст корисного компонента завдяки підрахунку зареєстрованих ядерних частинок, що взаємодіють із досліджуваним середовищем [10]. Як правило, цей клас методів застосовується для контролю параметрів у твердих зразках. Крім того, вони можуть успішно застосовуватися для контролю густини суспензій [11]. До ядерно-фізичних входить ціла низка методів, включно з урахуванням комптонівського розсіювання [12], використанням нейтронного активаційного аналізу [13], методом Мессбауерівської спектроскопії [14]. Одним із підходів, що дає змогу виконати аналіз властивостей гетерофазних середовищ, є гамма-абсорбційний метод.

Таким чином, об'єктом дослідження в цій роботі є процес контролю вмісту заліза в пульпі зливу класифікатора рудозбагачувальної фабрики. Предметом дослідження, своєю чергою, є засоби контролю параметрів технологічних процесів гірничого виробництва на базі використання ядерно-фізичних методів.

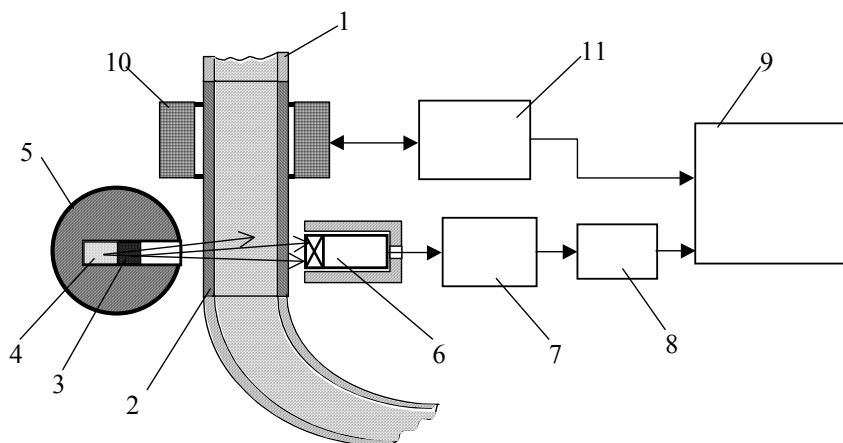
Постановка завдання. Метою роботи є дослідження можливості оперативного контролю масової частки заліза в гетерофазних середовищах з використанням гамма-абсорбційного методу. Методами дослідження є статистичний аналіз, а також лабораторні дослідження факторів, що впливають на точність застосування гамма-абсорбційного методу для визначення вмісту корисного компонента в залізорудній пульпі.

Викладення основного матеріалу. Під час роботи було проведено підготовку представницьких проб для дослідження процесів поглинання гамма-випромінювання в гетерофазних середовищах.

Проби в кількості 90 шт. було відібрано на ПівнГЗК з масовою часткою заліза 14.65, 34.75 та 65.13 відсотків відповідно. При цьому проби з масовою часткою 14.65% були класифіковані як «хвости», 34.75% - як промпродукт, а 65.13% - як концентрат.

Контроль густини пульпи та масової частки корисного компонента у твердій фазі пульпи безпосередньо в технологічному ланцюзі пропонується здійснювати з використанням пристрою, що наведений на рисунку 1. Пристрій працює наступним чином. Пульпа подається в зону контролю трубопроводом 1, який має вставку 2 з полімерного зносостійкого матеріалу (наприклад, супралену). На пульпу спрямовано потік випромінювання низькоенергетичного і високоенергетичного джерел квантів 3 і 4

відповідно, розміщених у свинцевому контейнері-коліматорі 5, що забезпечує біологічний захист і формує вузький пучок гамма-квантів у напрямку пульпопроводу. Гамма-кванти, що пройшли крізь стінки пульпопроводу і шар пульпи, потрапляють на кристал сцинтиляційного датчика 6. Інтенсивність квантів, що потрапили на кристал датчика 6, перетворюється ним у частоту електричних імпульсів різної амплітуди, пропорційних енергії зареєстрованих квантів. Імпульси з датчика 6 надходять на вхід амплітудного аналізатора 7, де відбувається їх поділ за амплітудами і виокремлення частоти імпульсів I_1 , яка відповідає квантам низькоенергетичного джерела (60 кеВ) випромінювання (Am-241), та частоти імпульсів I_2 , що відповідає квантам високоенергетичного (660 кеВ) джерела (Cs-137). Згідно з теорією взаємодії гамма-квантів різних енергій з речовиною, інтенсивність I_2 високоенергетичних квантів, що пройшли через речовину, несе інформацію про густину речовини, низькоенергетичних I_1 - про еквівалентний атомний номер речовини (що характеризує вміст заліза загального). З амплітудного аналізатора 7 через узгоджувальний каскад 8 сигнал, пропорційний відношенню інтенсивностей I_1/I_2 , подається на вхід ПЕОМ 10, де, за спеціально розробленою програмою, відбувається обчислення густини пульпи та вмісту заліза загального в ній.



1 - пульпопровід; 2 - вставка з немагнітного матеріалу; 3 - джерело низькоенергетичних гамма-квантів Am-241, 60 кеВ; 4 - джерело високоенергетичних гамма-квантів Cs-137, 660 кеВ; 5 - захисний контейнер; 6 - сцинтиляційний датчик; 7 - аналізатор імпульсів; 8 - узгоджувальний каскад; 9 - ПЕОМ; 10 - котушка індуктивності; 11 - генератор

Рисунок 1 – Блок-схема пристрою визначення вмісту заліза в пульпопроводі

Джерело: розроблено авторами

Вміст магнітної фракції заліза визначається за величиною магнітної провідності пульпи за допомогою датчика індуктивності 10, генератора частоти 11, з'єднаного з датчиком 10. Індуктивність датчика 10 пов'язана з магнітною провідністю пульпи, яка залежить від вмісту магнітної складової заліза в пульпі. Своєю чергою, частота генератора 11 пов'язана з індуктивністю датчика і, як наслідок, з магнітною провідністю пульпи. Таким чином, з генератора 10 на інший вхід ПЕОМ надходить сигнал про магнітну провідність пульпи, за величиною якого можна судити про вміст у пульпі заліза магнітного, але за умови сталості густини пульпи. Але оскільки ця умова не завжди витримується, то під час обчислення ПК вмісту в програмі враховується фактична на даний момент часу густина пульпи, визначена за допомогою гамма-датчика.

Пульпа готувалася з проб хвостів, рядової руди та концентрату шляхом порційного додавання по 20 г твердого до 200 мл води і подальшого їх перемішування. Після кожного додавання і перемішування проводилось 3-х кратне вимірювання

інтенсивності пройшовшого крізь пробу випромінювання при циклі однієї експозиції 60с. Початковий шар води в кюветі становив 50 мм. Після додавання твердого кінцевий об'єм пульпи становив 250 мл для «хвостів» і 235 мл для концентрату. Відповідно шар пульпи в кюветі становив 62 і 59 мм. Спочатку об'єм води становив 200 см^3 , після додавання 140 г твердого об'єм V пульпи і її густина ρ склали відповідно для:

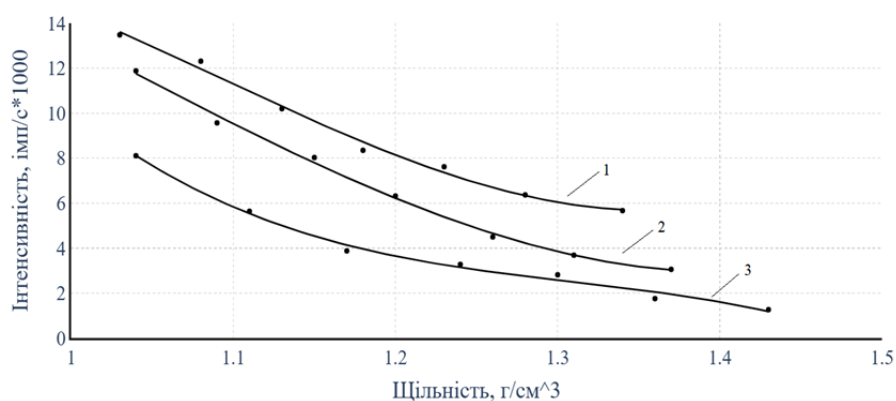
хвостів – $V = 250 \text{ см}^3$, $\rho = 1.36 \text{ г/см}^3$;

руди – $V = 245 \text{ см}^3$, $\rho = 1.39 \text{ г/см}^3$;

концентрату – $V = 235 \text{ см}^3$, $\rho = 1.45 \text{ г/см}^3$.

Таким чином, у процесі експериментів вміст твердого в пульпі змінювався від 0 до 41.2 % із проміжними значеннями 9 %; 16.6 %; 23 %; 28.6 %; 33.3 %; 37.5 %; 41.2 %. Щільність пульпи ρ також змінювалася відповідно.

На рисунку 2 наведено залежності інтенсивності випромінювання, що пройшло скрізь пробу, від вмісту твердого в пульпі за вмісту заліза загального 14.25%, 34.72%, 65.13%.



1 – Fe = 14.25%; 2 – Fe = 34.72%; 3 – Fe = 65.13%

Рисунок 2 - Залежність інтенсивності випромінювання від густини в пульпі за різного вмісту заліза загального

Джерело: розроблено авторами

У результаті досліджень, наведених на рисунку 2, отримано такі аналітичні рівняння та надійність апроксимації для:

хвостів:

$$y = 0.0197x^3 - 0.1308x^2 - 1.3913x + 15.116$$

$$R^2 = 0.993$$

руди:

$$y = 0.0164x^3 - 0.0558x^2 - 1.9458x + 13.786$$

$$R^2 = 0.998$$

концентрату:

$$y = -0.0528x^3 + 0.7962x^2 - 4.5146x + 11.869$$

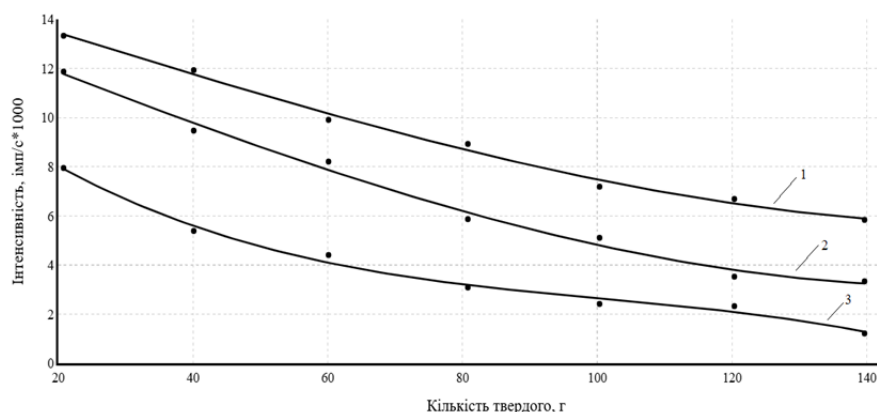
$$R^2 = 0.995$$

Для дослідження енергетичних спектрів проникаючого і розсіяного гамма-випромінювання різних джерел іонізуючого випромінювання на межах гетерофазних середовищ було розроблено датчик гамма-випромінювання.

В ході роботи було досліджено функцію

$$N = f(k, \rho, q)$$

де N - інтенсивність інтегрального потоку гамма-випромінювання, що пройшло крізь досліджуване середовище; k - кількість твердого; ρ - густина пульпи; q - масова частка корисного компонента гетерофазного середовища.



1 – Fe = 14.25%; 2 – Fe = 34.72%; 3 – Fe = 65.13%

Рисунок 3 - Залежність інтенсивності гамма-випромінювання від кількості твердого в пульпі

Джерело: розроблено авторами

Отримано наступні аналітичні рівняння та надійність апроксимації залежності інтенсивності гамма-випромінювання від кількості твердого в пульпі для:

хвостів:

$$y = 0.0131x^3 - 0.0515x^2 - 1.5796x + 15.004$$

$$R^2 = 0.994$$

руди:

$$y = 0.0142x^3 - 0.0199x^2 - 2.069x + 13.859$$

$$R^2 = 0.992$$

концентрату:

$$y = -0.0467x^3 + 0.7148x^2 - 4.1621x + 11.41$$

$$R^2 = 0.992$$

Аналіз отриманих результатів показав, що зміна твердого на 1% еквівалентна зміні вмісту заліза в твердому на 2.5...3.7% (залежно від діапазону вмісту). При цьому лінійний коефіцієнт поглинання випромінювання водою становив $0,146 \text{ см}^{-1}$.

За фіксованих значень вмісту твердого, залежність інтенсивності випромінювання, що пройшло крізь пробу, від вмісту заліза в діапазоні зміни вмісту від 14 до 65%, можна виразити наступним чином

$$N = N_0 e^{-0.0196q} \quad \text{– при вмісті твердого 33.3\%}$$

або

$$N = N_0 e^{-0.0246q} \quad \text{– при вмісті твердого 37.5\%}$$

де q - вміст заліза в твердому, %.

Порівнюючи вплив на інтенсивність випромінювання зміни вмісту твердого та вмісту заліза, можна зазначити, що зміна вмісту твердого (густина) на 1% призводить до більшої зміни інтенсивності, ніж зміна на 1% вмісту заліза.

Висновки. У результаті проведених досліджень отримано наступні результати.

1. Усереднені значення чутливості до зміни вмісту заліза при вмісті твердого 33.3% становлять 2.49% інтенсивності на 1% заліза. За вмісту твердого 37.5% це значення дорівнює 2.58% на 1%.

2. У діапазоні вмісту заліза 37 - 65% зазначені показники становлять 1.5% і 2.2% інтенсивності на 1% заліза.

3. Чутливість до зміни густини при фіксованому значенні вмісту заліза в твердому становить 4.4% інтенсивності на 1% зміни густини при вмісті 14.25% заліза в твердому. При вмісті заліза 34.72% зазначена чутливість становитиме 4.7%, а при вмісті 65% - 10.4%.

4. Максимальна чутливість до визначення заліза спостерігається при низьких вмістах заліза, при цьому спостерігається менший вплив густини (1% зміни густини \approx 1.5...2% зміни вмісту заліза).

Проведені експерименти підтвердили перспективність використання гамма-абсорбційного методу визначення вмісту заліза загального тільки в разі або сталості густини пульпи, або при введенні поправки на фактичне значення густини.

Список літератури

1. Кондратець В. О., Сербул О. М., Мацуї А. М. Автоматизація процесів керування розрідженням пульпи при подрібненні руди барабанными млинами. Кіровоград: КОД, 2013. 368 с.
2. Elsayed E. A. Overview of ITMK3 process. *International Journal of Industrial Engineering Research and Development*. 2017. Т. 8, № 2. DOI: 10.34218/ijierd.8.2.2017.001.
3. Jiang X., Wang L., Shen F. M. Shaft Furnace Direct Reduction Technology - Midrex and Energiron. *Advanced Materials Research*. 2013. Т. 805-806. С. 654–659.
4. Development of the method to operatively control quality of iron ore raw materials at open and underground extraction / A. Azaryan та ін. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Т. 5, № 95. С. 13–19. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.144003.
5. Дрига В. В., Швидкий О. В., Карачабан А. С. Контроль якості залізорудної сировини в порошкових пробах за допомогою пристрою ДЖМЗ-М1. *Якість мінеральної сировини*. Кривий Ріг, 2011. С. 180-184.
6. Influence of the Magnetic Field on Love Waves Propagation in the Solid Medium / O. Porkuian та ін. *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine, 22–24 April 2020. 2020. DOI: 10.1109/elnano50318.2020.9088802.
7. Пристрій для оперативного контролю масової частки заліза магнітного у гірській масі: патент 80694 / Азарян А.А., Дрига В.В., Цибулевський Ю.Є.; власник патенту ТОВ «Рудпромгеофізика»
8. Morkun V. S., Morkun N. V., Tron V. V. Automatic control of the ore suspension solid phase parameters using high-energy ultrasound. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2017. №. 3. С. 175–182. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-3-19.
9. Using the intensity of absorbed gamma radiation to control the content of iron in ore / A. Azaryan та ін. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Т. 3, № 5 (99). С. 29–35. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.170341.
10. A Compton scattering background subtraction method of gamma energy spectrum based on Gaussian function convolution / R. Qin та ін. *Radiation Physics and Chemistry*. 2024. С. 112-202. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2024.112202.
11. Determining the density of liquid using gamma scattering method / H. D. Chuong та ін. *Applied Radiation and Isotopes*. 2020. Т. 163. С. 109-197. DOI: 10.1016/j.apradiso.2020.109197.
12. Deep learning based Compton backscatter imaging with scattered X-ray spectrum data: A Monte Carlo study / C. Shi та ін. *Radiation Physics and Chemistry*. 2024. С. 112–148. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2024.112148.
13. Online analysis of iron ore slurry using PGNAА technology with artificial neural network / H. Huang та ін. *Nuclear Engineering and Technology*. 2024. DOI: 10.1016/j.net.2024.02.046.
14. XRD, internal field-NMR and Mössbauer spectroscopy study of composition, structure and magnetic properties of iron oxide phases in iron ores / M. Manjunatha та ін. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Т. 8, № 2. С. 2192–2200. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.01.022.

References

1. Kondratets, V. O., Serbul, O. M., & Matsui, A. M. (2013). *Avtomatyzatsiia protsesiv keruvannia rozridzhenniam pulpy pry podribnenni Rudy barabannymi mlynami [Automation of Pulp Dilution Control Processes in Ore Grinding with Drum Mills]*. Kirovohrad: KOD [in Ukrainian].
2. Elsayed, E. A. (2017). Overview of ITMK3 process. *International Journal of Industrial Engineering Research and Development*, 8(2). doi:10.34218/ijierd.8.2.2017.001.
3. Jiang, X., Wang, L., & Shen, F. M. (2013). Shaft Furnace Direct Reduction Technology - Midrex and Energiron. *Advanced Materials Research*, 805-806, 654–659.
4. Azaryan, A. (2018). Development of the method to operatively control quality of iron ore raw materials at

- open and underground extraction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(95), 13–19. doi:10.15587/1729-4061.2018.144003.
5. Dryha, V. V., Shvydkyi, O. V., & Karachaban, A. S. (2011) Quality Control of Iron Ore Raw Materials in Powder Samples Using the DZM3-M1 Device. *Yakist mineralnoi syrovyny*. Kryvyi Rih, 180-184. [in Ukrainian].
 6. Porkuian, O. (2020). Influence of the Magnetic Field on Love Waves Propagation in the Solid Medium. In *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. doi:10.1109/elnano50318.2020.9088802.
 7. Azarian, A. A., Dryha, V. V., & Tsybulevskiy, Yu. Yu. (2007). *Ukrainian Patent No. 80694*.
 8. Morkun, V. S., Morkun, N. V., & Tron, V. V. (2017). Automatic control of the ore suspension solid phase parameters using high-energy ultrasound. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, (3), 175–182. doi:10.15588/1607-3274-2017-3-19.
 9. Azaryan, A. (2019). Using the intensity of absorbed gamma radiation to control the content of iron in ore. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(5 (99)), 29–35. doi:10.15587/1729-4061.2019.170341.
 10. Qin, R., Li, C., Qin, Z., Zhang, Z., & Cai, J. (2024). A Compton scattering background subtraction method of gamma energy spectrum based on Gaussian function convolution. *Radiation Physics and Chemistry*, 112–202. doi:10.1016/j.radphyschem.2024.112202.
 11. Chuong, H. D., Hai Yen, N. T., My Le, N. T., & Tam, H. D. (2020). Determining the density of liquid using gamma scattering method. *Applied Radiation and Isotopes*, 163, 109-197. doi:10.1016/j.apradiso.2020.109197.
 12. Shi, C. (2024). Deep learning based Compton backscatter imaging with scattered X-ray spectrum data: A Monte Carlo study. *Radiation Physics and Chemistry*, 112–148. doi:10.1016/j.radphyschem.2024.112148
 13. Huang, H. (2024). Online analysis of iron ore slurry using PGNAA technology with artificial neural network. *Nuclear Engineering and Technology*. doi:10.1016/j.net.2024.02.046.
 14. Manjunatha, M. (2019). XRD, internal field-NMR and Mössbauer spectroscopy study of composition, structure and magnetic properties of iron oxide phases in iron ores. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(2), 2192–2200. DOI:10.1016/j.jmrt.2019.01.022.

Albert Azaryan, Prof., DSc., **Dmitriy Shvets**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,
Annait Trachuk, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Shvydkyi**²

¹*Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine*

²*LLC “Rudpromgeofizyka”, Kryvyi Rih, Ukraine*

Operational Control of Iron Content in Classifier Overflow Pulp using Gamma Radiation

The objective of the work is to study the possibility of real-time control of the mass fraction of iron in the multiphase medium using the gamma absorption method. The object of the research is the process of monitoring the iron content in the classifier drain pulp of an ore beneficiation plant. The research subject is the means of controlling the parameters of technological processes in concentrating factories based on nuclear-physical methods. The research methods are statistical analysis and laboratory studies of the factors affecting the accuracy of the gamma absorption method for determining the content of the valuable component in iron ore pulp.

During the work, an investigation was conducted on the possibility of real-time control of the iron content in the multiphase medium using the gamma absorption method. A gamma radiation sensor was developed to study the energy spectra of transmitted and scattered gamma radiation from various ionizing radiation sources at the boundaries of the multiphase medium. A device for real-time determination of the iron content in iron ore pulp under the conditions of a concentrating factory was considered, and the influence of disturbing factors on the control accuracy was investigated. Sets of samples were prepared with the iron content characteristic of concentrate, feed ore, and beneficiation tailings. Experimental studies were carried out on the influence of the iron ore pulp density and its solids on the intensity of the registered gamma radiation when using the gamma absorption control method.

As a result of the investigations, average values of the intensity sensitivity to changes in iron content for different solid levels in the sample were obtained. The sensitivity of intensity to changes in density at a fixed iron content in the solids was established. It was found that the maximum sensitivity for iron determination is observed at low iron contents, with a minor effect of density (1% change in density \approx 1.5...2% change in iron content).

The experiments confirmed the potential of using the gamma absorption method to determine the iron content only in the case of constant pulp density or introducing a correction for the actual density value.

nuclear physics methods, gamma radiation, quality control, pulp

Одержано (Received) 24.02.2025

Прорецензовано (Reviewed) 28.02.2025

Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025