

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

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗАТОРА ПРОБ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОДЕРЖАНИЯ ПОЛЕЗНОГО КОМПОНЕНТА В УСЛОВИЯХ ГОРНОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Цель. Разработка устройства, обеспечивающего точность определения содержания железа общего на уровне химического анализа, при этом доступного и простого в эксплуатации. Вес материала анализируемых разрабатываемым устройством экспрессного контроля проб не должен превышать 100г.

Метод. Для контроля содержания железа общего в пробах руд и продуктах их переработки предлагается использовать гамма-гамма метод.

Научная новизна. Предложено устройство, точность измерений которого сопоставима с методом химического анализа, позволяющее снизить временные затраты на проведение анализа содержания железа общего в пробах руд и продуктах их переработки.

Практическая значимость. Для определения содержания железа общего в рудах и продуктах их переработки на большинстве горнообогатительных комбинатов и шахт Украины используется метод химического анализа. Временные затраты на подготовку проб к химическому анализу и сам анализ составляют, в зависимости от вида сырья, от 0,8 до 2,5 часов. Такое запаздывание в получении информации о качестве руды или продуктов ее переработки не позволяет оперативно управлять процессом переработки сырья с целью его оптимизации, что в результате снижает эффективность работы горнодобывающих и перерабатывающих предприятий. Предлагаемый экспресс-анализатор позволяет уменьшить временные затраты на проведение анализа содержания железа общего в пробах руд и продуктах их переработки.

Результаты. Проведенные исследования показали, что разработанный экспресс-анализатор содержания железа общего в пробах руд и продуктах их переработки обеспечивает точность результатов анализов, не уступающую химическому методу. При этом затраты времени при использовании предложенного экспресс-анализатора на 1,5-2,0 часа меньше, чем на проведение химического анализа. Результаты экспериментальной работы подтвердили, что экспресс-анализатор проб пригоден для определения содержания железа в концентратах влажностью 9...12% без сушки материала проб, что позволяет сократить время получения результатов анализов еще примерно на 1 час.

Ключевые слова: железорудное сырье, гамма-гамма метод, экспресс-анализатор, оперативный контроль.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-54-58

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. На большинстве ГОКов и железорудных шахт Украины для определения содержания железа общего в рудах и продуктах их переработки используется химический метод. Затраты времени на подготовку проб к химическому анализу и сам анализ составляют, в зависимости от вида сырья, от 0,8 до 2,5 часов. Такое запаздывание в получении информации о качестве руды или продуктов ее переработки не позволяет оперативно управлять процессом переработки сырья с целью его оптимизации, что в результате снижает эффективность работы горнодобывающих и перерабатывающих предприятий. Следовательно, проблема экспресс-анализа минерального сырья с минимизацией цикла измерения является актуальной задачей.

Анализ исследований и публикаций. Анализ информации о положении дел с контролем качества сырья в мировой практике показывает, что достаточно широко используются экспрессные методы контроля, базирующиеся на физических методах, преимущественно радиометрических [1-3]. Как правило, используемые методы заключаются в облучении исследуемых проб источниками высокоэнергетического излучения и последующей регистрацией рассеянных частиц [4-10]. Перечень этих методов и средств их реализации довольно полно приведен в работе [11]. Однако стоимость этих средств на мировом рынке, требования к условиям их эксплуатации и к квалификации обслуживающего персонала довольно высоки. Это является существенными факторами, сдерживающими применение средств экспрессного контроля качества сырья на предприятиях Украины. При этом в Украине уже имеется опыт разработки и изготовления относительно дешевых и простых в эксплуатации устройств экспрессного определения содержания железа в рудах и продуктах их переработки. Например, радиометрические устройства типа ПАКС, разработанные проблемно-отраслевой лабораторией контроля и управления качеством минерального сырья при Криворожском национальном университете, эксплуатируются на

всех железорудных шахтах Украины с 1995г [12]. Физическая основа принципа работы этих устройств в основном близка к устройствам типа РСР, разработанным в 80-ые годы [13]. Использование подобных мобильных устройств позволяет сократить время анализа одной пробы до 1,9 ч. по сравнению с химическим методом. Массовому использованию подобных мобильных устройств препятствует ограниченная точность результатов контроля. Например, для шахт Кривбасса расхождения между результатами мобильных анализаторов содержания железа в пробах аглоруды и данными химических анализов составляют более одного процента, что не всегда удовлетворяет требованиям потребителей [14].

Постановка задания. Задача, поставленная перед разработчиками, заключалась в создании устройства, обеспечивающего точность определения содержания железа общего на уровне химического анализа, при этом относительно недорогого и простого в эксплуатации. Вес материала анализируемых разрабатываемым устройством экспрессного контроля проб не должен превышать 100г. Поставленное требование обусловлено необходимостью использовать существующее на горнорудных предприятиях оборудование для подготовки проб.

Изложение материала и результаты. В соответствии с поставленной задачей, проблемно-отраслевой лабораторией контроля и управления качеством минерального сырья при Криворожском национальном университете разработан экспресс-анализатор. Устройство предназначено для экспрессного определения содержания железа в пробах руд и продуктах их переработки гамма-гамма методом. Допустимая крупность материала проб – до 1мм.

Основное отличие данного устройства от устройств типа ПАКС заключается в конструкции блока датчика. Оно позволило использовать один источник гамма-излучения вместо нескольких, что существенно снизило стоимость устройства в целом. В то же время, в новом устройстве в качестве верхнего уровня может использоваться радиометр типа ПАКС с его пультом управления и детектором. Кроме того, для приема, обработки, хранения и визуализации результатов измерения можно использовать персональные компьютеры. Вариант пульта имеет большие возможности по обработке, хранению, отображению данных контроля. В шахтных условиях использование пульта управления на основе ПАКС целесообразнее, т.к. он более устойчив к воздействию внешних негативных факторов (запыленность, влажность, диапазон температур) и может успешно эксплуатироваться в агрессивных условиях.

Разработке нового устройства-анализатора предшествовали разработки различных методик подготовки материала проб к контролю и разработка новой конструкции кюветы для материала проб. Новой методикой предусмотрено прессование материала пробы давлением заданной силы, что обеспечило постоянство плотности материала пробы по объему кюветы. Новые методика подготовки пробы и конструкция кюветы позволили отказаться от необходимости использования нескольких источников излучения, сократить более чем в 10 раз вес материала пробы и довести его до 70г, улучшить воспроизводимость результатов измерений, снизить погрешности определения содержания железа. Как правило, воспроизводимость результатов измерений содержания железа устройствами РСР находится в пределах до 0,5%, в зависимости от диапазона содержания железа [13], а для созданного устройства-анализатора это значение не выходит за пределы 0,2% во всем диапазоне содержания железа.

Разработанные экспресс-анализаторы с 2006г. эксплуатируются на предприятиях Кривбасса. Они нашли свое применение на ОАО ЦГОК для экспрессного определения содержания железа общего в концентрате секций обогащения, а также на карьере "Северный" завода им. Ильича - для формирования объемов товарной руды заданного качества и определения содержания железа в отгружаемой продукции, а также на рудообогатительных фабриках и на ШУ ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог».

Использование экспресс-анализатора на карьере "Северный" позволило отказаться от проведения химических анализов. Наблюдения, проведенные при вводе устройства в эксплуатацию, показали, что среднеарифметическая величина расхождения между данными химических анализов проб и анализов описываемого устройства составила 0,194% абс., величина стандартного расхождения – 0,162. Эпизодические проверки работы устройства повторным химическим анализом проб показали, что расхождения данных в содержании железа не выходят за пределы $\pm 0,4\%$ абс.

На ОАО ЦГОК при такой же величине среднестатистического расхождения между данными химического анализа и показаниями анализатора имеются единичные случаи, когда значения

расхождений достигают 1% и более. Предположительно, одна из причин этого - нарушение методики подготовки проб к контролю на экспресс-анализаторе, а именно – различия во влажности проб. При этом нельзя исключить и погрешности результатов химического анализа. Последнее предположение базируется на том, что градуировки экспресс-анализатора приходится производить достаточно часто. При градуировках используются, преимущественно, дубликаты проб химических лабораторий тех предприятий, на которых предполагается использовать экспресс-анализатор. В процессе градуировки нередко возникали сомнения в достоверности данных химического анализа. Данные пробы отправлялись на повторный химический анализ, и в практике использования экспресс-анализатора не было случаев, чтобы подозрения, базирующиеся на результатах измерения содержания железа устройством, подтвердились, причем, иногда проведением даже 3-го или 4-го химического анализа. Для подтверждения сказанного, на рис.1 приведены данные первичных и повторных химических анализов одних и тех же проб и указано расхождение между данными первичного и повторных анализов. При этом отметим, что анализируемые пробы принадлежали двум предприятиям, имеющим свои химические лаборатории.

Причины столь высоких расхождений ($\Delta \gg 0,5\%$ допустимых для химических анализов) в данных химических анализов одних и тех же проб остаются неизвестными и их выяснение требует проведения дополнительных наблюдений. Если эти замеры отнести к случайным "выбросам", то настораживает большая вероятность (13%) этих "выбросов". Таким образом, в некоторых случаях причиной значительных расхождений в данных анализов проб устройством и химическим методом может служить недостоверность химических анализов.

Результаты первичных и повторных химических анализов железорудных проб приведены на рис.1.

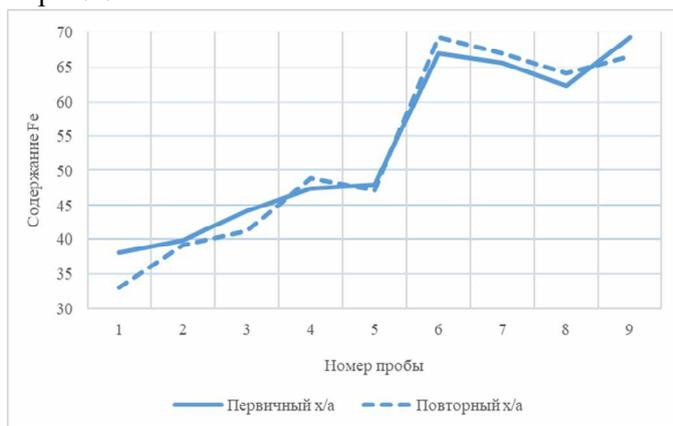


Рис. 1. Данные первичных и повторных химических анализов железорудных проб

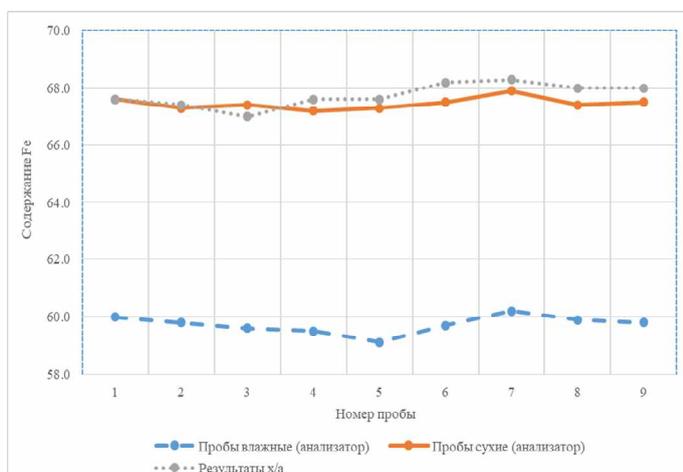


Рис. 2. Сравнение результатов анализов влажных и сухих проб при помощи экспресс-анализатора и результатов химического анализа

Использование нового экспресс-анализатора проб в условиях ЦГОК позволило примерно на час сократить время получения информации о качестве концентрата и, как следствие, иметь возможность более оперативно корректировать процесс обогащения при необходимости в этом. Однако, и в этом случае, время между отбором пробы и получением данных экспресс-анализа составляет почти час, причем основные затраты времени идут на сушку материала проб. Чтобы еще более сократить это время, была предпринята попытка использовать анализатор проб, проградуированный по сухим пробам, для анализа проб концентрата без их сушки, т.е. влажности 9...12%. В процессе экспериментов измерялась влажность проб, фиксировались значения содержания железа по показаниям анализатора проб, интенсивности рассеянного излучения влажных и высушенных проб, определялось содержание железа химическим методом, прогнозировались значения показаний анализатора проб после введения коррекции на влажность проб. Результаты отображены на рис. 2.

Результаты анализа показали, что при изменении влажности проб концентрата в пределах 9,6–12%, устройство показывает занижение содержания

железа в среднем на 7,72%, а диапазон занижений составляет 7,5-8,2%. С учетом средней величины занижений спрогнозированы показания экспресс-анализатора при вводе поправки на влажность или градуировке устройства по влажным пробам, которые приведены в столбце 9 табл. 1. Сравнение значений столбца 9 с данными химического анализа (столбец 8) одних и тех же проб показало, что средняя величина расхождений составляет 0,44%, а при анализе сухих проб – 0,38%, т.е. величины примерно равные. Безусловно, из-за ограниченного числа измерений делать утверждающие выводы о возможности использования анализатора для контроля содержания железа во влажных пробах концентрата преждевременно. Но стабильность величины занижений содержания во влажных пробах дает основания предположить, что при соответствующей градуировке устройства и доработке методики подготовки проб к контролю можно ожидать положительные результаты и при контроле влажных проб.

Таблица 1

Сравнение результатов анализов влажных и сухих проб при помощи экспресс-анализатора и результатов химического анализа

N, п/п	Влажность, %	Показания анализатора				$q_2 - q_1, \%$	$q_3, \text{Fe}, \% \text{ x/a}$	$q, \text{Fe}, \% \text{ коррек.}$
		Пробы влажные		Пробы сухие				
		$q_1, \text{Fe}, \%$	$N_1, \text{имп/с}$	$q_2, \text{Fe}, \%$	$N_2, \text{имп/с}$			
1	10	60.0	38970	67.6	36265	7.6	67.6	67.7
2	12	59.8	39033	67.3	36356	7.5	67.4	67.5
3	10	59.6	39091	67.4	36348	7.8	67.0	67.3
4	9.9	59.5	39200	67.2	36426	7.7	67.6	67.2
5	9.9	59.1	39370	67.3	36323	8.2	67.6	66.8
6	9.9	59.7	39012	67.5	36257	7.8	68.2	67.4
7	9.6	60.2	38568	67.9	35986	7.7	68.3	67.9
8	9.7	59.9	38746	67.4	36152	7.5	68.0	67.6
9	9.9	59.8	38789	67.5	36100	7.7	68.0	67.5
Ср. знач.	10.1	59,73		67.45		7.72	67.7	67.5

Анализируя результаты экспериментов, приведенные в табл. 1, нельзя не обратить внимание на некоторое противоречие, а именно в диапазоне изменения влажности от 9,6% до 12% величина поправки на влажность практически постоянна и не зависит от влажности материала проб, в то же время при изменении влажности от 0 до 9% поправка на влажность возрастает до 7,72%, т.е. в среднем увеличение влажности на 1% приводит к занижению содержания железа примерно на 0,8%. Это противоречие устраняется, если предположить, что зависимость величины поправки от влажности носит инверсионный характер, и зона инверсии находится в области 9...12% влажности. Данное предположение находит подтверждение в работе [15], где доказана инверсионность зависимости величины поправки от влажности материала проб. То, что в представленных исследованиях и данных работы [15] не совпадают по величине влажности значения зон инверсии (9...12% и 4...7% соответственно) объясняется различием крупности материала проб (-1мм и -5мм соответственно).

Выводы и направления дальнейших исследований. Подводя итог, можно отметить, что экспресс-анализаторы проб положительно зарекомендовали себя в работе при определении содержания железа общего в сухих порошковых пробах:

точность результатов анализов не уступает химическому методу;

затраты времени при использовании предложенного экспресс-анализатора на 1,5 – 2,0 часа меньше, чем на проведение химического анализа;

результаты экспериментальной работы подтвердили, что экспресс-анализатор проб пригоден для определения содержания железа в концентратах влажностью 9...12% без сушки материала проб, что позволяет сократить время получения результата анализов еще примерно на 1 час.

Список литературы

1. Using the intensity of absorbed gamma radiation to control the content of iron in ore / A. Azaryan, A. Gritsenko, A. Trachuk, V. Serebrenikov, D. Shvets // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 3, issue 5 (99). – P. 29–35. – DOI: 10.15587/1729-4061.2019.170341.
2. 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>.

3. **Azaryan A.** Research of influence single crystal thickness NaI (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>.
4. 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.
5. XRD, internal field-NMR and Mössbauer spectroscopy study of composition, structure and magnetic properties of iron oxide phases in iron ores / **M. Manjunatha, R. Kumar, A. Anupama [et al.]** // Journal of Materials Research and Technology. – 2019. – Vol. 8, issue 2. – P. 2192–2200. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.01.022.
6. Experimental and simulated study of detector collimation for a portable 3"×3" NaI(Tl) detector system for in-situ measurements / **K. U. Kiran, K. Ravindraswami, K. M. Eshwarappa, H. M. Somashekarappa** // Journal of Radiation Research and Applied Sciences. – 2015. – Vol. 8, issue 4. – P. 597–605. – DOI: 10.1016/j.jrras.2015.07.006.
7. **Makek M.** Scintillator Pixel Detectors for Measurement of Compton Scattering / **M. Makek, D. Bosnar, L. Pavelić** // Condensed Matter. – 2019. – Vol. 4, issue 1. – P. 24. – DOI: 10.3390/condmat4010024.
8. **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>.
9. Mössbauer forward scattering spectra of ferromagnets in radio-frequency magnetic field / **A. Y. Dzyublik, E. K. Sadykov, G. I. Petrov, V. V. Arinin [et al.]** // Yaderna fizyka ta enerhetyka. – 2013. – Vol. 13, issue 1. – P. 73–82. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/yadf_2013_13_1_12.
10. Using the intensity of absorbed gamma radiation to control the content of iron in ore / **A. Azaryan, A. Gritsenko, A. Trachuk, V. Serebrenikov, D. Shvets** // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 3, issue 5 (99). – P. 29–35. – DOI: 10.15587/1729-4061.2019.170341.
11. **Трачук А. А.** Состояние проблемы оперативного контроля качества минерального сырья / **А. А. Трачук, В. А. Азарян** // Качество минерального сырья : сб. науч. тр. – Кривой Рог, 1999. – С. 63–73.
12. Пат. № 38216А Україна МПК G01V 5/00. Пристрій автоматичного контролю вмісту корисного компоненту в мінеральній сировині / **А. А. Азарян, А. А. Трачук** ; заявник Криворізький технічний університет. – № 2000063325 ; заявл. 07.06.2000 ; опубл. 15.05.01, Бюл. № 4. – 4 с.
13. Методическое руководство по опробованию железных руд Кривбасса и КМА гамма-гамма-методом аппаратурой РСР / ВИОГЕМ. – Белгород, 1975. – 74 с.
14. **Бызов В. Ф.** Проблемы контроля и управления качеством минерального сырья и пути их решения / **В. Ф. Бызов, А. А. Азарян** // Качество минерального сырья : сб. науч. тр. – Кривой Рог, 2002. – С. 9–13.
15. **Василенко В. Е.** Исследование влияния влажности на точность контроля качества железорудного сырья гамма-гамма методом / **В. Е. Василенко** // Качество минерального сырья : сб. науч. тр. – Кривой Рог, 2002. – С. 230–237.

Рукопись поступила в редакцию 24.03.2020

УДК 622.274.3:622.224

С.В. ПИСЬМЕННИЙ, канд.техн.наук
Криворізький національний університет

МОДЕЛЮВАННЯ СТІЙКОСТІ ОЧИСНИХ КАМЕР ПРИ СЕЛЕКТИВНІЙ РОЗРОБЦІ СКЛАДНОСТРУКТУРНИХ РУДНИХ ПОКЛАДІВ

Мета. Метою виконаних досліджень є визначення стійкості міжкамерного цілика при розробці складноструктурних рудних покладів системами з відкритим очисним простором, що дозволить підвищити показники вилучення рудної маси за рахунок селективного виймання корисної копалини з виймального блоку.

Методи досліджені. На практиці існує велика кількість теоретичних та лабораторних методик по визначенню конструктивних елементів системи розробки з відкритим очисним простором, які дозволяють визначити параметри ціликів та оголень для статичного об'єкту. При селективній розробці родовищ виймальний блок необхідно розглядати як динамічний об'єкт. Тому, для визначення стійкого оголення в залежності від черги відпрацювання очисної камери в межах виймального блоку необхідно визначити дію еквівалентних напружень в міжкамерному цілику за допомогою чисельних методів, або програмних комплексів створених на основі чисельного методу.

Наукова новизна. Вперше за допомогою програмного комплексу ANSYS встановлено, що при формуванні цілика в виймальному блоці між очисними камерами в залежності від напрямку відпрацювання блоку в цілику еквівалентні напруження змінюються за параболічною функцією. Так, при відпрацюванні виймального блоку з лежачого до висячого боку еквівалентні напруження описуються параболічною функцією, а при веденні очисних робіт від висячого до лежачого боку – обернено-параболічною функцією.

Практична значимість. Відпрацювання складноструктурних покладів Криворізького залізрудного басейну селективним способом, системами з відкритим очисним простором, дозволить вилучати камерні запаси руди без додаткового засмічення пустими породами із збереженням міжкамерного цілика представленого безрудним чи рудним включенням.

Результати. Доведено, що відпрацювання виймального блоку селективним способом дозволить підвищити показники вилучення рудної маси. Відпрацювання блоку від висячого до лежачого боку зменшує концентрацію напружень в цілику з 30–35 МПа до 5–10 МПа, що сприяє підвищенню його стійкості в 1,5–2,0 рази. При відпрацю-