УДК 622.37

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ОТБОР И АНАЛИЗ ПРОБ НА КОНВЕЙЕРНОЙ ЛЕНТЕ В РАМКАХ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Шарифжанова Н.М, Якубов М.С.Кувнаков А.Э

Аннотация: *Статья посвящена анализу современного состояния вопроса управление многостадийными процессами и направлениями развития их эффективности. Особое внимание уделяется повышение надежности и эффективности производства, улучшение качества всего продукта, более рациональное использование имеющихся мощностей, быстрое внедрение современной науки и техники, дальнейшее совершенствование методов и средств контроля. В статье рассматриваются вопросы автоматизации отбора проб и анализа проб на ленточном конвейере в рамках горных работ. АСТПУ осуществляется с помощью специальных приборов, обеспечивающих непрерывный контроль за качество руды на стадии ее добычи и транспортировки. Использование предложенного автоматический рентгеноанализатор пульп и растворов в потоке позволяет расширить ассортимент и количество одновременно определяемых элементов.*

Ключевые слова: *флотация, оптимизация, автоматизированные системы управления технологическими процессами, химический анализ, ленточный конвейер, щековая дробилка, контроль качества потока руды, рентгенофлуоресцентный.*

Annotatsiya: *Maqola ko‘p bosqichli jarayonlarni boshqarish masalasining hozirgi holati va ularning samaradorligini oshirish yo‘nalishlarini tahlil qilishga bag‘ishlangan. Ishlab chiqarish ishonchliligi va samaradorligini oshirish, butun mahsulot sifatini oshirish, mavjud quvvatlardan yanada oqilona foydalanish, zamonaviy fan va texnika yutuqlarini jadal joriy etish, nazorat qilish usul va vositalarini yanada takomillashtirishga alohida e’tibor qaratilmoqda. Maqolada tog‘-kon ishlarining bir qismi sifatida konveyer lentasida namunalar olish va tahlil qilishni avtomatlashtirish masalalari ko‘rib chiqiladi. ASTP rudani qazib olish va tashish bosqichida uning sifatini doimiy monitoringini ta’minlaydigan maxsus asboblar yordamida amalga oshiriladi. Oqimdagi pulpa va eritmalarning tavsiya etilgan avtomatik rentgen analizatoridan foydalanish bir vaqtning o‘zida aniqlangan elementlarning diapazoni va sonini kengaytirish imkonini beradi.*

Kalit so‘zlar: *flotatsiya, optimallashtirish, texnologik jarayonlarni boshqarishning avtomatlashtirilgan tizimlari, kimyoviy tahlil, lenta konveyer, jag‘ maydalagich, ruda oqimi sifatini nazorat qilish, rentgen-fluoresans.*

Введение

Современные автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУТП) обогатительных фабрик являются сложными многостадийными комплексами на базе технических средств, включающих автоматические датчики технологических параметров, исполнительные органы и средства вычислительной техники. Развитые АСУТП охватывают все переделы обогатительного производства, начиная от приема руды и заканчивая отгрузкой готового концентрата.

Одним из этапов обогащения руд полезных ископаемых является точный химический анализ представляющей жизненно важные данные для улучшения горных работ, в частности добычи на рудниках, и оптимизировать смешивание добытого материала.

Однако отправка образцов в лаборатории может вызвать задержки от нескольких часов до нескольких дней. Кроме того, собранные вручную пробы могут быть не репрезентативными. Автоматизация данного процесса и анализ образцов на месте повысит производительность. Это можно сделать путем автоматического отбора проб на конвейерной ленте (рис. 1)

Обсуждение.

Автоматизированный отбор и анализ проб на конвейерной ленте в рамках горного производства может быть осуществлен с помощью специальных устройств, обеспечивающих непрерывный мониторинг качества руды на этапе ее добычи и транспортировки. Для этого используются автоматические сэмплеры, которые устанавливаются на конвейерной ленте и совершают отбор проб на основе определенных критериев, например, размер частиц и содержание металлов. Отобранные пробы автоматически передаются на анализаторы, работающие на основе спектроскопии, рентгеновской или других методов анализа, которые определяют состав и свойства руды. Полученные данные передаются на центральный компьютер для дальнейшей обработки и предоставления информации операторам для принятия управленческих решений. Автоматизированный отбор и анализ проб на конвейерной ленте помогает снижать риски ошибок и повышать эффективность производства.



Рис.1. Процесс рентгенофлуоресцентный анализа в конвейерной ленте

Автоматизированный отбор и анализ проб на конвейерной ленте имеет много преимуществ для горного производства, в том числе:

- полностью автоматизированный и непрерывный процесс для поддержания высокой производительности
- легко интегрируется в существующие установки
- в отличие от альтернативных методов радиоактивные материалы не используются.
- высокое качество данных прямого анализа проб
- измерения лабораторного качества в режиме реального времени
- модульная конструкция для простоты обслуживания

Анализ.

Продолжая тему умного рудника, а вместе с ним и умной фабрики, нельзя обойти стороной вопрос исследования состава руды, причём в режиме экспресс.

Лабораторный анализ в этом деле не самый быстрый помощник — его результатов можно дожидаться до 24 часов.

Чтобы оперативно управлять процессами горно-обогатительного производства и при минимальных затратах достигать максимального качества конечного продукта, необходимы конвейерные онлайн-анализаторы.

Главная задача такого оборудования — оперативный **контроль качества рудопотоков** посредством мониторинга в режиме реального времени.

Принцип действия конвейерных онлайн-анализаторов у разных производителей схож, но методы анализа разные и зависят в том числе от особенностей месторождения. Это может быть рентгенофлуоресцентный (РФА), нейтронно-активационный (PGNAA) и лазерный анализ. Чтобы понять, какие бывают модели и как они работают, мы рассмотрели несколько примеров.

РФ-анализатор Vanta™

РФ-анализатор Vanta™, даёт решение автоматизированного отбора проб на конвейерной ленте обеспечивающий мгновенный точной анализ сырья:

- химический анализ сырья на конвейере в режиме реального времени
- превосходная чувствительность к микроэлементам
- количественное определение до 30 элементов за одно измерение
- обнаружение основных элементов до 1 ppm
- анализ легких элементов, включая магний (mg), алюминий (al), кремний (si) и серу (s)

В настоящее время наблюдается обеднение минерального сырья по всему миру. Данная тенденция привела к разработке более труднодоступных и бедных месторождений. На обогатительные фабрики поступает сырье с нестабильным составом, что приводит к ухудшению качества готового продукта и снижению эффективности работы фабрики.

Для решения данной проблемы необходимо производить оперативный непрерывный анализ качества сырья на всех этапах обогащения - от входного контроля до анализа хвостов и готового концентрата, в режиме реального времени. Управление возможно только при наличии актуальной информации.

Автоматизированный анализ проб на конвейере состоит из трех простых этапов:

1. Отбор проб

Пробы отбираются с ленты автоматически с помощью маятникового пробоотборника без необходимости остановки или замедления конвейера. Система может быть спроектирована с учетом соответствующих стандартов отбора и подготовки проб, включая ISO 12743, ISO 13909, ASTM E877, и ASTM D7430.

2. Подготовка

Собранные образцы измельчаются до необходимого размера. Содержание влаги измеряется и записывается для исключения систематических ошибок измерений. Образцы спрессованы и готовы к химическому анализу методом рентгеновской флуоресценции (РФА). Весь процесс подготовки автоматически отслеживается.

3. Анализ

Подготовленные образцы анализируют с помощью поточного РФ-анализатора Vanta iX. Сбор и анализ данных полностью автоматизированы. По завершении анализа результаты легко интегрируются в производственный процесс и систему управления данными. Это позволяет операторам получить нужные данные в нужное время.

АРП-1/2Ц

Одна из востребованных разработок компании **ООО «Техноаналитприбор»** — поточный рентгенофлуоресцентный анализатор АРП-1Ц, предназначенный для измерения массовой доли химических элементов в технологических продуктах **переработки минерального сырья**, горных пород и руд, твёрдых, порошкообразных, пульпообразных материалов.

Это устройство выполняет измерения флуоресцентным рентгенорадиометрическим методом, в основе которого лежит зависимость плотности потока характеристического рентгеновского излучения химических элементов от их концентраций.

Прибор предназначен для использования на **горно-обогатительных предприятиях цветной и чёрной металлургии** при обогащении драгоценных металлов, полевого шпата и в других отраслях.

Эта установка универсальна, применять её можно и для твёрдых (руда/шихта), и для жидких (пульпа/растворы) продуктов.

Поэтому прибор используют на всех этапах обогащения: в *подготовительных процессах* — для входного контроля руды при подаче на дробление, для контроля дроблёной руды перед измельчением и классификацией в гидроциклоне;

в *основных процессах* — для контроля измельчённой руды при подаче её на флотационные машины и анализа пульпы с целью управления количеством флотирующего вещества;

во *вспомогательных процессах* — для анализа готового концентрата и отвальных хвостов» (рис. 2).

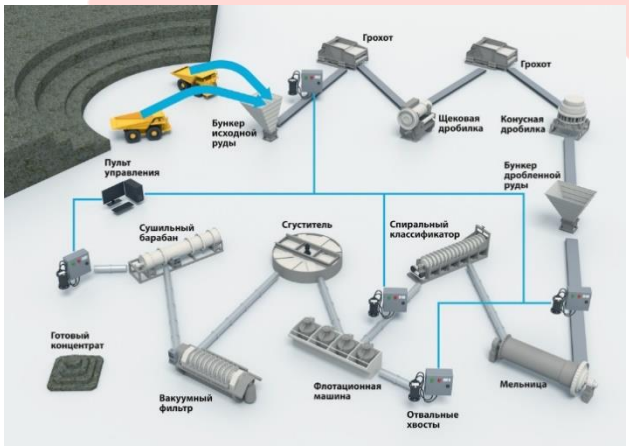


Рис.2. Применение анализатора АРП-1Ц на всех этапах обогащения руды.

Одно из основных преимущества анализатора АРП-1/2Ц – универсальность применения. Все существующие на данный момент РФА анализаторы осуществляют анализ вещества или в твердом или в жидком состоянии.

Анализатор АРП-1/2Ц применяется как для твердых (руда, шихта), так и для

жидких (пульпа, растворы) продуктов. Данное преимущество позволяет использовать прибор на всех этапах обогащения:

- входной контроль при подаче на дробление;
- перед гидроциклоном;
- при подаче на флотационные машины;
- анализ готового концентрата;
- анализ хвостов.

Анализ исследуемого продукта на этапе дробления необходим для входного контроля руды. На этапе флотации требуется производить анализ пульпы, для управления количеством флотирующего вещества. АРП-1/2Ц используется также для контроля содержания массовой доли химических элементов в готовом концентрате и отвальных хвостах. Стандартизированный комплекс оборудования для определения содержаний полезных веществ в исследуемых продуктах, в технологическом процессе обогащения, а также единое метрологическое и программное обеспечение позволяет:обеспечить удобное использование при создании АСУ ТП;

- снизить издержки на обслуживание;
- упростить обучение персонала;
- уменьшить количество и затраты на ЗИП;
- упростить процедуру поверки.

Благодаря применению АРП-1/2Ц на всех этапах обогащения руды, на предприятии удается произвести не только оперативный контроль, но и составить товарный баланс, на основе методики измерения концентраций полезных веществ в продукте обогащения.

Анализатор АРП-1/2Ц, в отличии от аналогов, может быть установлен как непосредственно в поток в цехе, так и работать в комплексе с системой доставки проб, последовательно анализируя отобранные пробы. Конфигурация с анализа пульпы непосредственно в точке контроля, без доставки проб открывает новые возможности при управлении процессом обогащения на предприятии:

позволяют без особых затруднений устанавливать анализатор в новые точки - без прокладки дорогостоящих пневматических магистралей доставки и подготовки проб;

- экспериментировать, искать оптимальные точки контроля;
- нет необходимости в дополнительном помещении, прибор устанавливается непосредственно в цехе;

- обеспечивает надежность конфигурации за счет независимой друг от друга работы нескольких датчиков. В случае отказа одного из них, процесс анализа на других точках контроля продолжается. Стоимость же нескольких датчиков приравнивается к цене системы с пробоотборниками и одним датчиком.

Анализатор АРП-1/2Ц также может использоваться для определения содержания твердого вещества в пульпе (в массовых долях или в процентах) или плотности пульпы.

Помимо вышеперечисленных преимуществ, поточный анализатор АРП-1Ц/2Ц обладает минимальными габаритными размерами и массой среди оборудования данного типа:

СканХ-3D

Ещё один пример использования РФА — энергодисперсионный анализатор с лазерной триангуляцией типа **«СканХ-3D»** российского производителя **ООО «Красрадос»**. С его помощью можно быстро определить качественное и количественное содержание основных и второстепенных химических элементов в различных образцах со статистически значимой точностью.

Сканер применяется в технологии поточного бесконтактного экспрессного рентгенофлуоресцентного (энергодисперсионного) опробования состава сырья на транспортном носителе.

Это может быть конвейерная лента, тарельчатый питатель или шахтная вагонетка, причём в режиме реального времени.

Помимо основного назначения — рентгенофлуоресцентного анализа использование такого прибора позволяет оценить насыпной объём рудной массы, даёт возможность крупнопорционной сортировки по измеренным содержаниям анализируемого элемента и управления технологическими процессами подготовки и переработки сырья.

Установка обеспечивает возможность контролировать содержание элементного состава в широком диапазоне элементов с атомными номерами от Z=20 (кальций) до Z=92 (уран). Количество одновременно определяемых элементов можно варьировать в зависимости от поставленной задачи.

По результатам измерений определяется качество измеряемого продукта: тип, сорт, а также тренд: изменение измеряемого параметра во времени.

PGNAA

Одна из технологий анализа австралийского производителя — анализ мгновенного гамма-излучения нейтронной активации (PGNAA) для поминутного анализа элементного состава проходящего через анализатор сыпучего материала.

Радиоактивный источник калифорний-252 испускает нейтроны. Эти нейтроны поглощаются ядрами атомов химических элементов материала на ленте конвейера. Каждый элемент испускает мгновенное гамма-излучение уникальной энергии. И уже полный спектр гамма-излучения регистрируется и анализируется для определения элементного состава материала. Время измерения — одна минута.

Основой производственной программы и наиболее интересной её частью является **конвейерный онлайн-анализатор** элементного и химического состава серии OBA Mk4 на основе технологии PGNAA, которая выпускается под тремя брендами: GEOSCAN-M для горно-металлургического сектора, COALSCAN 9500X для угольно-энергетического сектора и GEOSCAN-C для цементного сектора промышленности.

Наш метод применим для конвейерного онлайн-анализа широкого круга материалов, таких как уголь, кокс, железные, марганцевые, медные, свинцово-цинковые, никелевые, литиевые, платиновые и другие руды, концентраты и агломераты, бокситы, фосфаты, известняки, сырьевая цементно-клинкерная смесь. Обеспечивает точное определение таких элементов, как Fe, Ti, Mn, Cu, P, Si, Al, Ca, Mg, Na, K, Cl, S и других.

Описание и принципы работы OLGA

Действие анализатора основано на рентгенофлуоресцентной технологии. В нем используются запатентованные рентгеновские линзы от CSIRO, которые существенно усиливают сигнал от частиц золота в технологическом потоке и нивелируют помехи от попутных элементов, обеспечивая непосредственное измерение концентрации драгоценного металла (рис. 3).

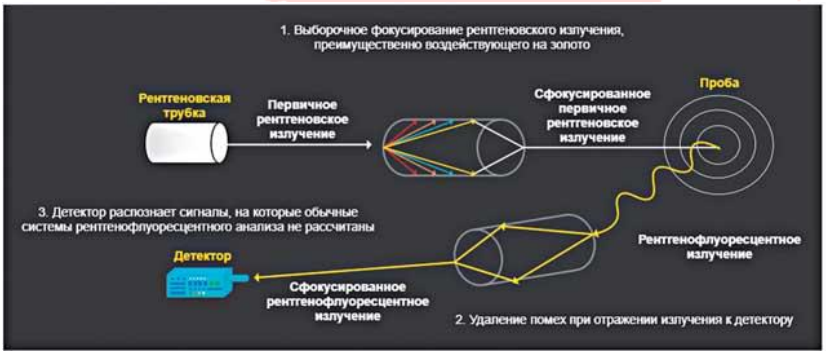


Рис. 3. Схема работы системы рентгеновских линз анализатора OLGA

Материал подается в анализатор в непрерывном режиме с пробоотборника. Проба поступает в чан с мешалкой для поддержания твердого во взвешенном состоянии. Излучение от источника проходит через систему линз, которые фокусируют рентгеновские лучи на анализируемом материале, а также принимают отраженное излучение от частиц золота и передают его на двойной

детектор. За преобразование сигнала и измерение концентрации элемента отвечают специальные алгоритмы. Процедура занимает менее 1% времени, которое потребовалось бы для проведения лабораторного анализа. На рис. 4 изображена схема работы системы.

Предел измерения концентрации золота — менее 1 г/т (1 части на млн), усредненные показания анализатора обновляются каждые 10 минут. Данные поступают в режиме реального времени в контрольный пункт, обеспечивая эффективное управление процессом, быструю оптимизацию, выявление и устранение отклонений.

Система позволяет минимизировать потери золота, устранить возможность взаимного загрязнения проб и повышает доступность данных. Многочисленные замеры и большой объем проб в свою очередь гарантируют надлежащий и своевременный учет колебаний содержания ценного компонента.

Анализатор OLGA достаточно простой, модульный, все компоненты включены в комплект поставки. Он монтируется на стойке, поставляется в заранее откалиброванном виде на основе представительных проб с предприятия. Такой подход существенно ускоряет и облегчает монтаж и ввод системы в эксплуатацию на объекте.

Обычно наиболее точным методом определения концентрации золота считается пробирный анализ. Однако он достаточно трудоемок и зачастую проводится на ограниченном объеме материала. Например, выводы по показателям за целую смену могут быть сделаны по анализу одной пробы массой, например, 30 г. Если допустить, что фабрика небольшая, производительностью — 100 т/ч, то отобранная проба будет репрезентировать лишь 0,0000025% всего материала.

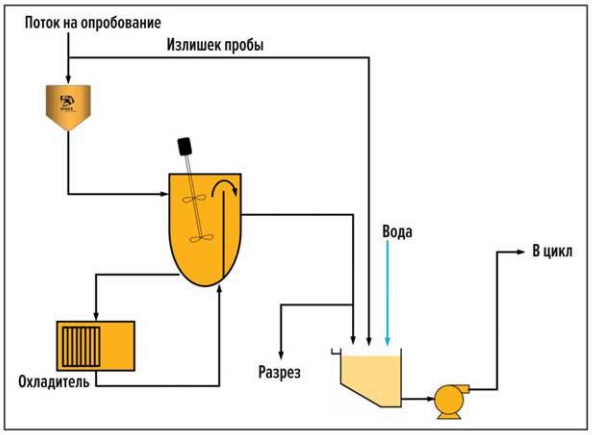


Рис. 4. Схема работы поточного анализатора OLGA

Поточные анализаторы при этом считаются менее точными. Доверительный интервал анализа с помощью системы OLGA составляет +/-10%, однако она способна проанализировать существенно больше материала, чем лабораторные методы, — около 1%, если рассматривать приведенный выше пример ЗИФ производительностью 100 т/ч. Более того, по мере увеличения количества замеров доверительный интервал сокращается (например, до +/-3% при 24 замерах через каждый час за смену), см. рис. 5.

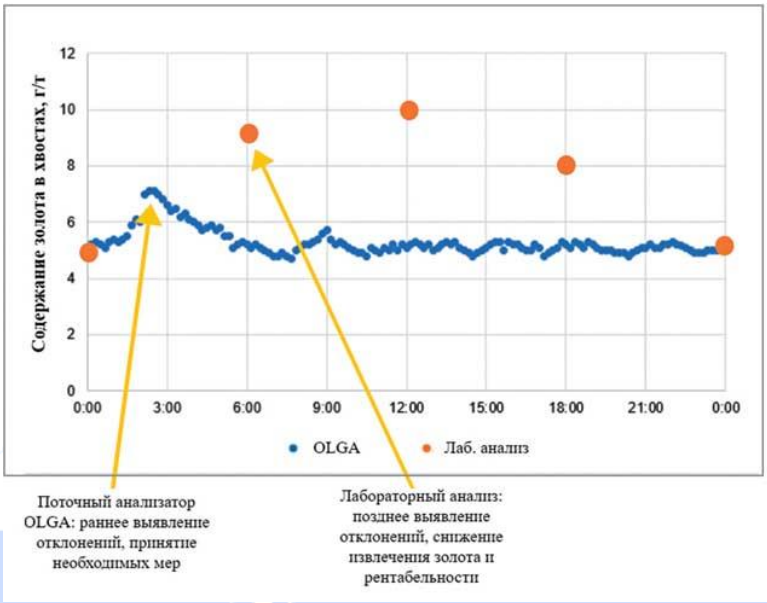


Рис. 5. Результаты применения системы OLGA и лабораторного анализа за 24-часовую смену

Установлено, что результаты, которые показывает система, соответствуют результатам анализа проб, отобранных и исследованных вручную (рис. 6).

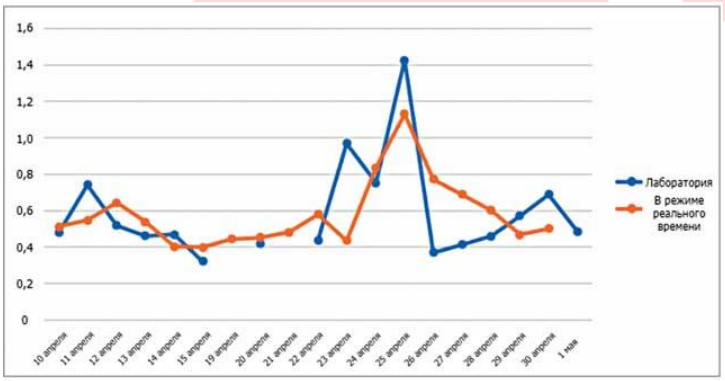


Рис. 6. Замеры концентрации золота (мг/л; график оранжевого цвета) каждые 10 минут. Вручную (график синего цвета) пробы отбирались раз в 3 суток и анализировались методом разложения в царской водке. Результаты указывают на выраженную корреляцию между данными OLGA и ручного опробования

Забор материала на анализ в выбранной точке производственного процесса осуществляется с использованием специализированной системы отбора проб

Gekko Systems, не предполагающей применения насосного оборудования и пригодной для работы с любыми технологическими потоками, присутствующими в процессе получения золота.

Управляющий компьютер

На управляющем компьютере устанавливается защищенное программное обеспечение обеспечивающее функционирование анализатора в целом, а также выполняющее функцию накопления, обработки и хранения информации о результатах измерений, поступающей с датчика **АРП-2Ц** через шкаф (шкафы) питания. Программное обеспечение работает только в составе анализатора **АРП-2Ц** и только при наличии электронного ключа для исключения несанкционированного доступа.

Управляющий компьютер производит автоматическую запись результатов измерений и расчетов. Полученная информация передается в АСУ ТП предприятия по сети Ethernet для просмотра или управления технологическим процессом в режиме реального времени. Реализована возможность просмотра результатов анализа по выбранной дате проведения измерений с выводом информации на дисплей (рис.7,8).

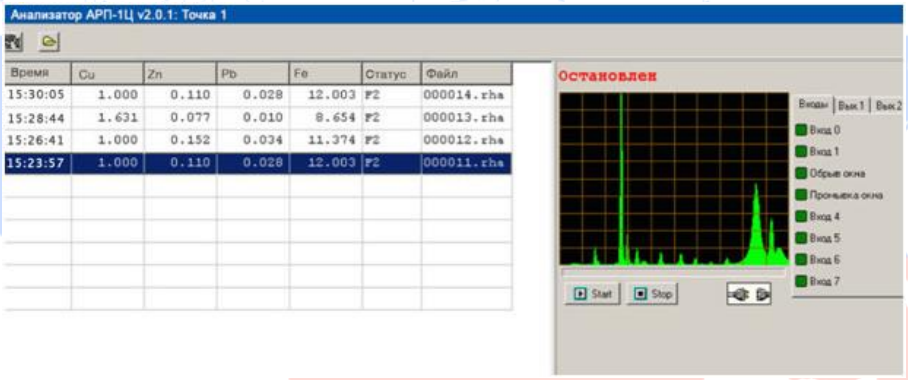


Рис.7. Главное окно программы AnalyzerNet

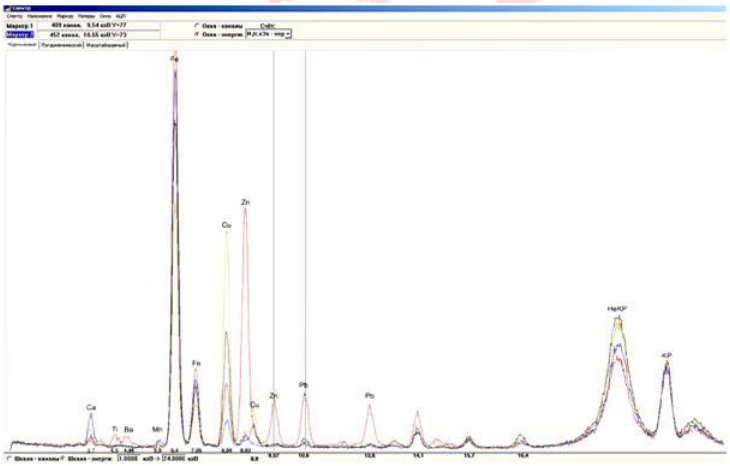


Рис.8. Диалоговое окно программы аналитики

Приблизительный экономический эффект от использования поточных on-line анализаторов (различных типов):

- Увеличение производительности фабрики (на 5–8 %).
- Прирост извлечения металлов (на 0,5–5,0 %).
- Снижение расхода реагентов (на 10–15 %).
- Снижение себестоимости конечной продукции.

Современное производство требует быстрых решений, принятие которых основано на актуальной информации о качественном и количественном составе сырья, продукции. Анализ металлов в потоке позволяет получать данные в режиме реального времени данные и принимать оперативные решения, благодаря которым удается добиться максимального качества конечного продукта при минимальных затратах. Процесс внедрения и эксплуатации поточных анализаторов более трудоемкий по сравнению с лабораторным оборудованием, но в долгосрочный перспективе приборы такого типа выгоднее.

Анализатор рентгенофлюоресцентный поточный АК-21 Анализатор рентгенофлюоресцентный поточный (далее по тексту – анализатор АК-21) предназначены для измерения массовой доли химических элементов от кальция до урана в технологических продуктах переработки минерального сырья, горных пород и руд, твердых, порошкообразных, жидких (пульпообразных) материалов в цеховых условиях. Измерения массовой доли элементов на анализаторах АК-21 проводятся флуоресцентным методом, в основе которого лежит зависимость плотности потока характеристического (вторичного) рентгеновского излучения элементов от их содержаний. Принцип действия анализаторов АК-21 основан на возбуждении с помощью малогабаритной рентгеновской трубки характеристического рентгеновского излучения определяемых элементов; измерении за заданное время спектра рентгеновского излучения от анализируемого материала; нахождении по измеренному спектру скоростей счета для аналитических линий определяемых элементов и вычислении массовых долей элементов в твердой фазе в зависимости от измеренных скоростей счета.

Поточный рентгеновский анализатор пульп и растворов в потоке состоит из: стойки, 2-х измерительных кювет, спектрометрического блока, оснащенного источником первичного рентгеновского излучения (рентгеновской трубкой), детектором, в качестве детектора вторичного (флуоресцентного и рассеянного первичного) рентгеновского излучения используют полупроводниковый детектор с термоэлектрическим охлаждением (например, типа SDD) и анализатором, в качестве анализатора вторичного рентгеновского излучения используют многоканальный амплитудный анализатор импульсов (детектор и анализатор позволяют за одну экспозицию получить весь спектр элементов, составляющих пробу), механизма перемещения спектрометрического блока, системы автоматического управления САУ. Спектрометрический блок и

механизм перемещения соединены с САУ через электрические кабели. В качестве спектрометрического блока используется компактный рентгенофлуоресцентный энергодисперсионный спектрометр «X-SPEC M», производимый компанией АО «Научные приборы», г. Санкт-Петербург. Серийно выпускаемый спектрометр «X-SPEC M» имеет следующие технические характеристики: 1 Определяемые элементы 20 92 Ca (Kα) – U (Lα) 2 Способ выделения линий спектра Энергодисперсионный с дискретизацией спектра на 4096 каналов. 3 Способ регистрации интенсивности Полупроводниковый: Si-дрейфовый с Пельтье-охлаждением и окном 25 мм2 4 Энергетическое разрешение на линии MnKα

Заключение. Использование предложенного автоматического рентгеновского анализатора пульп и растворов в потоке позволяет:

расширить диапазон и количество одновременно определяемых элементов;

повысить точность и достоверность анализа;

повысить радиационную безопасность эксплуатации, исключить необходимость в радиационном контроле и учете, исключить необходимость получения специального разрешения (лицензии) на право работы с анализатором;

Повысить экономичность за счет:

исключения повышенных требований к рабочему помещению (объему, площади и приточно-вытяжной вентиляции), уменьшения энергопотребления, уменьшения массогабаритных характеристик, отказа от громоздкой системы водяного охлаждения рентгеновской трубки;

а также повысить удобство обслуживания анализатора за счет использования механизма замены рентгенопрозрачной пленки окна в измерительной кювете.

Предобогащение необходимо на любом предприятии. Существует Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых (ГКЗ), которая обязывает на добывающие объекты — и старые, и вновь вводимые в эксплуатацию — устанавливать для этих целей специальное оборудование.

Литература

1. М.С. Якубов. Декомпозиция сложных технологических комплексов с целью синтез алгоритмов управления. Вопросы кибернетики. «Техническая кибернетика и теория информации», Ташкент, 1989. 128

2. А.А. Абрамов. Собрание сочинений: учеб. пособие. Москва: Горная книга, [б. Г.]. - Том 6: Флотация. «Физико-химическое моделирование процессов», 2010. 607. ISBN 978-5-7418-0640-1. — Текст: электронный // Доу: электронная библиотечная система

3. В.А. Каладзе. Исследование потенциальных характеристик случайного поиска как адаптации механизмы. «Системы управления и информационные технологии», Москва-Воронеж. 2008.28.
4. Э.А. Ганцева., В.А. Каладзе., Н.А. Тюкачев. Тестовые функции случайного поиска. Воронеж: Материалы Первого Всероссийского. конф. «Критические технологии вычислений и информационные системы», 2011. 108.
5. Б.С. Ксенофонтов. «Очистка сточных вод: кинетика флотации и флотационные комплексы: монография», Москва: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2020. 256 с.
6. А.Н. Кириллов. «Управление многостадийными технологическими процессами», Вестник Санкт-Петербургского государственного университета. СПбГУ, 2006.
7. А.Н. Кириллов. Метод динамической декомпозиции при моделировании систем управления со структурными изменения. «Моделирование систем и процессов», 2009.
8. Л.И. Дорофеева. «Моделирование и оптимизация процессов разделения», Томск: Издательство Дом Томского политехнического университета, 2008. 128.
9. А.И. Ушеров, Н.В. Алов, А.И. Волков., Е.Н. Ишметьев., М.Е. Полушкин., К.Н. Вдовин., Е.В. Ушерова., Н.А. Шипилова. Основной источник ошибок рентгенофлуоресцентного анализа железа рудные смеси. «Заводская лаборатория. Диагностика материалов», 2009. 25.
10. Н.В. Алов, А.И. Волков., А.И. Ушеров., Е.Н. Ишметьев., Е.В. Ушерова. Непрерывный рентген флуоресцентный анализ железорудных смесей в агломерационном производстве. «Журнал аналитического Химия», 2010. 173.
11. А.И. Волков., Н.В. Алов. Способ повышения точности непрерывной рентгенографии флуоресцентный анализ железорудных смесей. «Журнал аналитической химии», 2010. 749 с.
12. А.И. Волков., Н.В. Алов. О влиянии расстояния между спектрометром и пробы на интенсивность рентгенофлуоресценции. «Вестник Московского университета. Серия 2. Химия», 2011. 53.

Ссылки

1. https://www.bourevestnik.ru/products/analitheskaya-tekhnika/rentgenospektralnyy analiz/ar-35/
2. https://zolotodb.ru/article/12650
3. https://dprom.online/unsolution/obyomnyj-analiz-na-konvejere/
4. https://spectronxray.ru/support/basic-rfa/
5. https://www.analizator.ru/production/xrfa/metexpert/
6. https://www.melytec.ru/production/analysis/rengen-spect/s2picofox