

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНЫМИ ПОТОКАМИ В ПРОИЗВОДСТВЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

В.Ю. Бажин¹, О.Н. Масько¹, А.С. Ануфриев²

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: olgamasko.17@gmail.com

² ООО «Лаборатория Инжиниринга», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: В условиях конкуренции на рынке кремния возникла необходимость модернизации технологического процесса, в том числе и горнодобывающих производств, связанных с поставкой рудных материалов (подготовкой и обогащением кварцевого сырья). Существует проблема накопления трудно перерабатываемых техногенных отходов, приводящая к нарушению геологической обстановки. Существующие системы контроля и автоматизированного управления не соответствуют современным требованиям, в частности, в вопросах расхода основных и вспомогательных ресурсов и учета промышленных выбросов. Целесообразно внедрение специальных автоматизированных систем учета материальных потоков и расчета материальных балансов, в том числе и в аспекте подготовки и обогащения кварцита. На основе информации о движении материальных потоков, полученной с действующего предприятия, создается база данных и разрабатывается комплекс мер по повышению эффективности процесса. В основе системы лежит цифровой каркас, требующий наполнения и надстройки под конкретное производство. В данной статье проведен сравнительный анализ трех высокорейтинговых платформ для создания MES-системы, каждая из которых может быть применена в горно-металлургической промышленности в рамках цифровой трансформации. Выявлены положительные и негативные факторы для внедрения автоматизированных комплексов в производство кремния, а также сформулированы общие требования к программному обеспечению, что гарантирует устойчивую работу оборудования.

Ключевые слова: металлургический кремний, микросилика, техногенные отходы, материальный баланс, кварцит, рудно-термическая печь, АСУ ТП, MES-система.

Для цитирования: Бажин В. Ю., Масько О. Н., Ануфриев А. С. Обоснование выбора платформы для создания системы управления материальными потоками в производстве металлургического кремния // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 1-1. – С. 206–219. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_011_0_206.

Substantiation of choice of a platform for material flow control in metallurgical silicon production

V.Yu. Bazhin¹, O.N. Masko¹, A.S. Anufriev²

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

² Engineering Laboratory Ltd, Saint-Petersburg, Russia

Abstract: Under conditions of competition on the silicon market, it is necessary to modify process flows including mining operations connected with the supply of ore materials (pretreatment and processing of quartz raw material). Accumulation of refractory manmade waste violates geological situation. The existing systems of automated monitoring and control fall short of the modern requirements, specifically, in terms of consumption of the main and auxiliary resources and industrial emission inventory. It is advisory to introduce automated systems of recording material flows and calculating material balances, including the sphere of pretreatment and concentration of quartzite. Based on the information on the material flows at an operating plant, the relevant database is generated and the package of measures is developed to enhance the process efficiency. The system includes a digital framework to be filled and adjusted for a specific production. This article presents the comparative analysis of three high-rating MES platforms applicable in the framework of digital transformation in the mining and metallurgical industries. The beneficial and adverse factors for the introduction of the automated systems in the silicon production are revealed, and the general requirements for the software to ensure sustainable operation of equipment are formulated.

Key words: metallurgical silicon, microsilica, manmade waste, material balance, quartzite, ore-thermal furnace, automated process flow control, MES.

For citation: Bazhin V. Yu., Masko O. N., Anufriev A. S. Substantiation of choice of a platform for material flow control in metallurgical silicon production. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(1-1):206-219. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_011_0_206.

Введение

Рациональное использование минеральных ресурсов является первоочередной задачей в условиях развития промышленности. Здесь оперативный контроль качественных и количественных характеристик сырьевых потоков на всей цепочке создания стоимости (от добычи до выплавки металла) позволит повысить эффективность производства и снизить нагрузку на природную среду. Проблемы металлургических переделов решаются, таким образом, за счет направленного изменения свойств шихты, в зависимости от результирующих целевых показателей производства.

В целях повышения ресурсо- и энергосбережения актуальным является внедрение цифровой автоматизированной системы управления металлургического производства, которая наряду с упорядочиванием процессов контроля материального и энергетического балансов

обеспечивает в реальном времени сбор текущих данных для BigData, документацию от начала процесса до выпуска готовой продукции [1–3]. Известные системы типа Manufacturing execution system (MES) позволяют эффективно решить проблему учета материальных потоков на протяжении всей производственной цепочки [4].

Основными конкурентами среди производителей программного обеспечения (ПО) для MES-систем на мировом рынке являются компании:

- Honeywell International, Inc. (США);
- Emerson Electric Co (США);
- AVEVA plc (Великобритания);
- ABB Ltd. (Швейцария);
- GE (США).

Перечисленные производители представляют небольшую часть рынка, однако имеют опыт внедрения на предприятиях металлургической и горно-обогатительной промышленности. Исходя из

этого, актуальным является определение четких критериев выбора ПО для создания MES-системы под конкретную производственную задачу.

Методы

Аналитическое исследование было выполнено в соответствии со следующим алгоритмом.

1. Определение целей разработки системы.

На данном этапе определяется комплекс целей, которые должны быть реализованы в результате внедрения MES-решения. Система должна быть проблемно ориентирована. Четкая функциональная ориентация на этапе разработки определяет последующее успешное применение системы на производстве. Целями разработки системы автоматизированного управления материальными потоками («кварцит–кремний») и энергетическим балансом (MES-системы) в металлургическом и горно-обогатительном производстве (в частности, в производстве металлургического кремния) являются:

- повышение эффективности производства за счет контроля и анализа используемых ресурсов и технологических процессов изнутри;
- рост качества готового продукта (сокращение брака, отходов за счет анализа причин остановок производства);
- обеспечение соответствия требованиям заказчиков и надзорных органов, благодаря отслеживанию движения продукта от сырья до получения готового продукта.

2. Определение задач системы.

Для рассматриваемого случая:

- выявление новых контролируемых параметров и определение функциональных зависимостей между ними;
- минимизация факторов, вызывающих отклонения материального баланса и влияющих на качество и выход готового продукта;

- сокращение пылегазовых выбросов (на основе чего можно оценить влияние вредных выбросов на экологическую обстановку в регионе);
- снижение количества образующегося шлака;
- снижение энергопотребления предприятия за счет рационального перераспределения энергоресурсов.

3. Определение границ системы.

На данном этапе необходимо определить часть производственной среды, которую будет охватывать система автоматизации. Для сложного производства, включающего большое количество материальных потоков (от рудного сырья — кварца до товарного кремния) целесообразно внедрение комплексной системы автоматизации верхнего уровня, охватывающей всю цепочку создания стоимости (от изготовления древесного угля до реализации готового продукта).

4. Определение функционала функционала MES-системы.

5. Выбор группы программных средств, удовлетворяющих вышеперечисленным признакам (особенности выбора MES).

6. Сравнение выбранных цифровых платформ, анализ их достоинств и недостатков.

Определение функционала MES-системы для производства технического кремния

Во многих проектах по внедрению системы автоматизации изложение ожидаемых результатов от запуска системы является общепринятой практикой. Многие известные проекты связаны с вводом функциональных возможностей отчетности и анализа [5]. Необходимо отметить, что для подобных проектов невозможно заранее определить реальную прибыль от эксплуатации MES-системы. Компании, внедрившие MES-системы, как правило, не могут дать точные данные полученной прибыли или перечисляют толь-

ко конкретные улучшения, но не могут приписать их MES-системе с полной уверенностью [6, 7].

Для выбора оптимальной платформы автоматизации верхнего производственного уровня необходимо решить основные вопросы:

- ограничение и интервалы сбора данных;
- разделение действия системы по переделам (сбор и подготовка шихты — загрузка — плавка — выпуск продукта);
- подробное планирование производства и функционал управляющих воздействий на процесс.

Необходимо учитывать и тот факт, что даже на момент выбора ПО нет необходимости инвестировать в расширенную функциональность. При выборе поставщика важно предполагать, сможет ли выбранное ПО соответствовать будущим требованиям. В противном случае, если не предусмотреть возможность расширения системных требований, это приведет к таким проблемам, как необходимость поддержания дополнительных интерфейсов [8]. С другой стороны, инвестиция в предполагаемый в будущем функционал может быть неэффективной на момент выбора системы. Наиболее оптимальный подход состоит в том, чтобы подробно определить краткосрочные потребности производства и только на верхнем уровне управления наметить потребности долгосрочные. Для того чтобы определить, является ли выбранное решение удовлетворительным, необходимо указать требования как можно более точно [9, 10].

Таким образом, по критериям MES-система должна иметь определенную степень открытости и должна иметь набор сервисов со стандартным интерфейсом между самой MES-системой и модулями.

Выбранное решение должно иметь возможность работы с веб-службами.

Производство металлургического кремния включает в себя следующие технологические операции: подготовка, сортировка и отгрузка шихты (кварцевого сырья и древесного угля), расчетная загрузка и ее плавка в рудно-термической печи (РТП), рафинирование и разливка кремния и его последующее дробление и измельчение для удаления шлаковых включений при грохочении [11].

Среди перечисленных операций одной из наиболее сложных и ответственных является загрузка шихты в РТП, при которой происходит множество промежуточных операций: транспортировка со складов, смешение компонентов шихты, накопление готовой шихты в бункере и подача шихты с помощью мульдо-завалочной техники. Особенностью является то, что помимо кварцита загружается расчетное количество древесного угля и других углеродных восстановителей, и уже на этой стадии все операции сопровождаются большими потерями сырья (в том числе за счет пылевыноса). Это неизбежно приводит к ошибке в результатах расчета материального баланса плавки. Точное соблюдение пропорционального состава шихтовых материалов напрямую влияет на электрический режим печи и, впоследствии, на качество готового продукта [12–14].

Нарушение баланса и расчетного состава шихты также приводит к увеличению объемов пылевых выбросов, содержащих значительное количество ценного микрокремнезема (микросилики — SiO_2). Выбросы микросилики на малоэффективном производстве, где отсутствуют газоочистные установки, могут достигать 50%, что отрицательно сказывается на технико-экономических показателях предприятия [13–16]. Так, избыточное образование пылевых выбросов приводит к резкому повышению расхода восстановителей и их сгоранию. При наличии системы газоочистки газо-

пылевая смесь улавливается газосборным зондом. Таким образом, ключевой задачей MES-системы для производства металлургического кремния является расчет и своевременная корректировка материального баланса за счет управляющих воздействий через систему АСУ ТП, при непрерывном контроле потоков сырья и готового продукта [16 – 19].

Металлургическая промышленность является частью горно-металлургического сектора. Целесообразно рассматривать информационную модернизацию предприятий металлургии с перспективой внедрения общих хранилищ технологических данных для горно-металлургических комбинатов (ГМК).

Основными проблемами горнодобывающей, горно-обогатительной промышленности также являются вопрос учета, снижения и переработки отходов. Это позволяет унифицировать основные требования для выбора цифровых платформ, лежащих в основе MES, для горно-металлургического сектора [20 – 22].

Материальный баланс является основным показателем работы цеха и предприятия в целом, отражающим степень эффективности технологического процесса. На основании материального баланса рассчитываются как извлечение металлов, так и потери ценных компонентов, производится анализ технологии и т.д. [23, 24].

Другим необходимым качеством системы должна быть ее открытость (открытость системной архитектуры) и доступ. Это актуально не только для кремниевого производства, но и для любого крупного предприятия.

Передовые производители MES-платформ и их возможности Платформа Honeywell

Функционал полноценной MES-системы имеет множество модулей и переходных состояний, внедрение которых не является первоочередной задачей для

повышения прозрачности «грязных» металлургических и горно-обогатительных производств, в частности производства кремния.

Поэтому остановимся на ключевых для рассматриваемых производств модулях.

В качестве примера рассмотрим систему учета материальных потоков и расчета материального баланса металлургического цеха Медного завода ОАО «ГМК», разработанную компанией «Сумма технологий» на базе платформы Symphonite™ Production Accounting and Reconciliation (PAR) от Honeywell. Система является одним из ограниченных модулей в общей системе хранения и анализа технологических данных одного из ведущих предприятий ОАО ГМК «Норильский никель».

Задача автоматизации учета материальных потоков и расчета баланса металлов здесь стоит особенно остро. В рамках цеха выполняется учет 72 позиций продуктов, по каждому из которых проводится анализ количества и процентного содержания от 2 до 32 химических элементов, где всего контролируется более 830 параметров [25].

Система позволяет отслеживать ценные компоненты в составе материалов по всем технологическим переделам. Разработка системы сопровождалась внедрением автоматизации операции взвешивания продуктов.

Автоматизированная система учета материальных потоков и расчета баланса металлов минимизирует ошибки при формировании документации на продукцию (паспорта изделия), своевременно предоставляет достоверные данные для анализа качества сырья [26, 27].

Решение, которое предлагает Honeywell Production Accounting and Reconciliation (см. рис. 1), включает:

- Модульные модели учета (графическое представление модели учета, пакетная настройка моделей, контроль вер-



Рис. 1. Структура платформы Honeywell Production Accounting and Reconciliation [25]
 Fig. 1. Structure of Honeywell Production Accounting and Reconciliation [25]

сий модели, настройка модели);

- Гибкие методы сбора данных (автоматический сбор данных из архивов и систем управления перемещениями материалов, ручной ввод данных о перемещениях, импорт данных о перемещениях из Excel);

- Первичный анализ (графическое выделение балансовых расхождений, просмотр производственных показателей, сведение простого баланса);

- Статическую сверку (ограничения диапазонов, моделирование потерь, диагностика с помощью решающих алгоритмов, алгоритм обнаружения пропущенных перемещений);

- Различные механизмы доступа к информации (уведомления и рабочий процесс утверждения, аудит данных и стандартные/пользовательские отчеты, анализ в Excel, обратная запись в архив).

Возможные отчетные формы, предлагаемые данной платформой:

- баланс металлов (ежесуточный, ежедекадный и ежемесячный);

- статистическая ошибка баланса металлов;

- оперативный баланс металлов (ежесуточный, ежедекадный и ежемесячный);

- сравнение согласованного и оперативного балансов;

- движение продуктов (ежесуточно, ежедекадно и ежемесячно);

- ТОП-5 статистической ошибки баланса металлов;

- отчет по качеству (ежесуточный, ежедекадный и ежемесячный);

- анализ показателей производства за период.

В случае баланса металлов можно дать оценку эффективности работы комплексной АСУ, охватывающей все подразделения «Норильский никель», включая и рассматриваемую систему металлургического цеха:

- На 90% автоматизирован сбор данных, в результате чего минимизированы риски искажения балансовых данных;

- На 70% сокращены трудозатраты на сбор и формирование балансовой отчетности.

Платформа AVEVA

Production Management (ранее Ampla) компании AVEVA разработано для горно-обогатительных предприятий, однако имеет большой потенциал использования в металлургической промышленности благодаря модулю сведения металлурги-

ческих балансов. Production Management может подстраиваться под масштаб предприятия, избавляя от необходимости использовать дополнительных программных средств.

Как видно из рис. 2, основное ядро Production Management, предназначенное для описания движения материальных потоков и хранилищ обогащенного сырья и готового продукта, является универсальным для любого перерабатывающего производства.

Программное обеспечение состоит из нескольких модулей, представленных ниже.

Управление запасами (Inventory). Данный модуль реализует концепцию рабочих цехов в соответствии с ISA-95 и позволяет консолидировать данные о запасах, составляет полную наглядную генеалогию партии готового кремния от сырья.

Quality. Позволяет оценить качество выпускаемого продукта, а именно процентное содержание примесей в разных партиях металлургического кремния.

Downtime. Учет производственных простоев с указанием времени простоя для различных видов оборудования и рабочих центров, что позволяет судить о наиболее

уязвимых единицах оборудования.

Metrics. Рассчитывает суммарные и единичные коэффициенты эффективности производства, для оперативной оценки производственных операций и производства в целом.

Energy. Формирует отчеты о превышении энергии потребления процессом.

Maintenance. Создает записи об обслуживании оборудования.

Для учета баланса металла используется приложение Inventeo, представляющее собой мощное решение проблемы учета металла с помощью материального баланса, результат работы которого для медного ГОК представлен на рис. 4.

Платформа General Electric

Следующим примером успешной реализации автоматизации верхнего производственного уровня для производства ферросплавов является ИСУП, выполненная ЗАО «Технолинк» для плавильного цеха производства ферросплавов. Система организована по иерархическому принципу на базе программного обеспечения Proficy Plant Applications (в дальнейшем PPA) компании GE Fa-

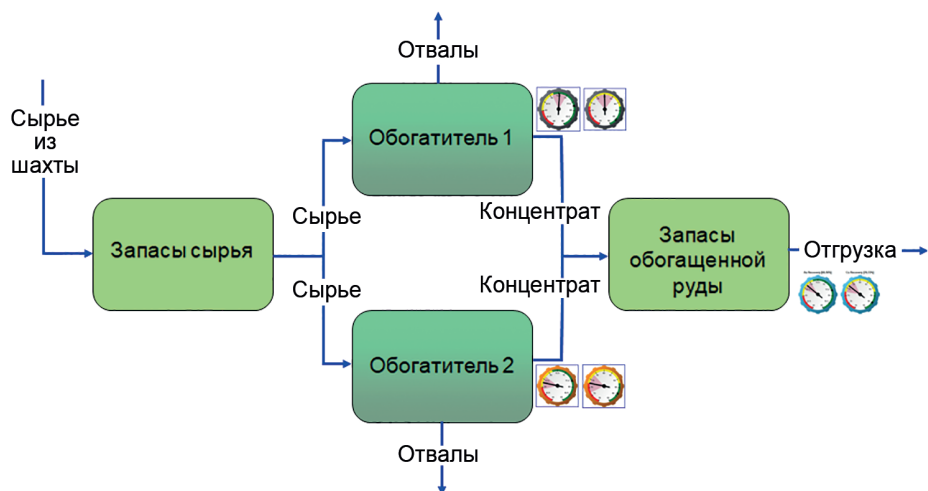


Рис. 2. Узлы и потоки процесса обогащения медной руды в Production Management [26]

Fig. 2. Copper ore beneficiation process nodes and flows in Production Management [26]

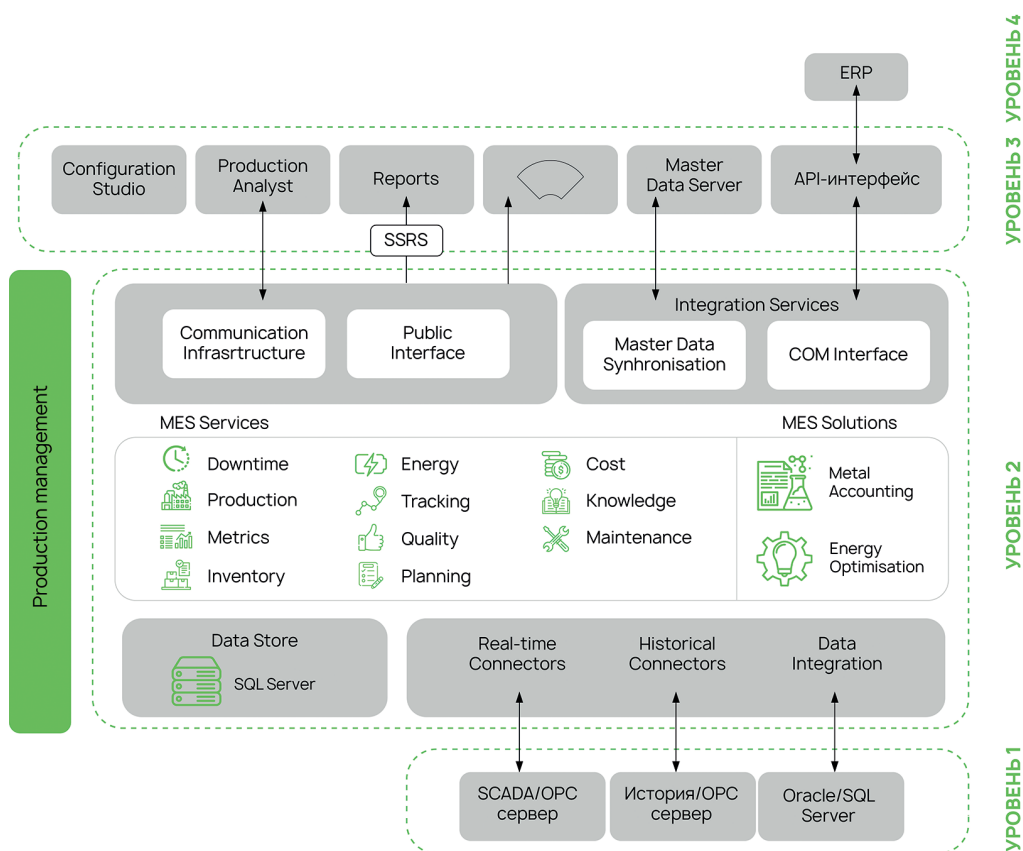


Рис. 3 Структурная схема Production Management [26]
 Fig. 3 Structural diagram of Production Management [26]

пис. Основными функциями системы являются оперативный контроль, учет и анализ движения материальных потоков.

Система PPA представлена в виде четырех основных функциональных модулей (см. рис. 4).

1. Управление эффективностью.

Модуль управления эффективностью отслеживает и контролирует общую эффективность оборудования (OEE) и другие критические ключевые показатели производительности, время простоя, количество отходов и производства, наработку на отказ и многое другое.

2. Управление производством и отслеживание данных.

Определение и контроль версий мар-

шрута и операций, необходимых для создания конкретного продукта на определенной линии. Модуль управления производством контролирует производственные операции, включая функции контроля потока продукции между оборудованием, разработки отчетов о генеалогии продукции и внесения изменений в график для сокращения избыточных запасов. Он поддерживает выполнение производственного графика и отслеживание продукта в соответствии с запланированными сроками завершения с корректировками для оптимизации эффективности.

3. Управление качеством продукции.

Модуль управления качеством обес-



Рис. 4. Структурная схема PPA
Fig. 4. Structural diagram of PPA

печивает стабильно высокое качество продукции, предоставляя данные в реальном времени, статистику, SPC и уведомления для контроля уровня качества.

4. Анализ партий.

Модуль анализа партий отлично подходит как для новых, так и для существующих систем. Он поддерживает анализ рецептов ISA-88 для таких продуктов, как рецептура (BOM), процедуры и оборудование. Пакетный анализ также обеспечивает анализ запланированных и завершенных рецептов и генерирует электронные записи партий (EBR), чтобы помочь повысить общее качество продуктов.

Данный программный продукт состоит из приложений вида клиент-сервер. Основой PPA является реляционная база данных (БД) Microsoft SQL, осуществляющая взаимодействие с архивными «Historian» серверами, созданными на базе SQL-совместимых БД, а также с серверами OPC/HDA.

Пакет представляет собой набор клиент-серверных программных приложений.

Базовый сервер PPA функционирует на основе реляционной БД Microsoft SQL и через интерфейсы взаимодействует с серверами «истории». Это может быть любой SQL-совместимый сервер.

Кроме этого, напрямую поддерживается обмен данными с серверами OPC/HDA.

Описание производства в PPA происходит посредством создания узлов выходных продуктов, привязанных к

оборудованию, их производящему. Ориентирами для выявления нарушений технологического процесса здесь служат спецификации свойств продуктов. Любое отклонение от заданных свойств подвергается тщательному анализу с использованием дерева причин, в результате чего формируется база данных, применяемая в последующем анализе.

Результаты

В результате анализа лучших производственных практик трех наиболее высокорейтинговых платформ для создания MES-системы можно сделать следующие выводы о требованиях к ПО:

- только сведения расчета материального баланса недостаточно для полноценной MES-системы, если она не входит в состав ИСУП;
- чрезмерная избыточность функционала отвлекает внимание от ключевых для контроля производственной эффективности данных, затрачивает дополнительные материальные, информационные и человеческие ресурсы;
- балансовый модуль должен обладать наибольшей наглядностью и функциональностью среди компонентов MES [28 – 30].

Все рассмотренные системы обладают открытой архитектурой, хорошо адаптированным для нужд конечного пользователя визуалом и могут быть адаптированы для любого предприятия

металлургической и горно-обогатительной промышленности.

Исходя из вышесказанного, наиболее оптимальным выбором для производства кремния будет платформа от AVEVA Production Management (Ampla). Решение учитывает специфику перерабатывающей сырье промышленности и имеет ряд преимуществ. Оно лишено избыточности и при этом имеет сильный уклон в сторону управления материальными потоками производства. Помимо отслеживания генеалогии готового продукта платформа предоставляет возможность оперативно следить за его качеством посредством контроля концентрации примесей [31].

Подробный анализ отчетности всех модулей Production Management позволяет найти важнейшие для управления процессом закономерности, такие как сбой электрического режима печи — увеличение выброса микросилики, нарушение процентного состава сырья — увеличение примесей в готовом продукте.

Заключение

Горно-металлургическая промышленность имеет характерные особенности, связанные с необходимостью учета, снижения и последующей переработки больших объемов техногенных выбросов.

В условиях глобальной цифровизации и повышения уровня автоматизации отсутствие специализированной системы для анализа и контроля данных цехового уровня делает эффективность «грязных» производств с большим количеством материальных потоков неконкурентоспособным и опасным для окружающей среды.

В статье проведен аналитический обзор цифровых платформ для создания MES-систем кремниевого производства с перспективой применения на предприятиях горно-обогатительного сектора и создания общего цифрового пространства ГМК.

В кремниевом производстве при сложности материальных потоков в условиях высокотемпературной химически агрессивной среды, при большом количестве неконтролируемых параметров и ввиду больших объемов выбросов, которые также плохо поддаются контролю (400–450 кг на 1 т кварца), необходимо решение вопроса по систематизации данных для эффективного управления через систему АСУ ТП.

В результате анализа лучших практик внедрения MES-систем на предприятия металлургического (Proficy Plant Applications (General Electric)) и горно-обогатительного сектора (Production Accounting and Reconciliation (Honeywell)) авторы пришли к выводу, что наиболее подходящим вариантом для реализации MES-системы производства кремния является Production Management компании AVEVA. MES AVEVA позволяет собирать данные из нескольких разнородных источников, затем обобщать и преобразовывать их в доступную для понимания информацию с целью анализа производительности, интеллектуального анализа данных, запросов и отчетов на всех производственных этапах.

С учетом проведенного анализа представляет интерес ввод дополнительных функций и расширение архитектуры с учетом лучших функционалов других платформ для создания новых модулей MES-системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Литвиненко В. С., Петров Е. И., Василевская Д. В., Яковенко А. В., Наумов И. А., Ратников М. А. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. — 2022. — Т. 259. — С. 95 — 111. DOI: 10.31897/PMI.2022.100.
2. Litvinenko V. Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector // Natural Resources Research. 2019, vol. 29, no. 1. DOI: 10.1007/s11053-019-09568-4.
3. Jaskó S., Skorp A., Holczinger T., Chovan T., Abonyi J. Development of manufacturing execution systems in accordance with Industry 4.0 requirements. A review of standard- and ontology-based methodologies and tools // Computers in Industry. 2020, vol. 123, no. 2, article 103300. DOI: 10.34218/IJM.10.2.2019.010.
4. Negri E., Berardi S., Fumagalli L., Macchi M. MES-integrated digital twin frameworks // Journal of Manufacturing Systems. 2020, vol. 56, no. 6, pp. 58 — 71. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.05.007.
5. Li F., Wu J., Dong F., Lin J., Sun G., Chen H., Shen J. Ensemble machine learning systems for the estimation of steel quality control / Proceedings of 2018 IEEE Conference on Big Data. 2018, pp. 2245 — 2252. DOI: 10.1109/BigData.2018.8622583.
6. Abburu S., Berre A., Jacoby M. COGNITWIN — hybrid and cognitive digital twins for the process industry / Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC). 2020. DOI: 10.1109/ICE/ITMC49519.2020.9198403.
7. Rozs R., Ando M. Collaborative systems, operation and task of the manufacturing execution systems in the 21st century industry // Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. 2020, vol. 64, no. 1, pp. 51 — 66. DOI: 10.3311/PPme.14413.
8. Сафиуллин Р. Н., Афанасьев А. С., Резниченко В. В. Концепция развития систем мониторинга и управления интеллектуальных технических комплексов // Записки Горного института. — 2019. — Т. 237. — С. 322 — 330. DOI: 10.31897/pmi.2019.3.322.
9. Федорова Э. Р., Пупышева Е. А., Моргунов В. В. Определение параметров осаждения при сгущении и промывке красных шламов // Цветные металлы. — 2023. — № 4. — С. 77 — 84. DOI: 10.17580/tsm.2023.04.10.
10. Fedorova E., Pupyshva E., Morgunov V. Modelling of red-mud particle-solid distribution in the feeder cup of a thickener using the combined CFD-DPM approach // Symmetry. 2022, vol. 14, article 2314. DOI: 10.3390/sym14112314.
11. Karlina A. I., Kondratiev V. V., Balanovsky A. E., Kolosov A. D., Ivanchik N. N. Results of modification of cast iron by carbon nanostructures of gas cleaning dust of silicon production // Advances in Engineering Research. International Conference on Aviaemechanical Engineering and Transport. 2018, vol. 158, pp. 169 — 173. DOI: 10.2991/avent-18.2018.33.
12. Martirosyan A. V., Ilyushin Yu. V., Afanaseva O. Development of a distributed mathematical model and control system for reducing pollution risk in mineral water aquifer systems // Water. 2022, vol. 14, no. 2, pp. 151. DOI: 10.3390/w14020151.
13. Свицов А. В., Елкин К. С., Кашлев И. М., Карлина А. И. Процессы в шихтовой и подовой зонах рабочего пространства печи и проблемы управления режимом дозирования шихты при выплавке технического кремния и высококремнистых ферросплавов // Metallurg. — 2020. — Т. 64(5-6). — С. 396 — 403. DOI: 10.1007/s11015-020-01008-6.
14. Sindland C., Tangstad M. Production rate of SiO gas from industrial quartz and silicon // Metallurgical and Materials Transactions. 2020, vol. 52, no. 3. DOI: 10.1007/s11663-021-02143-4.
15. Chigondo F. From metallurgical-grade to solar-grade silicon: An overview // Silicon. 2018, vol. 10, pp. 789 — 798. DOI: 10.1007/s12633-016-9532-7.
16. Немчинова Н. В., Минеев Г. Г., Тюрин А. А., Яковлева А. А. Разработка технологии рудно-термической плавки окискованной шихты из техногенного сырья для производства кремния // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. — 2017. — Т. 60. — № 12. — С. 948 — 954. DOI: 10.17073/0368-0797-2017-12-948-954.
17. Leonova M. S., Timofeeva S. S. Environmental and economic damage from the dust waste formation in the silicon production // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2019, vol. 229, no. 1, article 012022. DOI: 10.1088/1755-1315/229/1/012022.
18. Васильев Б. Ю., Мустафин М. Г. Анализ и оптимизация цифровых моделей рельефа горнопромышленного объекта с открытым типом разработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 9. — С. 141 — 159. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_141.

19. Мустафин М. Г., Кологривко А. А., Васильев Б. Ю. Анализ точности построения цифровых моделей рельефа на основе данных периодического воздушного лазерного сканирования горнопромышленного объекта // Горный журнал. — 2023. — № 2. — С. 56–62. DOI: 10.17580/gzh.2023.02.09.

20. Тарасов П. И., Хазин М. Л., Апакашев Р. А. Использование отходов горнодобывающей промышленности Урала // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 1. — С. 21–31. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-21-31.

21. Уланов А. Ю., Бахмин В. И., Коробова О. С. О совершенствовании системы обращения с отходами недропользования // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 6. — С. 48–55. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-48-55.

22. Кульчицкий А. А., Мансурова О. К., Николаев М. Ю. Распознавание дефектов грузоподъемных канатов металлургического оборудования оптическим методом с помощью нейронных сетей // Черные металлы. — 2023. — № 3. — С. 81–88. DOI: 10.17580/chm.2023.03.13.

23. Rozhikhina I. D., Nokhrina O. I., Yolkin K. S., Golodova M. A. Ferroalloy production: state and development trends in the world and Russia // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020, vol. 866, no. 1, article 012004. DOI: 10.1088/1757-899X/866/1/012004.

24. Yolkin K. S., Yolkin D. K., Kolosov A. D., Ivanov N. A., Shtayger M. G. Technologies, which allow to reduce an impact of metal silicon production on the environment // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2018, vol. 411, no. 1, article 012028. DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012028.


25. Лютягин Д. В., Яшин В. П., Забайкин Ю. С., Якунин М. А. Особенности и тенденции цифровой трансформации российской горнодобывающей отрасли // Экономика: вчера, сегодня и завтра. — 2019. — № 9. — С. 147–157.

26. Гервиц М. А. Цифровизация горнообогатительного производства // Автоматизация в промышленности. — 2021. — № 4. — С. 63–72. DOI: 10.25728/avtprom.2020.04.10.

27. Potekhin V. V., Bahrami A. H., Katalinič B. Developing manufacturing execution system with predictive analysis // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020, vol. 966, no. 1, article 012117. DOI: 10.1088/1757-899X/966/1/012117.

28. Mohammed W. M., Ferrer B. R., Iarovyj S., Negri E., Fumagalli L., Lobov A., Lastra J. M. Generic platform for manufacturing execution system functions in knowledge-driven manufacturing systems // International Journal of Computer Integrated Manufacturing. 2018, vol. 31, no. 3, pp. 262–274. DOI: 10.1080/0951192X.2017.1407874.

29. Aramja A., Kamach Q., Elmeziare R. Companies' perception toward manufacturing execution systems // International Journal of Electrical and Computer Engineering. 2021, vol. 11, no. 4, pp. 3347–3355. DOI: 10.11591/ijece.v11i4.pp3347-3355.

30. Александрова Т. Н., Чантурия А. В., Кузнецов В. В. Минералого-технологические особенности и закономерности селективного разрушения железистых кварцитов Михайловского месторождения // Записки Горного института. — 2022. — Т. 256. — С. 517–526. DOI: 10.31897/PMI.2022.58. 

REFERENCES

1. Litvinenko V. S., Petrov E. I., Vasilevskaya D. V., YAkovenko A. V., Naumov I. A., Ratnikov M. A. Assessment of the role of the state in the management of mineral resources. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 259, pp. 95–111. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.100.

2. Litvinenko V. Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector. *Natural Resources Research*. 2019, vol. 29, no. 1. DOI: 10.1007/s11053-019-09568-4.

3. Jaskó S., Skorp A., Holczinger T., Chovan T., Abonyi J. Development of manufacturing execution systems in accordance with Industry 4.0 requirements. A review of standard- and ontology-based methodologies and tools. *Computers in Industry*. 2020, vol. 123, no. 2, article 103300. DOI: 10.34218/IJM.10.2.2019.010.

4. Negri E., Berardi S., Fumagalli L., Macchi M. MES-integrated digital twin frameworks. *Journal of Manufacturing Systems*. 2020, vol. 56, no. 6, pp. 58–71. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.05.007.

5. Li F., Wu J., Dong F., Lin J., Sun G., Chen H., Shen J. Ensemble machine learning systems for the estimation of steel quality control. *Proceedings of 2018 IEEE Conference on Big Data*. 2018, pp. 2245–2252. DOI: 10.1109/BigData.2018.8622583.

6. Abburu S., Berre A., Jacoby M. COGNITWIN – hybrid and cognitive digital twins for the process industry. *Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*. 2020. DOI: 10.1109/ICE/ITMC49519.2020.9198403.

7. Rozs R., Ando M. Collaborative systems, operation and task of the manufacturing execution systems in the 21st century industry. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2020, vol. 64, no. 1, pp. 51 – 66. DOI: 10.3311/PPme.14413.

8. Safiullin R. N., Afanasyev A. S., Reznichenko V. V. The concept of development of monitoring systems and management of intelligent technical complexes. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 237, pp. 322 – 330. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2019.3.322.

9. Fedorova E. R., Pupysheva E. A., Morgunov V. V. Settling parameters determined during thickening and washing of red muds. *Tsvetnye Metally*. 2023, no. 4, pp. 77 – 84. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2023.04.10.

10. Fedorova E., Pupysheva E., Morgunov V. Modelling of red-mud particle-solid distribution in the feeder cup of a thickener using the combined CFD-DPM approach. *Symmetry*. 2022, vol. 14, article 2314. DOI: 10.3390/sym14112314.

11. Karlina A. I., Kondratiev V. V., Balanovsky A. E., Kolosov A. D., Ivanchik N. N. Results of modification of cast iron by carbon nanostructures of gas cleaning dust of silicon production. *Advances in Engineering Research. International Conference on Aviaemechanical Engineering and Transport*. 2018, vol. 158, pp. 169 – 173. DOI: 10.2991/avent-18.2018.33.

12. Martirosyan A. V., Ilyushin Yu.V., Afanaseva O. Development of a distributed mathematical model and control system for reducing pollution risk in mineral water aquifer systems. *Water*. 2022, vol. 14, no. 2, pp. 151. DOI: 10.3390/w14020151.

13. Sivtsov A. V., Yolkin K. S., Kashlev I. M., Karlina I. Processes in the charge and hearth zones of furnace working spaces and problems in controlling the batch dosing mode during the smelting of industrial silicon and high-silicon ferroalloys. *Metallurg*. 2020, vol. 64(5-6), pp. 396 – 403. [In Russ]. DOI: 10.1007/s11015-020-01008-6.

14. Sindland C., Tangstad M. Production rate of SiO gas from industrial quartz and silicon. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2020, vol. 52, no. 3. DOI: 10.1007/s11663-021-02143-4.

15. Chigondo F. From metallurgical-grade to solar-grade silicon: An overview. *Silicon*. 2018, vol. 10, pp. 789 – 798. DOI: 10.1007/s12633-016-9532-7.

16. Nemchinova N., Hoang V. V., Tyutrin A. Development of ore-thermal melting technology for agglomerated charge containing technogenic raw material in silicon production. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 12, pp. 948 – 954. [In Russ]. DOI: 10.17073/0368-0797-2017-12-948-954.

17. Leonova M. S., Timofeeva S. S. Environmental and economic damage from the dust waste formation in the silicon production. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 229, no. 1, article 012022. DOI: 10.1088/1755-1315/229/1/012022.

18. Vasilev B. Yu., Mustafin M.G. Digital relief models of open-pit mining facilities: Analysis and optimization. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 9, pp. 141 – 159. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_141.

19. Mustafin M. G., Kologrivko A. A., Vasil'ev B. Yu. Accuracy of digital terrain modeling based on periodic airborne laser scanning of a mining object. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 2, pp. 56 – 62. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.02.09.

20. Tarasov P. I., Khazin M. L., Apakashev R. A. Mining waste recycling in the Ural. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 1, pp. 21 – 31. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-21-31.

21. Ulanov A. Yu., Bahmin V. I., Korobova O. S. Improvement of subsoil use waste management. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 6, pp. 48 – 55. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-48-55.

22. Kulchickiy A. A., Mansurova O. K., Nikolaev M. Yu. Recognition of defects in hoisting ropes of metallurgical equipment by an optical method using neural networks. *Chernye Metally*. 2023, no. 3, pp. 81 – 88. [In Russ]. DOI: 10.17580/chm.2023.03.13.

23. Rozhikhina I. D., Nokhrina O. I., Yolkin K. S., Golodova M. A. Ferroalloy production: state and development trends in the world and Russia. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 866, no. 1, article 012004. DOI: 10.1088/1757-899X/866/1/012004.

24. Yolkin K. S., Yolkin D. K., Kolosov A. D., Ivanov N. A., Shtayger M. G. Technologies, which allow to reduce an impact of metal silicon production on the environment. *IOP Conference*

Series Materials Science and Engineering. 2018, vol. 411, no. 1, article 012028. DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012028.

25. Lyutyagin D. V., Yashin V. P., Zabaikin Yu. V., Yakunin M. A. Features and trends of the digital transformation of the Russian mining industry. *Economics: Yesterday, Today and Tomorrow*. 2019, no. 9, pp. 147 – 157. [In Russ].

26. Gervic M. A. Digitalisation of mining and processing. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*. 2021, no. 4, pp. 63 – 72. [In Russ]. DOI: 10.25728/avtprom.2020.04.10.

27. Potekhin V. V., Bahrami A. H., Katalinič B. Developing manufacturing execution system with predictive analysis. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 966, no. 1, article 012117. DOI: 10.1088/1757-899X/966/1/012117.

28. Mohammed W. M., Ferrer B. R., Iarovyi S., Negri E., Fumagalli L., Lobov A., Lastra J. M. Generic platform for manufacturing execution system functions in knowledge-driven manufacturing systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2018, vol. 31, no. 3, pp. 262 – 274. DOI: 10.1080/0951192X.2017.1407874.

29. Aramja A., Kamach Q., Elmeziane R. Companies' perception toward manufacturing execution systems. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2021, vol. 11, no. 4, pp. 3347 – 3355. DOI: 10.11591/ijece.v11i4.pp3347-3355.

30. Aleksandrova T. N., Chanturiya A. V., Kuznetsov V. V. Mineralogical and technological features and patterns of selective disintegration of ferruginous quartzites of the Mikhailovskoye deposit. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 256, pp. 517 – 526. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.58.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бажин Владимир Юрьевич¹ – д-р техн. наук,
профессор, e-mail: bazhin-alfoil@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-8231-3833,

Масько Ольга Николаевна¹ – аспирант,

e-mail: olgamasko.17@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0002-7512-1099,

Ануфриев Александр Сергеевич – директор по развитию,
ООО «Лаборатория инжиниринга», e-mail: a@ануфриев.рф,

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.

Для контактов: Масько О.Н., e-mail: olgamasko.17@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.Yu. Bazhin¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

e-mail: bazhin-alfoil@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-8231-3833,

O.N. Masko¹, Graduate Student,

e-mail: olgamasko.17@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0002-7512-1099,

A.S. Anufriev, Development Director,

Engineering Laboratory Ltd.,

197341, Saint-Petersburg, Russia,

e-mail: a@ануфриев.рф,

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,

199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: O.N. Masko, e-mail: olgamasko.17@gmail.com.

Получена редакцией 25.05.2023; получена после рецензии 15.11.2023; принята к печати 10.02.2024.

Received by the editors 25.05.2023; received after the review 15.11.2023; accepted for printing 10.02.2024.

