



**ОБЗОР ПУЛЬПОВЫХ АНАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРОДУКТОВ
ОБОГАЩЕНИЯ МАГНИТНОГО СЕПАРАТОРА**

**Н.В. Осипова (НИТУ «МИСиС», МГУ им. Н.Э. Баумана, Финансовый университет при
Правительстве РФ)**

Представлен обзор поточных пульповых анализаторов железа для обогатительных фабрик применительно к автоматизации контроля процесса мокрой магнитной сепарации. Рассмотрены магнитометрический, рентгенофлуоресцентный, радиометрический и комбинированный методы измерения. Приведено краткое описание известных фирменных решений в области отечественных и зарубежных разработок. Показаны их достоинства и недостатки. Выполнен сравнительный анализ приборов контроля железа в пульповом потоке по следующим параметрам: определяемые элементы, продукт обогащения, диапазон, погрешность и время измерения. Сформированы желаемые технические требования к поточному анализатору на железорудных обогатительных фабриках. Обозначена перспектива дальнейших исследований в области приборов контроля показателей магнитного обогащения.

Ключевые слова: анализатор, железо общее, железо магнетитовое, магнитометрический метод, рентгенофлуоресцентный метод, радиометрический метод, волны Лэмба, магнитная сепарация, концентрат, хвосты.

Введение

Минеральные запасы РФ по железорудным месторождениям насчитывают около 264 млрд. т. Эти полезные ископаемые весьма неоднородны по своему составу и чаще всего содержат такие компоненты, как магнетит, гематит, лимонит и сидерит. Для их извлечения руда проходит ряд технологических операций, начиная с добычи, рудоподготовки и заканчивая непосредственно обогащением. Для отделения ценного компонента от пустой породы большое распространение получил процесс мокрой магнитной сепарации. Очень важно, чтобы в последующие металлургические переделы, например, агломерацию, доменную, электродуговую плавку, поступала железорудная шихта заданного качества. Технологический процесс магнитной сепарации должен быть оптимизирован по критерию минимальных потерь ценного компонента в хвостах. Поэтому на обогатительной фабрике актуальна задача оснащения производства достоверными и оперативными средствами поточного контроля содержания железа.

Согласно технологического регламента, в лабораторных условиях на основе химического анализа принято определять железо общее и магнетитовое в хвостах и концентрате. В зависимости от их содержания в лабораторном образце меняются требования к ошибке анализа. В табл. 1 приведены данные о максимальной абсолютной ошибке измерения железа магнетитового и общего в зависимости от их массовой доли в пробе при доверительной вероятности 0,95.

Анализируя показатели обогащения железорудных ГОКов, можно сделать вывод, что содержание железа магнетитового в хвостах составляет < 4%, общего — < 18%, в концентрате магнетитового и общего — < 75%. Поэтому, исходя из выше приведенных данных, максимальная абсолютная ошибка измерения для первого показателя равна 0,3...0,4%, для второго — 0,28%, для последних — 0,5...0,9%.

Магнитный сепаратор как объект управления обладает рядом особенностей. В процессе работы на него действует множество возмущений, связанных с нестабильностью свойств исходного питания. К свойствам исходного питания относятся: содержание железа в руде, удельный расход пульпы, содержание класса < 0,074 мм (ГОСТ 27562-87), средняя крупность, процент твердого, плотность пульпы, магнитная восприимчивость и т.д. К управляющим воздействиям, как правило, относят расход воды в ванну сепаратора и частоту вращения его барабана [1]. Даже если добыча руды происходит с одного участка карьера и оборудование работает стабильно, наблюдаются

Таблица 1. Максимальная абсолютная ошибка измерения железа магнетитового и общего в зависимости от их массовой доли в пробе

Железо магнетитовое		Железо общее	
Содержание в пробе, %	Максимальная абсолютная ошибка измерения, %	Содержание в пробе, %	Максимальная абсолютная ошибка измерения, %
до 2	0,3	10...20	0,28
2...5	0,4	20...50	0,3
5...15	0,6	50...75	0,5
15...30	0,7	-	-
30...50	0,8	-	-
> 50	0,9	-	-

колебания свойств пульпы, которые имеют неравномерный характер распределения как по частоте, так и по амплитуде. Кроме того, возмущения могут быть инерционными, малоинерционными, безынерционными и импульсными. Время установления той или иной характеристики пульпы в определенное значение составляет для первого типа порядка нескольких десятков минут, для второго — несколько десятков секунд, для третьего — это скачкообразное изменение свойств. Магнитный сепаратор в динамическом отношении представляет собой аperiodическое звено первого порядка с постоянной времени в пределах 1...10 с. Для обеспечения заданных показателей обогащения необходимо разработать оптимальную систему управления, которая решала бы задачи идентификации, фильтрация данных и регулирования. Требуется точное определение постоянной времени и коэффициента усиления объекта, так как по этим данным настраивается регулятор. Также важна фильтрация показаний анализаторов для последующего поступления в регулятор менее зашумленной информации, что повышает качество управления магнитной сепарацией. Для решения данных задач необходимо, чтобы время измерения содержания железа (шаг опроса датчика) не превышало 1/3 от постоянной времени объекта¹.

Известными методами контроля железа в пульповом потоке являются: магнитометрический, рентгенофлуоресцентный, радиометрический, комбинированный.

Магнитометрический метод

Магнитометрический метод основан на измерении магнитной восприимчивости рудного материала. Различия анализаторов заключаются, в основном, в конструктивном исполнении и способе обработки информации. Все приборы имеют пробозаборник, по которому стекает анализируемая пульпа, клапаны для открытия/закрытия подачи в него вещества и узла промывки с подключением к водопроводу. Также в конструкцию входит катушка индуктивности, через которую пропускается ток, создающий магнитное поле с напряженностью, обратно пропорциональной магнитной восприимчивости. Для измерения магнитного потока такие устройства обычно дополняют измерительной катушкой. Коэффициенты и вид функции, которую используют для перерасчета измерений в содержание железа, находят с использованием регрессионного анализа, где фактором является магнитная восприимчивость (или функциональные преобразования над ней), а зависимой переменной — процентное содержание железа в исследуемых пробах, найденное по результатам химического анализа. В большинстве случаев корректировку коэффициен-

тов выполняют в зависимости от средней крупности, плотности пульпы, процента твердого и т. д.

Примерами приборов с магнитометрическим методом измерения служат: анализатор потерь магнетита АПМ-2 производства АО «Союзцветметавтоматика» (Москва), анализатор содержания магнетита АСМ-1 компании ООО «РАСТР1» (Украина, г. Запорожье) и система контроля качества СКК-5, разработанная сотрудниками ОАО «СГСТУ ВИОГЕМ» (г. Белгород).

Анализатор АПМ-2 имеет пробозаборник с определенным числом питающих отверстий, вмонтированный в трубопровод. Пульпа стекает в пробозаборное устройство с катушкой индуктивности. Его промывка осуществляется с помощью регулирования вентиля на водопроводе. Устройство имеет систему управления для распределения работы на три цикла: промывка, накопление материала в пробозаборнике, пропускание тока через катушку (измерение). Недостатками анализатора являются засор питающих отверстий, зависимость показаний от плотности пульпы, ее расхода и гранулометрического состава.

Анализатор АСМ-1 имеет похожий принцип построения и измерения.

Система СКК-5 была внедрена и испытана на Михайловском ГОКе. Она включает вертикальный пробозаборник, вмонтированный в трубопровод. В его средней части расположен преобразователь с запорным клапаном и катушкой индуктивности, которые разделяются между собой магнитоэкранирующей перегородкой. Нижний конец пробозаборника используется для выхода пульпы. Работа анализатора базируется на измерениях магнитной восприимчивости на начальной, промежуточной и конечной стадиях осаждения частиц пульпы и относительного среднего диаметра ее частиц. Эти данные используются для расчета содержания железа с применением коэффициентов, определяемых по тарировочным графикам проб лабораторного анализа. Достоинством системы является возможность дополнительного контроля содержания железа класса 0,044 мм в концентрате и плотности пульпы [2].

В устройстве для определения содержания ферромагнетика ТОО «Магнетит»², в отличие от системы СКК-5, измеряют магнитную восприимчивость при воздействии на рудный материал после процесса измельчения наложенными взаимно перпендикулярными магнитными полями переменным и постоянным стабилизированным. Затем замеры производят в концентрате (осажденной твердой фазе) на последней стадии магнитной сепарации при создании аналогичных полей, но магнитную восприимчивость измеряют при наложении переменного поля и окон-

¹ Рекомендации по выбору шага и времени моделирования для проведения компьютерного эксперимента по снятию переходных характеристик динамических звеньев (<https://helpiks.org/3-66022.html>).

² Патент РФ № 2073855, 20.02.1997. Раннев Б. А., Раннев К. Б., Маргулис В. С. и др. Способ определения содержания ферромагнетика и устройство для его осуществления. 1997.

чании воздействия постоянного поля. Содержание железа в концентрате находят через соотношения восприимчивостей, измеренных при наложенных полях — переменном поле в измельченной руде и концентрате с использованием коэффициентов регрессии по тарировочным графикам. Анализ происходит с максимальной абсолютной погрешностью 0,42%. Недостатком является несвоевременность сбора информации из-за большого запаздывания между первой стадией измельчения и последней стадией мокрой магнитной сепарации. Колебания плотности и грансостава дают существенную погрешность измерения.

Способ для автоматического измерения содержания магнетита в твердой фазе железорудных пульп³ реализует дополнительную систему контроля уровня осадка в пробе и характеризуется наличием весоизмерительного блока массы твердой фазы для создания точного дозирования. Масса пульпы, необходимая для получения заданной массы осадка, вычисляется через заданную массу осадка, массу постоянного объема пульпы, удельную массу рудных частиц, постоянный объем пульпы. Недостатком устройства служит неверное предположение о постоянной удельной массе рудных частиц.

Прибор фирмы Взлет ЭМР-КМ [3] больше зарекомендовал себя как электромагнитный расходомер, датчик скорости рудопотока, а также измеритель объемных расходов твердой и жидкой фазы. Его опытные образцы были спроектированы и испытаны на Лебединском ГОКе. Однако в работе [3] представлены некоторые технические требования для использования его в качестве анализатора магнетита. Устройство имеет две катушки — сверху и снизу трубопровода и два электрода, расположенных по его центральной горизонтальной оси. При создании антисимметричного магнитного поля относительно горизонтальной линии, соединяющей электроды, разность потенциалов на них характеризует скорость рудопотока. Зная напряжение на электродах, ток питания катушек и напряжение на них, можно вычислить процентное содержание магнетита, объемный расход жидкой и твердой фазы пульпы, через которые можно пере считать объемную долю твердого.

Рентгенофлуоресцентный метод

Рентгенофлуоресцентный метод использует источник первичного излучения — рентгеновскую трубку. В результате взаимодействия излучения с веществом электроны удаляются из атомных оболочек, это вызывает выброс энергии в виде флуоресцентного (характеристического излучения). Вакансия заполняется электронами из разных энергетических уровней. При таком переходе линии спектра получают с помощью спектрометров волновой или энергетической дисперсии.

В первом случае применяются коллиматоры. Выделение определенного компонента из спектра основано на дифракции рентгеновского излучения на кристаллической решетке монохроматора. После отражения, проходя через второй коллиматор, формирующий вторичный спектр, поток попадает на детектор. Во втором типе спектрометров первичное излучение не проходит коллиматоры и монохроматор. В качестве детекторов используются сцинтилляторы, способные при поглощении спектра излучать свет. В зависимости от типа элемента рудной фазы интенсивность излучения по-разному связана с массовой долей элемента. В случае определения только железа прибор настраивается на определенный канал по заданной длине волны [4, 5]. Свет собирается на фотоприемнике, например, фотоэлектрическом умножителе, реже фотодиоде. Далее происходит его преобразование в электрический сигнал, усиление, оцифровка АЦП, обработка на компьютере и выдача информации.

Взаимосвязь между содержанием железа и энергией спектра определяется аналогично магнитометрическому методу путем построения регрессионной зависимости по тарировочным пробам лабораторного анализа.

По данному методу реализованы анализаторы АРП-1Ц производства ООО «Теханалитприбор», РА-931 фирмы Элскорт (Москва), АР-31,35 АО НПП «Буревестник» (г. Санкт-Петербург), ХРА-1600 производства Svedala autometrics (США, г. Денвер), Courier 300, 30, 30XP, 5i SL, 6i SL компании Outotec (Финляндия, г. Эспоо), XRF фирмы DFMC (Китай, г. Даньдун).

Особенностью анализатора АРП-1Ц является универсальность применения. Он может измерять содержание компонентов как в сухой руде, так и в пульпе практически на всех этапах обогащения. Прибор устанавливается как на поток, так и используется совместно с автоматизированной системой доставки проб. Анализатор работает дополнительно в режиме измерения процента твердого и плотности пульпы.

Анализатор АР-35 работает совместно с автоматизированным комплексом доставки проб. Для измерения прибор оснащен передвижной программно-управляемой головкой с рентгеновской трубкой и определенным числом спектрометрических каналов, соответствующим измеряемым элементам. По заранее заложенный в блок управления программе головка обходит по очереди все кюветы с пробами. Данный анализатор полностью совместим с системами автоматизации пробоотбора, обработки результатов и хранения данных анализа.

Предшественником данного анализатора является АР-31, отличающийся от него лишь способом управления перемещением спектрометрического блока. Он был внедрен на обогатительной фабрике Эрдэнэт (Монголия).

³ Авторское свидетельство № 1000883, 28.02.1983. Кучер В. Г., Кучма В. И., Лопатин В. И. и др. Устройство для автоматического измерения содержания магнетита в твердой фазе железорудных пульп. 1983. Бюл. № 8.

Недостатками приведенных выше анализаторов являются сильная деформируемость окна рентгенопрозрачной пленки, что снижает точность измерений, большая масса (порядка 1,5 т), высокое энергопотребление (порядка 5 кВА), громоздкая система водяного охлаждения рентгеновской трубки мощностью порядка 2...3 кВт.

Компенсировать эти недостатки позволило изобретение автоматического рентгеновского анализатора пульп и растворов в потоке ЗАО «Изготовление, Внедрение, Сервис»⁴, в котором предусмотрена термоэлектрическая стабилизация температуры спектрометрического блока, детектор вторичного излучения выполнен с термоэлектрическим охлаждением, источником первичного излучения служит малогабаритная рентгеновская трубка мощностью до 10 Вт.

Анализатор XRF позволяет выполнять отбор проб и анализировать результаты круглосуточно без участия оператора. Своевременное обнаружение отклонений показателей процесса обогащения фиксируются на ранней стадии, что позволяет мгновенно их корректировать и повышает степень извлечения железа в концентрат и объем выпуска продукции. Анализатор выполнен по модульному принципу, что облегчает модернизацию и ремонт.

Анализатор Courier 30 эксплуатируется совместно с системой отбора и доставки проб с использованием насосов и мультиплексоров. Определяет до пяти элементов в десяти точках контроля путем поочередного пропускания проб через одну кювету. Однако при этом узел клапана пробоотборника выходит из строя через каждые две недели.

Анализаторы средней мощности Courier 5i SL и высокой мощности 6i SL могут одновременно определять до 12 элементов, а также измерять содержания твердых частиц в пульпе. Точность измерения зависит от состава пробы и размера частиц. В устройстве имеется термоэлектрический охладитель, а также встроенные и удаленные средства диагностики. Особенностью анализаторов Courier 5i SL и 6i SL является отсутствие большого напора пульпы, что позволяет доставлять пробу самотеком без насоса. Весь поток исследуемых проб с помощью шланга с приводом направляется в магистраль или питающий резервуар, откуда они поступают на анализ. Для последовательного контроля проб применяется мультиплексор. Программное обеспечение Courier удобно тем, что включает локальный пользовательский интерфейс с результатами замеров, линиями тренда и диагностическим состоянием. С его помощью легко осуществлять настройку, калибровку анализатора, сбор диагностических данных, создавать журналы и отчеты о результатах измерений и отправлять их операторам по заводской локально-вычислительной сети.

Из-за использования маломощной рентгеновской трубки у системы XRA-1600 соотношение сиг-

нал/шум в 2,6 раза ниже, чем у Courier-30 и в 7...8 раза ниже, чем у Courier-30 XP. На фоне высокого излучения он обладает низкой чувствительностью и точностью определения железа с малым содержанием. Две системы XRA-1600 и Courier-300 внедрены на обогатительной фабрике Chino (США).

С помощью анализатора PA-931 осуществляется контроль 16 точек 4...12 элементов одновременно. Имеется возможность настройки, регулирования, хранения и обработки измерительной информации в автоматическом режиме. Конструктивно анализатор монтируется в технологический поток на трубы, имеет преобразователь информации, 16-канальный мультиплексор и компьютер с необходимым программным обеспечением.

Радиометрический метод

Радиометрический метод контроля по принципу построения и обработки информации аналогичен рентгенфлуоресцентному, но источником вместо рентгеновской трубки служат гамма-излучатели.

Среди гамма-анализаторов можно выделить Amdel ISA компании Termogammametrics (Австралия), DF-5735 производства Восток (Китай, г. Даньдун) и анализатор пульпы железа фирмы DFMC (Китай, г. Даньдун).

Анализатор DF-5735 проводит анализ без запаздывания, высокочувствительные детекторы не контактируют с измеряемой средой, что исключает быстрое изнашивание оборудования. В устройстве уменьшено число радиоактивных источников, что обеспечивает безопасность излучения.

Анализатор железа пульпы фирмы DFMC осуществляет ежесекундный контроль, включает сцинтилляционный детектор с высокой чувствительностью и эффективностью, что снижает воздействие радиации.

Контроль содержания элементов прибором Amdel ISA основан на энергодисперсионном методе. Данный анализатор имеет оптимальное соотношение сигнал/шум, обладает системой автоматической стабилизации интенсивности источника и работы детектора, что повышает точность измерений. Имеет три модификации: MEP (multi-element probe) с погружными зондами для анализа до восьми элементов; SEP (single-element probe) с погружными зондами для определения только одного элемента; MSA (multi-stream analyze) с мультиплексорами для переключения пробы от потоков пульпы. В первых двух отсутствует пробозаборное устройство и система прободоставки, контроль проводится непосредственно на месте, что улучшает эффективность использования.

Общими недостатками рентгенофлуоресцентных и гамма-анализаторов является наличие требования к проведению периодического радиационного контроля и специального разрешения на право работы

⁴ Патент РФ № 2594646, 20.08.2016. Зимин А. В., Никандров И. С., Захаров П. А., и др. Автоматический рентгеновский анализатор пульп и растворов в потоке. 2015. Бюл. № 23.

Таблица 2. Известные поточные анализаторы железа в пульпе

№	Название/производитель	Определяемые элементы	Продукт обогащения	Диапазон измерения, %	Максимальная абсолютная ошибка измерения, (точность, погрешность), %	Время измерения, мин.		
Магнитометрический метод								
1.	АПМ-2, АО «Союзцвет-метавтоматика» (Москва)	железо магнетитовое	хвосты	0...10	нет данных	3...8		
2.	АСМ-1, ООО «РАСТР1» (Украина, г. Запорожье)					2...10		
3.	СКК-5, ОАО «СГСТУ ВИОГЕМ», г. Белгород	железо общее	концентрат	нет данных	нет данных	7...30		
		железо магнетитовое	хвосты					
Рентгенофлуоресцентный метод								
4.	АРП-1Ц, ООО «Теханалитприбор» (Москва)	от кальция до урана	концентрат, хвосты	0,05...70	ошибка 2	0,3...15		
5.	АР-31, АО НПП «Буревестник» (Санкт-Петербург)			нет данных	погрешность ≤ 5 , ошибка $\leq 0,1$	30		
6.	АР-35, АО НПП «Буревестник» (Санкт-Петербург)			0,001...0,05	ошибка 0,3	0,3...1,7		
7.	XRF, DFMC (Китай, г. Дандун)			0,001...100	относительная погрешность 0,5...20 (от веса), стабильность $\leq 0,3$	1		
8.	XRA-1600, Svedala autometrics, (США, г. Денвер)			0,005...100	погрешность 5	0,3		
9.	Courier 300, Outotec (Финляндия, г. Эспоо)			нет данных	нет данных	0,3		
10.	Courier 30XP, Outotec, (Финляндия, Эспоо)					0,25...0,5		
11.	Courier 30, Outotec, (Финляндия, Эспоо)			нет данных	погрешность 5-10, стабильность измерений $\leq 0,1$	0,25...0,5		
12.	Courier 5i SL, Outotec, (Финляндия, Эспоо)			0,004...100	точность 3...6 для малых концентраций, 1...7-для больших концентраций, стабильность измерений $\leq 0,1$	1		
13.	Courier 6i SL, Outotec, (Финляндия, Эспоо)					0,25...0,5		
14.	РА-931, Элскорт, (Москва)			от титана до урана		0,005...70	погрешность -5	0,6...5
Радиометрический метод								
15.	DF-5735, Восток (Китай, г. Дандун)			от кальция до урана	концентрат, хвосты	нет данных	точность 0,5, стабильность подсчета гамма-лучей и повторяемость $\leq 0,1$	нет данных
16.	Amdel ISA, Termogammametrics, (Австралия)						погрешность 2...5, точность 0,5	1
17.	Анализатор пульпы железа, DFMC, (Китай, г. Дандун)	0,02						

с источником ионизирующего и гамма-излучения, оказывающего вредное влияние на здоровье обслуживающего персонала.

Комбинированный метод

Для компенсации недостатков выше приведенных реализаций используется комбинированный метод. Его техническое обеспечение основано на применении двух измерительных блоков: одного для дополнительного контроля объемной доли твердой фазы во избежание постоянной подстройки анализаторов, что осуществляется, как правило, ультразвуковым методом, второго для определения массовой доли полезного компонента.

Для измерения объемной доли твердого вещества в потоке используются волны Лэмба, которые распространяясь по одной из стенок измерительного блока на расстояние определенной длины, излучают энергию в жидкость. Волны формируются посредством призмы и излучающегося пьезопреобразова-

теля. Пройдя заданное расстояние, они поступают на формирующую призму и приемный преобразователь упругих ультразвуковых колебаний в электрический сигнал. Логарифм отношения интенсивностей волн Лэмба на входе и выходе измерительного модуля прямо пропорционально объемной доли твердого.

Второй блок содержит соленоид. При пропускании постоянного тока через него внутри создается однородное магнитное поле. При его изменении меняется и поток магнитной индукции, для измерения которого используется дополнительная катушка с гальванометром. В результате в ней возникает электродвижущая сила. В цепи гальванометра течет кратковременный ток. Величина заряда пропорциональна магнитной индукции. В работе [6] получено расчетное соотношение, позволяющее вычислить содержание магнетита, зная отношения интенсивностей волн Лэмба, плотности воды, материала стенок измерительного блока, немагнитной фазы, магнетита, величину намагниченности магнетита, заряда,

постоянного тока соленоида, конструктивные параметры датчика. В случае отсутствия ультразвукового контроля в выражении присутствовала бы объемная доля твердого в пульпе.

В приведенной разработке авторы не указали погрешность анализатора, время измерения и диапазон. Также не имеется сведений о практическом применении датчика. Достоинством является отсутствие пробоотборника, что может создать возможность для повышения скорости измерения.

Заключение

Сравнительные характеристики поточных анализаторов железа в пульпе приведены в табл. 2. Информация о большинстве из них раскрыта изготовителями не полностью, поэтому некоторые параметры отсутствуют.

Общим недостатком всех приборов является невозможность обеспечения контроля с периодичностью, составляющей $\leq 1/3$ с, то есть $1/3$ от минимальной постоянной времени сепаратора. Наиболее экологически безопасными и дешевыми являются анализаторы, реализованные по магнитометрическому методу, однако, кроме СКК-5, они способны измерять только железо магнетитовое, к тому же отсутствуют данные о погрешности измерения. У приборов АПМ-2 и АСМ-1 малый диапазон измерения, что позволяет использовать его только для определения содержания ценного компонента в хвостах, то есть для оценки потерь.

По данным анализаторов, реализованных по рентгенофлуоресцентному и радиометрическому методу, не ясно, имеется ли возможность определять одновременно массовую долю железа общего и магнетитового. По приборам Courier 300 и Courier 30XP не предоставлена информация о диапазоне и погрешности измерения. У анализаторов Courier 30 и DF-5735 также нет данных о диапазоне обнаружения, у DF-5735 неизвестно время анализа.

Подводя итоги выше сказанному, сформулируем желаемые основные технические требования к поточному анализатору для железорудных обогатительных фабрик:

— измеряемые элементы: железо общее, магнетитовое;

— продукт обогащения: концентрат, хвосты;

— диапазон измерения 0...75%;

— максимальная погрешность измерения: при массовой доле магнетита до 2% — 0,3%, при 2...5% — 0,4%, при 5...15% — 0,6%, при 15...30% — 0,7, при 30...50% — 0,8%, > 50% — 0,9%; при массовой доле железа общего от 10...20% — 0,28%, при 20...50% — 0,3%, при 50...75% — 0,5% при доверительной вероятности 0,95;

— время измерения — $\leq 1/3$ с.

Осипова Нина Витальевна — канд. техн. наук, доцент НИТУ «МИСЦ», МГТУ им. Н. Э. Баумана, Финансового университета при Правительстве РФ.
E-mail: nvo86@mail.ru

Приведенный обзор современных поточных анализаторов показал, что наиболее перспективным является магнитометрический метод определения железа с дополнительным контролем объемной доли твердого в потоке электромагнитным способом во избежание постоянной подстройки. Он обладает рядом положительных характеристик, таких как безопасность, отсутствие специального разрешения для работы и постоянных проверок, универсальность (содержание железа и объемная доля твердой фазы контролируются только магнитометрическим методом), дешевизна, простота конструкции, возможность снятия показаний с высокой частотой без отбора проб. Перспективой дальнейших исследований является модернизация конструктивного исполнения катушек, измерительной части датчика, алгоритма создания магнитного поля в трубопроводе, перепрограммирование вычислительного блока с заданием новых тарифовочных коэффициентов перерасчета магнитной восприимчивости в содержание железа, настройка на более высокочастотный опрос и опробование на последней стадии магнитной сепарации. Внедрение нового анализатора позволит повысить эффективность управления процессами обогащения путем проведения поточных оперативных измерений общего и магнетитового железа в концентрате и хвостах в режиме реального времени.

Список литературы

1. *Osipova N.V.* Model of stabilization of the quality of iron-ore concentrate in the process of magnetic separation with the use of extreme regulation, *Metallurgist*. 2018. vol. 62, nos. 3-4. pp. 303-309. DOI 10.1007/s11015-018-0660-8.
2. *Шафоростов А.П., Гзогян Т.Н., Губин С.Л.* Система определения содержания ферромагнетика в пульпе // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2003. — № 3. — С. 38-40.
3. *Овчинников А.П.* Электромагнитный расходомер для измерения ферромагнитных пульп // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 10. С. 302-305.
4. *Li Y.-N., Xu Z.-B.* Determination of total iron in iron ore based on ensemble neural network-X-ray fluorescence spectrometry. *Yejin Fenxi/Metallurgical Analysis*. 2019. № 39(1). pp. 35-41. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1000-7571.010504.
5. *Zhang Y.-S., Sun X.-T., Yuan H. and others.* Determination of potassium, sodium and zinc in iron ore by X-ray fluorescence spectrometry with pressed powder pellet. *Yejin Fenxi/Metallurgical Analysis*. 2019. № 39(1). pp. 72-76. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1000-7571.010378.
6. *Поркуян О.В., Сотникова Т.Г.* Комбинированный метод определения относительного содержания магнетита в твердой фазе железорудной пульпы // Вестник Национального технического университета «Харьковский Политехнический Институт». 2010. № 12. С. 29-36.