ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2024;(2):76-92
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.23.05+622.6 DOI: 10.25018/0236_1493_2024_2_0_76

НОВЫЕ ПОДХОДЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕДЕЛАМИ РУДОПОДГОТОВКИ

А.С. Ануфриев[1], Е.А. Лебедик[2], В.Ю. Бажин[2]

[1] ООО «Лаборатория инжиниринга», Санкт-Петербург, Россия
[2] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, e-mail Lebedik_EA@pers.spmi.ru

Аннотация: Рациональное использование минеральных ресурсов – первоочередная задача горно-обогатительной отрасли. Здесь оперативный контроль качественных и количественных характеристик рудных потоков и управление всей цепочкой создания стоимости продукта по обратной связи являются необходимым условием эффективного производства. Целесообразным является разработка собственных программно-технических решений, что позволит поддерживать рентабельность действующих горно-обогатительных производств в условиях технико-экономической изоляции. Рассмотрены цифровые платформы ведущих международных компаний для реализации многоуровневых систем управления процессами добычи и переработки полезных ископаемых. Предложена отечественная альтернатива, позволяющая реализовать современные подходы к модернизации переделов рудоподготовки – интеллектуальная система управления «РАЗУМ». В основе системы лежит математическая формализация технологических процессов с учетом погрешностей лабораторных измерений и движения материальных потоков. Управление осуществляется с помощью многопараметрических регуляторов отдельных процессов по одному или нескольким целевым параметрам и учитывает динамический износ оборудования, а также изменение физико-химических свойств сырья. Применение цифровых двойников технологических секций позволяет моделировать различные варианты режимов работы оборудования и технологии всей цепочки создания стоимости в зависимости от требуемого качества конечного продукта и свойств исходного сырья.

Ключевые слова: горная промышленность, рудоподготовка, обогащение руд, автоматизированные системы, цифровые двойники, аналитические системы, импортозамещение, контроль материальных потоков, ИСУ «РАЗУМ».

Для цитирования: *Ануфриев А. С., Лебедик Е. А., Бажин В. Ю.* Новые подходы для повышения эффективности автоматизированных систем управления переделами рудоподготовки // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 2. – С. 76–92. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_2_0_76.

New approaches to improving efficiency of automated control over ore pretreatment process stages

A.S. Anufriev[1], E.A. Lebedik[2], V.Yu. Bazhin[2]

[1] Engineering Laboratory LLC, Saint-Petersburg, Russia
[2] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail Lebedik_EA@pers.spmi.ru

© А.С. Ануфриев, Е.А. Лебедик, В.Ю. Бажин. 2024.

Abstract: The efficient use of mineral resources is a top priority objective in the mining and processing industry. The on-line testing of qualitative and quantitative characteristics of ore flows and the control over the whole product value chain are the obligatory conditions of effective production. It is expedient to develop proprietary hardware and software solutions to maintain profitability of operating mining and processing plants in the conditions of technological and economic isolation. This article discusses digital platforms designed by the world's leading companies for the implementation of multilevel control over flow processes in mineral mining and processing. The authors propose a domestic alternative to implementing advanced approaches to upgrading process stages in ore pretreatment—intelligent control system RAZUM. The system uses the mathematical formalization of technological processes with regard to inaccuracy of laboratory measurements and material flows. The control involves multiparameter controllers of different processes by one or a few target parameters, and takes into account the dynamic wear of equipment as well as the change in the physicochemical properties of raw materials. The use of the digital twins of the process stages allows modeling different variants of operating modes of equipment and the whole value chain depending on the required quality of the final product and properties of the initial feedstock.

Key words: mining industry, ore pretreatment, ore processing, automated system, digital twins, analytical systems, import substitution, material flow control, intelligent control system RAZUM.

For citation: Anufriev A. S., Lebedik E. A., Bazhin V. Yu. New approaches to improving efficiency of automated control over ore pretreatment process stages. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(2):76-92. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_2_0_76.

Введение

В рамках развития минерально-сырьевого комплекса назрела необходимость совершенствования традиционных подходов к автоматизации горно-обогатительной отрасли. Эффективность переделов рудоподготовки оказывает определяющее влияние на всю цепочку создания стоимости конечного продукта (металла). Для обеспечения оперативного управления переделами переработки рудного сырья ключевыми являются характеристики материальных потоков на входе и выходе из агрегатов, а именно химический и фракционный составы сырья, влажность [1].

Приоритетным в данной области является использование или замена существующих систем автоматизированного управления технологическими процессами (АСУ ТП) на более перспективные цифровые комплексы, в которые вводят элементы интеллектуального анализа данных, сквозного контроля производственной цепочки, цифровых двойников оборудования, а также управление с помощью прогнозирующих моделей (MPC) [1]. Внедряются подобные системы в горно-обогатительное производство для направленного изменения свойств руды в зависимости от результирующих целевых показателей производства [2, 3].

При разнообразии зарубежных цифровых платформ, подходящих для реализации интеллектуальных систем управления процессами шихтоподготовки, рынок отечественных конкурентоспособных аналогов в данной сфере пуст, что делает актуальной разработку отечественного программного обеспечения (ПО), охватывающего все переделы подготовки рудного сырья [4].

Методология

Алгоритм аналитического исследования

1. Определение целей разработки автоматизированной системы.

На данном этапе определяется комплекс целей, которые должны быть реализованы в результате внедрения программно-технического решения. Система должна быть проблемно ориентирована. Четкая функциональная ориентация на этапе разработки определяет последующее успешное применение АСУ с быстрым принятием решений на производстве [5].

Целями разработки системы автоматизированного управления переделами шихтоподготовки в горно-обогатительном производстве являются:

- повышение эффективности производства за счет контроля и анализа используемых ресурсов и технологических процессов и компонентов шихты изнутри;
- рост качества готового продукта (сокращение брака, отходов за счет экспресс-анализа причин остановок производства);
- обеспечение соответствия требованиям заказчиков и надзорных органов благодаря отслеживанию движения материала на протяжении всей технологической цепочки до получения многокомпонентной шихты заданных характеристик [6].

2. Определение текущих задач системы в условиях производственного цикла:

- минимизация факторов, вызывающих отклонения материального баланса, а также влияющих на качество и выход готового продукта;
- формирование и обеспечение требуемого гранулометрического состава шихты на стадии классификации;
- снижение потерь сырья за счет увеличения точности информации о характеристиках руды на переделах шихтоподготовки и минимизация влияния переходных процессов;
- уточнение химического составов руды (содержание основных примесей);
- формирование единой логистической системы для перегрузочных складов с целью снижения влияния переходных процессов на переделе обогащения из-за изменения состава шихтовых компонентов руды;
- формирование алгоритмов шихтоподготовки [7, 8].

3. Определение границ действия системы.

На данном этапе необходимо определить часть производственной среды, которая будет охвачена системой автоматизации. Для сложного многооперационного производства, включающего в себя большое количество материальных потоков, целесообразно внедрение комплексной многоуровневой системы автоматизации, охватывающей всю цепочку производства и формирования стоимости (от добычи руды до изготовления концентрата) с учетом текущих затрат.

4. Определение условий реализации системы.

Контроль материальных и временных затрат на подготовку шихты с учетом анализов и характеристик исходных материалов, а также специфики их переработки при создании Базы данных для каждого типа рудных материалов [9].

Системы управления переделами рудоподготовки

Искусственный интеллект (ИИ) только начинает свое распространение в горнодобывающей отрасли и процессах обогащения, поэтому представляет научно-технический интерес поиск новых решений и разработка новых программных приложений на базе ИИ [10]. Несмотря на широкое разнообразие решений в области управления технологическими

процессами и производствами в горной отрасли, лишь некоторые из них дошли до стадии коммерческого продукта и имеют опыт успешного применения в промышленных условиях [11].

Среди перспективных типов системы управления можно выделить:

- интеллектуальные системы управления (ИСУ), основанные на экспертных оценках и нейронных сетях [12, 13];
- системы управления на базе MPC регуляторов (model predictive control), использующие линейные или нелинейные модели, происходящие из феноменологических или эмпирических моделей, скорректированных на основе эксплуатационных данных.

Обе категории решают задачу многокритериального принятия решений для сложного и многостадийного процесса переработки руды. На основе экспертных оценок или имитационного моделирования система выбирает из множества вариантов наилучшее решение, удовлетворяющее принятым критериям или результатам последствия от его реализации [14].

В настоящее время многие компании горно-обогатительной отрасли, работающие в области контрольно-измерительных приборов, автоматизации и управления, предлагают коммерческие продукты, разработанные для сферы переработки полезных ископаемых. Наиболее перспективными представляются решения компаний ABB, Honeywell, Invensys, Emerson.

Expert Optimizer от компании ABB — это гибридная интеллектуальная система, предназначенная в первую очередь для экспертного замкнутого управления технологическими процессами и оптимизации промышленных процессов, но может также использоваться для поддержки принятия решений. Алгоритм адаптирует критерии оптимальности и/или методы прогнозирования для выбора целей системы. Экспертная часть поддерживает параметры процесса в определенных границах или близко к заранее определенным целевым значениям, изменяя управляющие переменные. Оптимальная система и система с прогнозированием работают путем минимизации функционала относительно управляющего воздействия, с учетом ограничений, накладываемых математической моделью расширенной системы ИИ, заданной процессом, и экспертной системой [15, 16].

Система была успешно внедрена на ряде цементных производств и флотационных переделов. Однако здесь существуют ограничения уровня управления технологическим процессом, что недопустимо для крупного предприятия с множеством технологических переделов. Необходимо многоуровневое решение с возможностью построения обратной связи и осуществления факторного анализа узких мест с выдачей рекомендаций в единую диспетчерскую службу для корректировки технологических режимов работы переделов предприятия в режиме реального времени.

Семейство продуктов Profit Suite для реализации управления такого рода предлагает компания Honeywell (см. табл. 1).

Линейка предназначена для расширенного управления технологическими процессами и их оптимизации, при этом большинство компонентов могут быть использованы в автоматизации переработки полезных ископаемых.

Так, только модуль Profit Controller позволяет повысить производительность горно-перерабатывающего производства на 5—10%.

Из описанных выше примеров можно сделать вывод об общем тренде на использование комбинированных методов управления через ИИ, совмещающих в себе преимущества математической формализации объекта и базы данных Big Data.

Таблица 1

Семейство продуктов Profit Suite от Honeywell
Honeywell Profit Suite Family of Products

Продукт семейства Profit Suite	Назначение
Profit Suite EED Toolkit	Инструмент статистического моделирования среды с целью выявления, локализации и сокращения нештатных ситуаций
Profit Sensor Pro	Инструмент анализа данных и регрессии, используемый для разработки моделей для онлайнового прогнозирования и косвенного контроля параметров. Осуществляет анализ сложных наборов данных с использованием передовых математических инструментов, таких как метод наименьших квадратов и статистическое ранжирование
Profit Loop	Приложение прогнозного управления с одним входом/одним выходом, разработанное с операционной простотой стандартного ПИД-регулятора
Profit Controller	Модуль для разработки, внедрения и поддержания стратегий многопараметрического управления и оптимизации для сложных промышленных процессов
Profit Optimizer	Решение задач оптимизации в масштабах нескольких подразделений и завода на поминутной основе. Он использует измеренные взаимосвязи между процессами и динамическую информацию о процессах, содержащуюся в базовых приложениях Profit Controller
Profit Bridge	Платформа для интеграции нелинейных моделей процессов с Profit Controller и Profit Optimizer
Profit Max	Система для моделирования и оптимизации на основе первого принципа в рамках онлайновой среды исполнения. Это решение обычно используется для оптимизации проектов, требующих смешанного целочисленного программирования, или для сильно нелинейных процессов
Profit Max	Интерактивное решение для моделирования процессов, которое позволяет инженерам создавать стационарные и динамические модели для проектирования установок, мониторинга производительности, устранения неполадок, устранения неисправностей, улучшения работы, бизнес-планирования и управления активами. С помощью этого продукта модели установившегося режима могут быть расширены до моделей переходных процессов

Описание результатов

Решение ИСУ «РАЗУМ»

Авторами предлагается комплексное программно-техническое решение, разработанное в соответствии с описанной выше методологией для АО «Карельский окатыш» — одного из крупнейших предприятий по добыче и переработке железной руды. Конечным продуктом в данной цепочке создания стоимости является чугун с определенными химико-физическими свойствами, зависимыми не только от технологического режима доменной плавки, но и в значительной степени от каждого предыдущего подготовительного передела, оказывающего влияние на качество подготовки шихты (см. рис. 1) [17, 18].

ИСУ «РАЗУМ» представляет собой взаимосвязанный комплекс программно-технических решений (табл. 2), осуществляющий согласованное управление

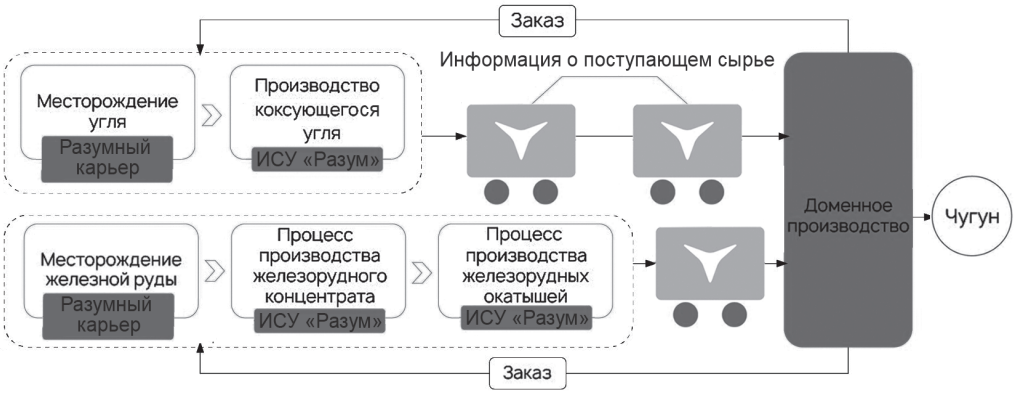

Рис. 1. Упрощенная структурная схема технологической цепочки производства чугуна
Fig. 1. Block diagram of the pig iron production

каждым из переделов рудоподготовки по целевым функциям с помощью многопараметрического регулятора [19].

Обобщенная структура ИСУ (рис. 2) представлена переделами обогащения и дробления, а также отдельно — горнотранспортным комплексом («Разумный карьер»). Представленные в табл. 2 решения будут интегрированы в единую сеть, представляющую собой комплексную систему взаимосвязанных решений по планированию качества и составления шихты на протяженности всей производственной цепочки переработки руды от добычи в карьере до получения концентрата, включая логистические цепочки и внутрикарьерные перевозки [20, 21].

В качестве основных решений предлагаются к внедрению два модуля: «Формирование шихты» и «Калькулятор». Первый предназначен для решения задачи управления составом шихты, второй модуль необходим для получения качественной обратной связи и анализа возможностей АО «Карельский окатыш» по достижению месячного плана [22, 23].

Управление горнотранспортным комплексом (пунктирная линия) включает в себя 4 вспомогательных модуля и прог-

Таблица 2

Внедренные, разработанные и концептуальные решения «РАЗУМ»
Implemented, developed and conceptual solutions «RAZUM»

№	Решение	Ожидаемые эффекты
1	Разумный карьер (реализация)	повышение точности учета количественных и качественных характеристик руды
2	ИСУ «РАЗУМ» дроблением (пилотный проект)	поддержание требуемого гранулометрического состава руды на входе в обогатительную фабрику
3	ИСУ «РАЗУМ» секцией обогащения (внедрение)	– поддержание требуемого качества концентрата; – увеличение объемов производимого концентрата; – уменьшение удельного расхода воды и электроэнергии
4	ИСУ «РАЗУМ» переделом окомкования (концепт)	– снижение брака; – контроль качества продукции; – учет произведенной продукции
5	ИСУ «РАЗУМ» обжигом (концепт)	

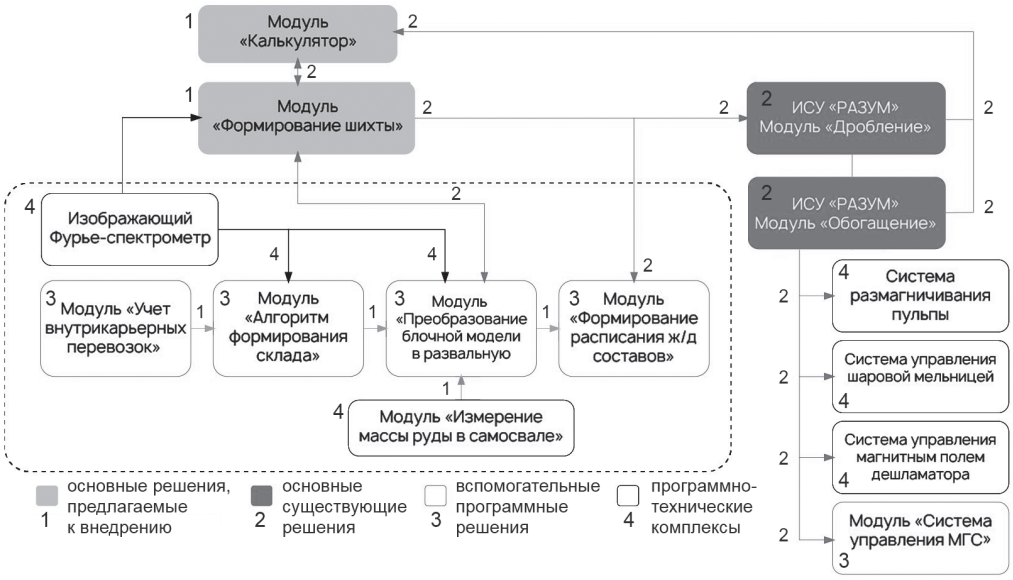

Рис. 2. Структурная схема взаимосвязанных решений «РАЗУМ» для АО «Карельский окатыш»
Fig. 2. Block diagram of the interconnected solutions «RAZUM» for «Karelsky Okatysh» JSC

раммно-технические решения, отвечающие за перемещение и стабилизацию материальных потоков вдоль всей производственной цепочки, включая склады. Так, для управления формированием склада используется изображающий Фурье-спектрометр и модуль «Измерение руды в самосвале». Изображающий Фурье-спектрометр позволяет оперативно анализировать качественный состав руды, подавая управляющий сигнал на основной модуль «Формирование шихты» [24].

Система интегрирована в действующее производство, получая необходимые для работы модулей системы технологические параметры и калибровочные коэффициенты от локальных систем автоматизации предприятия (manufacturing execution system (MES) и АСУ ТП). Взаимодействие модулей ИСУ между собой и с системами управления АО «Карельский окатыш» осуществляется с помощью протокола OPC и системы управления базами данных (СУБД) с открытым кодом (см. рис. 3).

ПО «РАЗУМ» осуществляет управление в соответствии с функциональной схемой, представленной на рис. 4. Целевые параметры подбираются на основе исследования рынка и состояния производственной цепочки, на основании чего формируется краткосрочная стратегия (1 — 2 месяца) производства концентрата из руды определенной обогатимости для поддержания маржинальности производства. Управление осуществляется с помощью подбора оптимального набора управляющих воздействий путем тестирования их на цифровом двойнике объекта управления.

Функциональные элементы модуля «Дробление»

Первым из внедренных элементов предлагаемой системы для управления переделами подготовки шихты является модуль «Дробление», включающий в себя следующие инструменты:

• *Цифровой поток шихты*

Инструмент предназначен для отслеживания качественных (содержание же-

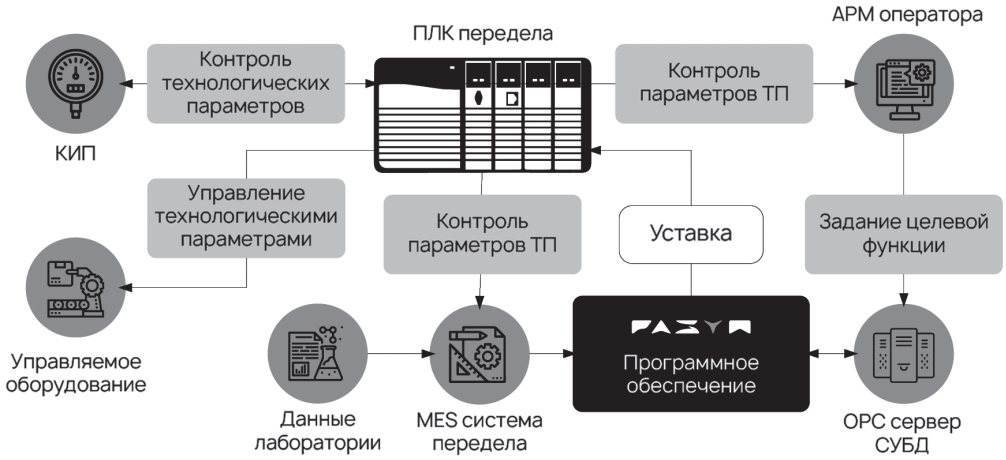

Рис. 3. Архитектура программных модулей управления технологическими переделами рудоподготовки ИСУ «РАЗУМ»

Fig. 3. Architecture of program modules for controlling technological process stages of ore treatment ICS «RAZUM»

леза магнитного, содержание серы, место добычи, обогатимость) и количественных (масса) характеристик руды от комплекса крупного дробления до стержневых мельниц, установленных на секциях обогащения, и передачи информации в интеллектуальную систему управления процессом обогащения для точной подстройки технологических параметров [25 — 27].

Для функционирования инструмента используются данные, получаемые из MES-системы АО «Карельский окатыш», а именно:

- информация, с каких перегрузочных складов и с каким качеством руда поступает на передел дробления;
- показания конвейерных весов крупного, среднего, мелкого дробления;
- информация о простоях технологических агрегатов;
- показания системы автоматического контроля качества железорудного сырья на конвейерах.

• *Цифровой бункер*

Цифровой двойник бункера позволяет вести учет шихты, поступающей на обогатительную фабрику, контролировать уровень в бункерах секции и получать информацию о шихте, поступающей на секции обогащения в единицу времени.

Система, получая информацию о руде, поступающей в бункер обогатитель-

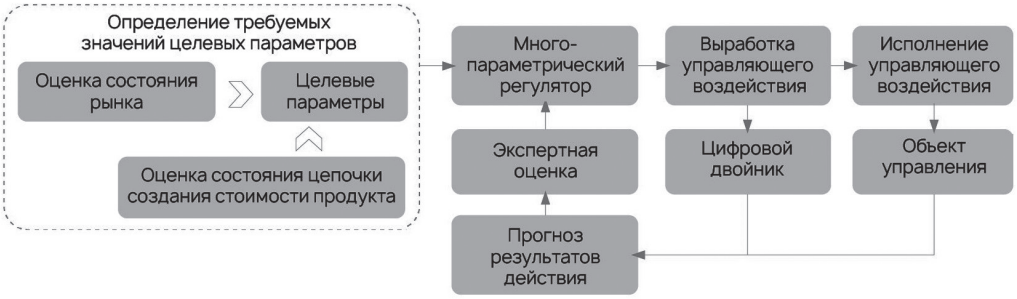

Рис. 4. Структурная схема выработки управляющих воздействий ИСУ «РАЗУМ»

Fig. 4. Structural diagram of control actions generation of ICS «RAZUM»

ной фабрики от инструмента «Цифровой поток шихты», а также зная положение большегрузной тележки (ТБР), уровень в бункере и нагрузки на секции обогащения, прогнозирует, когда шихта с определенными характеристиками дойдет до секции обогащения, с целью подстройки технологических параметров [28, 29].

• *Управление щелевым зазором дробилки*

Конусные дробилки среднего и мелкого дробления оборудованы механизированной системой регулирования зазора с дистанционным управлением. Так как при прохождении руды через дробилки происходит износ брони, то для поддержания оптимального гранулометрического состава необходимо с некоторой периодичностью осуществлять подтяжку зазора. При этом регулирование может осуществляться как в автоматическом режиме, так и в режиме «советчика» [30].

• *Цифровые двойники оборудования*

Для модуля дробления ИСУ «РАЗУМ» разработаны и используются цифровые двойники конусной дробилки, грохота и конвейера на базе математических моделей, представленных в табл. 3.

Таблица 3

Математические модели цифровых двойников оборудования модуля «Дробление» [31, 32]
Mathematical models of digital twins of equipment in the Crushing module [31, 32]

Математическая модель оборудования	Входные параметры модели
Конусная дробилка	
$p_i \frac{(1-c_i)Mm_i}{W} \cdot \frac{1-c_i}{1-c_i b_{ii}} \cdot \left(p_i^F + \sum_{j-1}^{i=1} c_j \frac{Mm_j}{W} b_{ij} \right)$ p_i^F — доля руды на входе i-й фракции; p_i — доля руды на выходе i-й фракции; M — масса загружаемой руды; m_i — доля материала; находящегося в дробилке в классе крупности i; b_{ij} — функция разрушения; c_i — функция классификации; W — масса выгружаемого продукта	– масса руды, поступающей в дробилку; – масса руды на выходе дробилки; – распределение материала по классам на входе и выходе дробилки; – распределение железа по классам на входе и выходе дробилки; – доля руды некондиционного размера после дробилки*
Вибрационный грохот	
Модель функции классификации грохота $\begin{cases} p_i^u = \frac{\left[1-c(d_{pi})\right]p_i^F}{\sum_i \left[1-c(d_{pi})\right]p_i^F} \\ p_i^o = \frac{c(d_{pi})p_i^F}{\sum_i c(d_{pi})p_i^F} \end{cases}$ p_i^u — доля подрешетного продукта; p_i^o — доля надрешетного продукта	– размер ячеек дек грохота; – угол деки по отношению к горизонтали; – размеры рабочей поверхности дек грохота; – насыпная плотность материала; – количество дек; – соотношение твердого/жидкого (стандартный параметр модели, на дроблении не применяется)
Ленточный конвейер	
Модель предназначена для сообщения параметров шихты другим моделям с заданной временной задержкой	

* Параметры, используемые в функциях модели (измельчение и классификация), индивидуальны для каждого типа и размера дробилок. Для определения коэффициентов прогнозирующих уравнений модели в реальных условиях эксплуатации использованы результаты лабораторных опробований.

Обсуждение результатов

Оценка результатов внедрения модуля «Дробление»

Оценка экономической эффективности внедрения систем управления технологическими процессами на обогатительных фабриках представляет определенные трудности из-за колебаний физико-химических характеристик поступающей на переработку руды, а также постоянной корректировки технологий рудоподготовки. Для снижения влияния возмущающих факторов предлагается проводить чередование режимов работы передела дробления с включенной ИСУ и без. При этом целесообразно выбирать в качестве отчетного интервала длительность рабочей смены АО «Карельский окатыш» — 12 ч.

В периоды отключения ИСУ информационные функции системы выполняются в штатном режиме, а именно:

- измерение технологических параметров;
- подготовка и передача информации в АСУП;
- окончательная оценка параметров АСУ ТП и оценка их эффективности.

Подход к определению эффективности внедренной системы выбирается многокритериальный и подразумевает учет и сравнение производительности по концентрату, удельного расхода стержней и шаров.

Для определения длительности проведения эксперимента с интервалами в 12 ч применяется дисперсия контролируемой величины $\alpha = I_x/0{,}39$, где I — количество переходов среднего значения параметра при стандартном технологическом режиме работы за период времени 12 ч. Таким образом, если принять колебания контролируемой величины 2 — 3 раза в смену, то продолжительность эксперимента должна быть не менее 100 смен. Учитывая, что 10% времени в среднем занимают переходные процессы, примем минимальную продолжительность эксперимента равной 110 сменам.

По результатам экспериментальной оценки технических эффектов от введения в эксплуатацию модуля «Дробление» определены следующие количественные показатели:

- на 0,35% увеличилась производительность по концентрату;
- на 0,35% снизился удельный расход стержней;
- на 7% сократился удельный расход шаров.

Предварительная оценка технико-экономических эффектов внедрения модулей «Разумный карьер», «Дробление» и «Обогащение»

Все предлагаемые решения можно разделить на три группы в зависимости от выполняемой задачи:

1. Оптимизация шихты: модули «Формирование шихты» и «Калькулятор»;
2. Стабилизация шихты: модули «Преобразование блочной модели в развальную», «Учет внутрикарьерных перевозок», «Алгоритм формирования склада», «Формирование расписания ж/д составов», «Измерение массы руды в самосвале», «Контроль гранулометрического состава» и «Система позиционирования штабелеукладчика», «Изображающий Фурье-спектрометр»;
3. Повышение эффективности обогащения: система управления магнитным сепаратором (МГС), система управления магнитным полем дешламаторов (МД), система размагничивания пульпы, система управления шаровой мельницей.

Для оценки общего технического эффекта, в том числе с учетом взаимного влияния решений друг на друга, предлагается методика, сочетающая экспертные оценки, статистические методы и комбинаторику.

Таблица 4

Весовые коэффициенты решений ИСУ «РАЗУМ»
Weighting coefficients of solutions of the ICS «RAZUM»

№	Решение	Весовой коэффициент
	1. Оптимизация шихты	
1.1	Модуль «Формирование шихты»	0,80
1.2	Модуль «Калькулятор»	0,20
	2. Стабилизация шихты	
2.1	Модуль «Преобразование блочной модели в развальную»	0,10
2.2	Изображающий Фурье-спектрометр	0,30
2.3	Модуль «Учет внутрикарьерных перевозок»	0,10
2.4	Модуль «Измерение массы руды в самосвале»	0,20
2.5	Модуль «Алгоритм формирования складов»	0,15
2.6	Модуль «Формирование расписания ж/д составов	0,05
2.7	Модуль «Контроль гранулометрического состава»	0,05
2.8	Система позиционирования штабелеукладчика	0,05
	3. Повышение эффективности обогащения	
3.1	Система управления шаровой мельницей	0,20
3.2	Система управления МГС	0,30
3.3	Система размагничивания пульпы	0,20
3.4	Система управления магнитным дешламатором: – функция увеличение эффекта дешламирования (20% от эффекта СУ МД); – функция управления магнитным полем дешламатора (80% от эффекта СУ МД)	0,30

В табл. 4 представлены наименование решений, а также их весовые коэффициенты.

Определение приведенного эффекта для каждой группы решений осуществляется по следующей формуле:

$$Э_i = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \vdots \\ \gamma_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \cdots 0 \\ \vdots \ddots \vdots \\ 0 \cdots 1 \end{bmatrix} Q_i, \qquad (1)$$

где $Э_i$ — приведенный эффект для i-й группы решений; γ_n — весовой коэффициент решения; Q_i — прирост по концентрату для i-й группы (см. таблицы).

В случае выбора решения из группы в единичной матрице устанавливается 1 в строке в соответствующим весовым коэффициентом.

Определение суммарного приведенного эффекта с учетом взаимного влияния решений осуществляется по формуле

$$Э_\Sigma = \sum_{i=1}^{3} Э_i + \Delta Q \cdot \sum_{i=1}^{3} \alpha_i \frac{n_i}{N_i}, \qquad (2)$$

где ΔQ — прирост концентрата от синергетического эффекта; α_i — степень влияния весового коэффициента (см. табл. 5); n_i — количество решений из группы, принятых к реализации; N_i — количество решений в группе.

Прирост концентрата от синергетического эффекта (ΔQ) вычисляется по формуле

Таблица 5

Значения степени влияния весовых коэффициентов
Values of the degree of influence of weighting coefficients

Степень влияния	Значение	Условие
α_1	0,1	если $\gamma_n \in [0; 0,1]$
α_2	0,3	если $\gamma_n \in [0,1; 0,2]$
α_3	0,6	если $\gamma_n \in [0,2; 1,0]$

$$\Delta Q = Q_{\Sigma} - \sum_{i=1}^{3} Q_i \,, \qquad (3)$$

где Q_{Σ} — прирост производства концентрата (см. табл. 2).

Таким образом, используя формулу суммарного приведенного эффекта, можно рассчитать общий технический эффект в зависимости от принятых к реализации решений.

Дальнейшее представление технических эффектов будет выполнено следующим образом:

- расчет технических эффектов для каждой группы решений;
- расчет технических эффектов при реализации всех решений с учетом синергетического эффекта;
- расчет технических эффектов, в том числе с учетом синергетического эффекта, с помощью выбора весовых коэффициентов для каждого решения.

В табл. 6. представлены технические эффекты при внедрении решений трех групп с учетом синергетического взаимного влияния [33].

Выводы

Авторами предложено комплексное программно-техническое решение проблем переделов шихтоподготовки в рамках современных тенденций в области автоматизации, позволяющее ИСУ «РАЗУМ» представлять собой модульную систему, затрагивающую все уровни управления горнодобывающим и обогатительным производством. На основе моделирования различных технологических режимов работы оборудования система выбирает наилучшее решение, учитывая целевые показатели и возмущающие воздействия [34].

Основным отличием ИСУ «РАЗУМ» от существующих систем является акцент на математическое описание работы основных единиц оборудования с корректировкой посредством данных, по-

Таблица 6

Технические эффекты при внедрении решений трех групп с учетом их синергетического взаимного влияния
Technical effects when implementing solutions of three groups, taking into account their synergistic mutual influence

Показатель	До внедрения	После внедрения	Эффект
Производительность, т/ч	356	371	+15
Содержание железа магнитного в хвостах, %	1,72	1,00	–0,72
Извлечение, %	94,89	97,06	+2,17
Выход продукта, %	31,69	32,42	+0,73
Производство концентрата за год (с учетом влаги), т	11 547 644	12 308 571	+760 927

лучаемых с контрольно-измерительных приборов (КИП). Замещение физических объектов их цифровыми копиями в управлении технологическими процессами позволяет минимизировать аппаратную часть системы управления, сохраняя при этом необходимую точность.

Четкая математическая формализации ключевых производственных агрегатов, представленных в виде цифровых двойников, позволяет реализовать многопараметрическое управление по целевым параметрам переработки руды, минимизируя переходный процесс [35].

Результатом введения в эксплуатацию пилотного модуля ИСУ — «Дробление» — были достигнуты существенные для АО «Карельский окатыш» результаты: на 0,35% увеличилась производительность по концентрату, на 0,35% снизился удельный расход стержней и на 7% сократился удельный расход шаров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лукичев С. В.* Цифровая трансформация и технологическая независимость горнодобывающей промышленности // Горная промышленность. — 2022. — № 5. — С. 74—78. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-5-74-78.

2. *Матевосян Р. А.*, *Варфоломеев И. А.* Интеллектуальный анализ и управление составом агломерационной шихты // Вестник Череповецкого государственного университета. — 2022. — № 6 (111). — С. 65—78. DOI: 10.23859/1994-0637-2022-6-111-5.

3. *Кобзев В. В.*, *Бабкин А. В.*, *Скоробогатов А. С.* Цифровая трансформация промышленных предприятий в условиях новой реальности // π-Economy. — 2022. — Т. 15. — № 5. — С. 7—27. DOI: 10.18721/JE.15501.

4. *Краковская И. Н.* Концепция обеспечения устойчивой конкурентоспособности промышленных кластеров России: основные положения // Экономика, предпринимательство и право. — 2023. — № 2. — С. 343—364. DOI: 10.18334/epp.13.2.116984.

5. *Рыльников А. Г.*, *Пыталев И. А.* Цифровая трансформация горнодобывающей отрасли: технические решения и технологические вызовы // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2020. — № 1. — С. 470—481. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-470-481.

6. *Тищенко И. В.*, *Ванаг Ю. В.* Автоматизация и роботизация добычи твердых полезных ископаемых // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. — 2022. — Т. 2. — № 3. — С. 325—333. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-2-3-325-333.

7. *Захаров В. Н.*, *Кубрин С. С.* Цифровая трансформация и интеллектуализация горнотехнических систем // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5-2. — С. 31—47. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_31.

8. *Кантемиров В. Д.*, *Яковлев А. М.*, *Титов Р. С.* Применение геоинформационных технологий блочного моделирования для совершенствования методов оценки качественных показателей полезных ископаемых // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2021. — № 1. — С. 63—73. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-63-73.

9. *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.

10. *Рыльникова М. В.*, *Клебанов Д. А.*, *Макеев М. А.*, *Кадочников М. В.* Применение искусственного интеллекта и перспективы развития аналитических систем больших данных в горной промышленности // Горная промышленность. — 2022. — № 3. — С. 89—92. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-3-89-92.

11. *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.

12. *Shestakov A. K.*, *Petrov P. A.*, *Nikolaev M. Y.* Automatic system for detecting visible emissions in a potroom of aluminum plant based on technical vision and a neural network // Metallurgist. 2023, vol. 66, pp. 1308—1319. DOI: 10.1007/s11015-023-01445-z.

13. *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.

14. *Клебанов Д. А.*, *Макеев М. А.* Цифровые советчики для угольной промышленности. Методология внедрения // Уголь. — 2022. — № 8. — С. 112—115. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-8-112-115.

15. *Степанова И. В.*, *Ивановская А. Н.*, *Аксенова Е. К.*, *Шеклеин А. А.*, *Галоян А. Р.*, *Минасян А. Г.* Разработка имитационной модели транспортировки руды горно-обогатительного комбината в системе BPSIM / Девятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2019). — Екатеринбург, 2019. — С. 548—552.

16. *Mohammed W. M.*, *Ferrer B. R.*, *Iarovyi S.*, *Negri F.*, *Fumagalli L.*, *Lobov A.*, *Lastra J. M.* Generic plat form 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.

17. *Дерябин С. А.*, *Кондратьев Е. И.*, *Рзазаде Ульви Азар оглы*, *Темкин И. О.* Язык моделирования архитектуры цифрового предприятия: методологический подход к проектированию систем Индустрии 4.0 // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 2. — С. 97—110. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_97.

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. *Кантемиров В. Д.*, *Яковлев А. М.*, *Титов Р. С.*, *Тимохин А. В.* Совершенствование методов рудоподготовки минерального сырья при освоении сложноструктурных месторождений // Горная промышленность. — 2022. — № S1. — С. 63—70. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-63-70.

20. *Шадрунов А. Г.*, *Саблев С. А.*, *Пыталев И. А.*, *Фридрихсон О. В.* Совершенствование логистической схемы Светлинского рудника при переходе на циклично-поточную технологию // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2020. — № 4. — С. 535—547.

21. *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.

22. *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.

23. *Головина Е. И.*, *Гребнева А. В.* Особенности управления ресурсами подземных вод на трансграничных территориях (на примере Калининградской области) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. — 2022. — № 4. — С. 85—94. DOI: 10.20403/2078-0575-2022-4-85-94.

24. *Варламова С. А.*, *Володина Ю. И.*, *Затонский А. В.*, *Язев П. А.* Разработка имитационной модели для планирования горно-выемочных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 10. — С. 214—222. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-214-222.

25. *Саадун А.*, *Фредж М.*, *Букарм Р.*, *Хаджи Р.* Анализ дробления с использованием цифровой обработки изображений и эмпирической модели (KuzRam): сравнительное исследование // Записки Горного института. — 2022. — Т. 257. — С. 822—832. DOI: 10.31897/PMI.2022.84.

26. *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, no. 11, article 2314. DOI: 10.3390/sym14112314.

27. *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.

28. *Сербин С. Д.*, *Смирнова О. А.* Создание цифровых двойников на предприятиях горнорудной промышленности / Цифровая трансформация экономических систем: проблемы и перспективы (ЭКОПРОМ-2022): Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с зарубежным участием. — СПб.: Политех-Пресс, 2022. — С. 541—544. DOI: 10.18720/IEP/2021.4/165.

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

30. *Великанов В. С., Бочков В. С., Дерина Н. В., Бочкова К. В.* Оценка технического состояния футеровочной брони конусных дробилок на основе цифровой диагностики их поверхностей // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 11-2. — С. 159—168. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_112_0_159.

31. *Duarte R. A., Yamashita A. S., Silva M., Cota L. P., Euzébio T. M.* Calibration and validation of a cone crusher model with industrial data // Minerals. 2021, vol. 11, no. 11, article 1256.

32. *Moraes M. N., Galery R., Mazzinghy D. B.* A review of process models for wet fine classification with high frequency screens // Powder Technology. 2021, vol. 394, pp. 525—532. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.08.078.

33. *Родионов Н. В., Загидуллин Р. С.* Анализ экспертных методов оценки качества инноваций // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2020. — № 10. — С. 105—111.

34. *Аракелян Э. К., Андрюшин А. В., Пащенко Ф. Ф., Мезин С. В., Косой А. А.* Проблемы и возможности интеграции интеллектуальных алгоритмов в прикладное программное обеспечение современных программно-технических комплексов / Труды 14-й международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2021). — М.: ИПУ РАН, 2021. — С. 808—814.

35. *Ilyushin Y. V., Kapostey E. I.* Developing a comprehensive mathematical model for aluminium production in a soderberg electrolyser // Energies. 2023, vol. 16, article 6313. DOI: 10.3390/en16176313. ГИАБ

REFERENCES

1. Lukichev S. V., Nagovitsyn O. V. Digital transformation and technological independence of the mining industry. *Russian Mining Industry Journal*. 2022, no. 5, pp. 74—78. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-5-74-78.

2. Matevosian R. A., Varfolomeyev I. A. Software for the analysis and control model of the sinter charge composition. *Cherepovets State University Bulletin*. 2022, no. 6 (111), pp. 65—78. [In Russ]. DOI: 10.23859/1994-0637-2022-6-111-5.

3. Kobzev V. V., Babkin A. V., Skorobogatov A. S. Digital transformation of industrial enterprises in the new reality. *π-Economy*. 2022, vol. 15, no. 5, pp. 7—27. [In Russ]. DOI: 10.18721/JE.15501.

4. Krakovskaya I. N. The concept of sustainable competitiveness of industrial clusters in Russia: the main provisions. *Journal of Economics, Entrepreneurship and Law*. 2023, no. 2, pp. 343—364. [In Russ]. DOI: 10.18334/epp.13.2.116984.

5. Rylnikov A. G., Pytalev I. A. Digital transformation of the mining industry: technical solutions and technological challenges. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2020, no. 1, pp. 470—481. [In Russ]. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-470-481.

6. Tishchenko I. V., Vanag Yu. V. Automation and robotization of solid mineral mining. *Interexpo Geo-Siberia*. 2022, vol. 2, no. 3, pp. 325—333. [In Russ]. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-2-3-325-333.

7. Zakharov V. N., Kubrin S. S. Digital transformation and intellectualization of mining systems. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5-2, pp. 31—47. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_31.

8. Kantemirov V. D., Iakovlev A. M., Titov R. S. Applying geoinformation technologies of block modelling to improve the methods of assessing quality indicators of minerals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2021, no. 1, pp. 63—73. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-63-73.

9. 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.

10. Rylnikova M. V., Klebanov D. A., Makeev M. A., Kadochnikov M. V. Application of artificial intelligence and the future of big data analytics in the mining industry. *Russian Mining Industry Journal*. 2022, no. 3, pp. 89—92. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-3-89-92.

11. 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.

12. Shestakov A. K., Petrov P. A., Nikolaev M. Y. Automatic system for detecting visible emissions in a potroom of aluminum plant based on technical vision and a neural network. *Metallurgist*. 2023, vol. 66, pp. 1308 — 1319. DOI: 10.1007/s11015-023-01445-z.

13. 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.

14. Klebanov D. A., Makeev M. A. Digital advisers for the coal industry. Methodology of implementation. *Ugol'*. 2022, no. 8, pp. 112 — 115. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-8-112-115.

15. Stepanova I. V., Ivanovskaya A. N., Aksenova E. K., SHeklein A. A., Galoyan A. R., Minasyan A. G. Development of a simulation model of ore transportation of a mining and processing plant in the BPSIM system. *Devyataya vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya po imitatsionnomu modelirovaniyu i ego primeneniyu v nauke i promyshlennosti «Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika» (IMMOD-2019)* [Proceedings of 9_th Russian Scientific and Practical Conference on Simulation Modeling and its Application in Science and Industry], Ekaterinburg, 2019, pp. 548 — 552. [In Russ].

16. Mohammed W. M., Ferrer B. R., Iarovyi S., Negri F., Fumagalli L., Lobov A., Lastra J. M. Generic plat form 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.

17. Deryabin S. A., Kondratev E. I., Rzazade Ulvi Azar ogly, Temkin I. O. Digital Mine architecture modeling language: Methodological approach to design in Industry 4.0. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 2, pp. 97 — 110. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_97.

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. Kantemirov V. D., Yakovlev A. M., Titov R. S., Timokhin A. V . Improvement of mineral processing methods in mining structurally-complex deposits. *Russian Mining Industry Journal*. 2022, no. S1, pp. 63 — 70. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-63-70.

20. Shadrunov A. G., Sablyov S. A., Pytalev I. A., Fridrikhsonov O. V. Improvement of the Svetlinsky gold deposit logistics scheme with transition to cycle-flow technology. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2020, no. 4, pp. 535 — 547. [In Russ].

21. 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.

22. 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.

23. Golovina E. I., Grebneva A. V. Features of groundwater resources management in the transboundary territories (on the example of the Kaliningrad region). *Geology and mineral resources of Siberia*. 2022, no. 4, pp. 85 — 94. [In Russ]. DOI: 10.20403/2078-0575-2022-4-85-94.

24. Varlamova S. A., Volodina Yu. I., Zatonskiy A. V., Yazev P. A. Simulation model for planning mining operations. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 10, pp. 214 — 222. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-214-222.

25. Saadoun A., Fredj M., Boukarm R., Hadji R. Fragmentation analysis using digital image processing and empirical model (KuzRam): a comparative study. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 257, pp. 822 — 832. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.84.

26. 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, no. 11, article 2314. DOI: 10.3390/sym14112314.

27. 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.

28. Serbin S. D., Smirnova O. A. Creation of digital twins at mining enterprises. *Tsifrovaya transformatsiya ekonomicheskikh sistem: problemy i perspektivy (EKOPROM-2022): Sbornik trudov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s zarubezhnym uchastiem* [Digital Transformation of Economic Systems: Problems and Prospects (ECOPROM-2022). Proceedings of the All-Russian

scientific and practical conference with foreign participation], Saint-Petersburg, Politekh-Press, 2022, pp. 541 — 544. [In Russ]. DOI: 10.18720/IEP/2021.4/165.

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

30. Velikanov V. S., Bochkov V. S., Dyorina N. V., Bochkova K. V. Digital image processing for assessing the liner armor condition of cone crushers. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 11-2, pp. 159 — 168. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_112_0_159.

31. Duarte R. A., Yamashita A. S., Silva M., Cota L. P., Euzébio T. M. Calibration and validation of a cone crusher model with industrial data. *Minerals*. 2021, vol. 11, no. 11, article 1256.

32. Moraes M. N., Galery R., Mazzinghy D. B. A review of process models for wet fine classification with high frequency screens. *Powder Technology*. 2021, vol. 394, pp. 525 — 532. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.08.078.

33. Rodionov N. V., Zagidullin R. S. Analysys of expert methods innovation quality assessment. *News of the Tula state university. Technical sciences*. 2020, no. 10, pp. 105 — 111. [In Russ].

34. Arakelyan E. K., Andryushin A. V., Pashchenko F. F., Mezin S. V., Kosoy A. A. Problems and possibilities of integration of intellectual algorithms into application software of modern software and hardware complexes. *Trudy 14-y mezhdunarodnoy konferentsii «Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem» (MLSD'2021)* [Proceedings of 14th International Conference: Management of large-scale systems development (MLSD'2021)], Moscow, IPU RAN, 2021, pp. 808 — 814. [In Russ].

35. Ilyushin Y. V., Kapostey E. I. Developing a comprehensive mathematical model for aluminium production in a soderberg electrolyser. *Energies*. 2023, vol. 16, article 6313. DOI: 10.3390/en16176313.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ануфриев Александр Сергеевич — директор по развитию,
ООО «Лаборатория инжиниринга»,
e-mail: a@ануфриев.рф,
Лебедик Екатерина Андреевна[1] — канд. техн. наук,
ассистент, e-mail: Lebedik_EA@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0009-0008-5852-1411,
Бажин Владимир Юрьевич[1] — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: bazhin-alfoil@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-8231-3833,
[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.
Для контактов: Лебедик Е.А., e-mail: Lebedik_EA@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.S. Anufriev, Development Director,
Engineering Laboratory LLC,
197341, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: a@ануфриев.рф,
E.A. Lebedik[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Lecturer,
e-mail: Lebedik_EA@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0009-0008-5852-1411,
V.Yu. Bazhin[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: bazhin-alfoil@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-8231-3833,
[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: E.A. Lebedik, e-mail: Lebedik_EA@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 25.05.2023; получена после рецензии 15.09.2023; принята к печати 10.01.2024.
Received by the editors 25.05.2023; received after the review 15.09.2023; accepted for printing 10.01.2024.