

Прогнозная аналитика при управлении качеством на горнообогатительном производстве на примере добычи и обогащения угля*

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-12-92-97>

КЛЕБАНОВ Д.А.

Канд. техн. наук,
заведующий лабораторией
интеллектуальных
методов мониторинга
ГТС ИПКОН РАН,
111020, г. Москва, Россия,
e-mail: Klebanov_d@ipkonran.ru

КНЯЗЬКИН Е.А.

Канд. техн. наук,
заведующий лабораторией
ЭКОН ИПКОН РАН,
111020, г. Москва, Россия

МАКЕЕВ М.А.

Управляющий директор ООО «Пиклема»,
научный сотрудник ИПКОН РАН,
107078, г. Москва, Россия,
e-mail: mm@piklema.com

В статье рассмотрена проблема управления шихтоподготовкой и обогащением угля при разработке месторождений полезных ископаемых. Отмечено, что контроль качества на разных технологических процессах горнотехнической системы влечет запаздывание или неучтенное качество от 1500 до 5000 т, что влияет на выходные параметры товарной продукции обогатительной фабрики. Сформулирована гипотеза оптимизации производства горнотехнической системы, которая заключается в том, что на базе аналитики данных о качестве угля, собранной в единую систему, возможно определить виды возможных потерь и их количественный показатель, а также разработать решения, направленные на гармонизацию процессов обогащения и технологических процессов горнотехнической системы. Проведена проверка сформулированной гипотезы и доказано, что своевременное определение видов потерь на базе анализа данных технологических процессов способно существенно повысить эффективность горных работ и обогащения при управлении горнотехнической системой. Предложен подход к приоритизации задач цифровизации горнотехнических систем и обогащения при добыче угля. Показана идея эволюционного становления бизнес-процессов на границе взаимодействия разреза и обогатительной фабрики на фоне развития IT-инструментов.

Ключевые слова: горнотехническая система, управление качеством, рудопотоки, большие данные, аналитика данных, оптимизация производства, обогащение угля, управление складами, советчик диспетчеру, виртуальный анализатор.

Для цитирования: Клебанов Д.А., Князькин Е.А., Макеев М.А. Прогнозная аналитика при управлении качеством на горнообогатительном производстве на примере добычи и обогащения угля // Уголь. 2023. № 12. С. 92-97. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-12-92-97.

ВВЕДЕНИЕ

В угледобывающей промышленности на современных горнообогатительных предприятиях процессы обогащения во многом зависят от качества шихтования и организации горнотехнических процессов. Целевой задачей обогатительных фабрик является выполнение коммерческих заказов по качеству и объему производимой продукции при поддержании проектной производительности фабрики. Главной проблемой на пути решения данной задачи является неточный процесс контроля качества рядового угля, который особо важен на предприятиях, занимающихся обогащением угля различных марок.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00142, <https://rscf.ru/project/22-17-00142/>

ПРИЧИНЫ, ИСТОЧНИКИ ПРОБЛЕМЫ

На большинстве угольных предприятий, ведущих открытую разработку месторождений, процесс контроля качества подаваемого на фабрику рядового угля базируется на основе результатов лабораторных анализов проб, отобранных отделом технического контроля (ОТК). Укрупненно, отбор проб ОТК ведется в контрольных точках разных технологических процессов:

- в забое – пластовая проба;
- на промежуточных складах рядового угля – складская проба;
- на складах рядового угля фабрики – проба склада фабрики;
- на конвейерных линиях фабрики – технологическая проба.

Однако существенным недостатком данного способа контроля качества в процессе управления шихтоподготовкой является время проведения анализа, которое составляет от трех часов. В связи с этим возникают запоздания при получении лабораторных результатов от 3 до 5 часов в зависимости от загруженности оборудования лаборатории или приоритизации тех или иных точек контроля. В свою очередь, за такой временной промежуток угольная фабрика обогащает от 1500 до 5000 т угля неопределенного качества.

Кроме этого, существенным недостатком данного способа опробования является его представительность, в частности, для точек опробования, находящихся на этапах добычи, транспортирования и складирования угля, где отбор проб осуществляется в ручном режиме в объеме до 0,05 м³ при вместимости кузова одного самосвала грузоподъемностью 220 т около 170 м³.

Этап транспортирования угля также не до конца является прозрачным технологическим процессом с точки зрения отслеживания качества. Большинство используемых в России автоматизированных систем диспетчеризации (АСД) имеют модуль учета складов, но алгоритмы подсчета качественных характеристик сырья распределены на полный объем склада, что эквивалентно тысячам кубических метров. Такая реализация обусловлена техническими сложностями в позиционировании самосвалов, где накопленная погрешность может достигать диаметра в 30 м [1]. Данная погрешность складывается из точности позиционирования по GPS-антенне ($\pm 3-5$ м) и факта установки этой антенны на кабине самосвала, что не позволяет точно установить место разгрузки ввиду его габаритов. Решением этой проблемы является установка дополнительной GPS-антенны на угол самосвала, что дает понимание о его положении в пространстве – высокоточное позиционирование. Однако это кратно увеличивает стоимость и обслуживание системы диспетчеризации, что выбивается из экономики угольного предприятия.

Фактически, судя по проведенному обследованию, обогатительные фабрики на угольных разрезах работают «вслепую», поскольку все описанные выше методы контроля качества не обладают сразу двумя важными для производства характеристиками: точность и оперативность. Угледобывающие предприятия выходят из сложившегося положения путем установки дорогостоящих комплексов –

поточных золомеров, которые по различным физическим свойствам способны оценить зольность и влажность потока угля на ленточном конвейере. Однако эффективность такого контроля качества крайне низка в условиях обогащения фабрикой различных марок угля в разрезе смены, что вызывает трудности с калибровкой оборудования.

И, наконец, негативное влияние на качество товарной продукции оказывает человеческий фактор, который влияет на режимы работы обогатительного технологического оборудования фабрики, ввиду отсутствия информации для принятия верных решений или слишком большого объема информации для мгновенного анализа и корректировки режимов.

ГИПОТЕЗА И ПРЕДПОЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

На сегодняшний день один из главных трендов в развитии горнотехнических систем – цифровизация технологических процессов или установка аналогово-цифровых электронных и информационных систем для сбора достоверной информации о работе оборудования, процессов. Основным преимуществом цифровизации производства является получение достоверной информации о технологическом процессе, что может повысить эффективность управленческих решений, а также снизить издержки производства. Однако лишь малая часть автоматизированных систем, внедряемых для управления процессами горнотехнической системы, используется как информация для корректировки всей цепочки технологических процессов, начиная от забоя и до выхода готовой продукции [2].

На данный момент уже сложно найти на горных предприятиях обогатительные фабрики без внедренной автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП). Однако единицы горных предприятий используют данную информацию для комплексного анализа связанных технологических процессов.

В этой связи возникает гипотеза, предполагающая, что на основе показаний от автоматизированных систем (АСУ ТП, АСД, СУПР и пр.) возможно предсказывать качество входного сырья на фабрику с целью последующей корректировки режимов обогащения или схем транспортирования угля.

Гипотезу имеет смысл представлять в виде зависимости, по которой возможно отследить влияние различного рода параметров на выходное качество товарной продукции обогатительной фабрики. В контексте угледобывающего производства на качество выходного концентрата угля влияют:

- материнские качественные характеристики угля – теплота сгорания, выход летучих веществ, влажность, содержание серы;
- качественные характеристики, на которые может повлиять фабрика – зольность и в некоторой степени влажность.

Таким образом, для получения качественного концентрата необходимо выдержать в рамках коммерческого заказа все материнские характеристики через процесс шихтования, а зольность – через эффективность настройки

обогащительного оборудования согласно входящему потоку рядового угля.

Точное выполнения заказа по качеству и объему является ключевым показателем эффективности всего горного предприятия (*KPI*). Исходя из этого, можно сказать, что эффект оценивается следующей формулой:

$$\text{Инд. } KPI = \text{инд. } K \cdot \text{инд. } P,$$

где: инд. *K* – индекс качества товарной продукции, ее соответствие запросам потребителя; инд. *P* – индекс производительности, определяемый из эффективности функционирования технологических процессов и выполнения заказа в режимах, близких к номинальным.

При этом индекс качества и индекс производства в свою очередь декомпозируются на подмножество других зависимостей, включающих в себя показатели эффективности всех технологических процессов горнотехнической системы и системы обогащения.

ПРИМЕР ЛОКАЛИЗИРОВАННОГО ПРЕДИКТИВНОГО АНАЛИЗА

Одной из характеристик рядового угля, определяющей его качество, является гранулометрический состав. Его зачастую пытаются измерить в забое через объем ковша экскаватора, с помощью видеоаналитики, через замер шапки в кузове самосвала на основе лидарных технологий и т.п. Применение данных методов эффективно лишь при движении самосвала непосредственно к решетке приемного бункера фабрики, а не на разгрузку в промежуточный склад, поскольку маршрут следования угля через промежуточный склад состоит из следующих итераций: разгрузка самосвала на склад; последующая планировка штабеля бульдозером; погрузка в самосвал (как правило, фронтальным погрузчиком); разгрузка на склад фабрики; планирование бульдозером штабеля; подача угля на фабрику фронтальным погрузчиком (*рис. 1*). Некоторые марки угля являются достаточно «мягкими», поэтому описанная выше технологическая последовательность крайне негативно сказывается на точности измерения гранулометрического состава в забое при условии точного позиционирования техники на всех этапах транспортирования и позволяет отследить перевозимую горную массу.

Поэтому целевой точкой контроля гранулированного состава является выход с дробильных комплексов после приемного бункера фабрики, куда уголь подается в большинстве случаев фронтальным погрузчиком или экскаватором со склада фабрики. Однако измерить грансостав на выходе из дробилки не представляется возможным, поскольку присутствуют сложные условия для работы измерительного оборудования – сильная запыленность.

Как известно, на обогащительных фабриках в голове технологического процесса устанавливаются комплексы дробления, после которых подготовленный для обогащения уголь по конвейерам попадает в бункер питания фабрики, откуда питателями выдается на ленточный конвейер к классификационным грохотам (*рис. 2*).

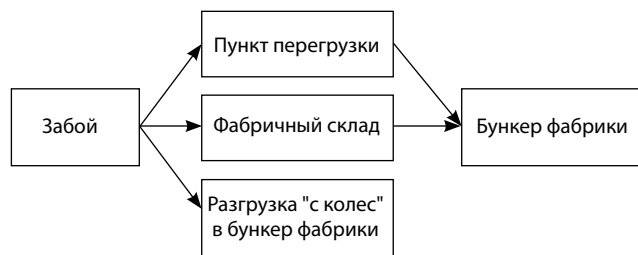


Рис. 1. Обобщенная схема перемещения сырья от забоя до фабрики

Fig. 1. Generalized layout of raw material flow from the mine face to the plant

Подобная структура углеподготовки дает возможность оперативно, через «виртуальный анализатор» (ВА), предварительно оценить общую крупность угля. По своей сути ВА – это анализатор сложноизмеряемых характеристик технологических процессов, основан на математической модели, показывающий зависимость динамики множества прямоизмеряемых параметров от изменения целевого показателя [3]. ВА обычно используют в нефтедобывающей отрасли, в горной промышленности они нашли свое применение в контуре АСУ ТП, где таким образом прогнозируют показатели качества сырья или продуктов.

Приведенная на *рис. 2* схема является частным примером использования ВА, где поток угля после дробления измеряется при помощи конвейерных весов. Затем он попадает в бункер известного объема с установленными в него бесконтактными уровнемерами. Выходной поток с бункера также фиксируется конвейерными весами. Таким образом, на основе перечисленных выше известных и измеряемых параметров и выбранного метода множественной линейной регрессии, метода группового учета аргументов или на основе использования гибридных нейронных сетей возможно предиктивно дать оценку выхода крупного класса угля с классификационных грохотов и оперативно оценить нагрузку на обогащительное

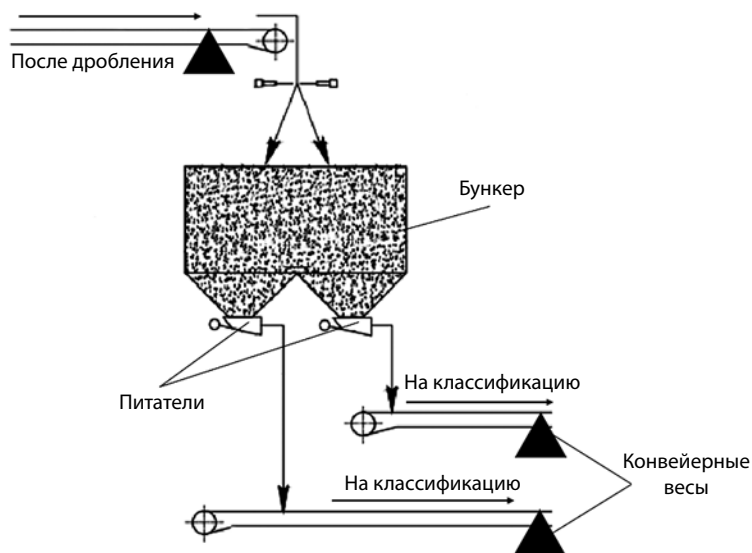


Рис. 2. Участок технологической схемы подготовки угля к обогащению

Fig. 2. A section of the technological flowchart of coal preparation

оборудование. Использование такого ВА позволит оперативному персоналу реагировать на изменяющиеся условия по качеству угля и соответствующим образом корректировать технологический процесс, например повышать или понижать нагрузку на фабрику при сигнализации ВА о крупности угля с целью распределения номинальной нагрузки между обогатительным оборудованием, отличным по обогащению классов угля.

Проверка построенного виртуального анализатора для предварительной оценки крупности угля на этапе дробления возможна только при реализации системы учета распределения продуктов на выходе обогатительного оборудования. Или, другими словами, необходимо внедрить автоматизированную систему контроля материального баланса, которая покажет распределение сырьевых потоков по технологическим процессам.

Пример результата такого сравнения представлен на рис. 3, где показания ВА сопоставляются с выходом надрешетного продукта с классифицирующих грохотов.

Таким образом, отслеживание выхода крупной фракции угля при помощи виртуального анализатора позволит косвенно оценить выход надрешетного продукта с классификационных грохотов, что в свою очередь дает возможность аналитическим способом преждевременно определить выход подрешетного продукта и тем самым предиктивно проанализировать нагрузку на обогатительное оборудование.

Однако стоит учитывать существенное ограничение при верификации подобных ВА на современных обогатительных фабриках – выход продуктов с обогатительного оборудования на всех технологических переделах измерить прямым методом невозможно или крайне проблематично. Причиной тому служит конструкция обогатительных фабрик, где зачастую один сборочный конвейер объединяет все стадии обогащения по каждому из продуктов. В результате выход концентрата, промпродукта и отходов на некоторых переделах технологической схемы приходится измерять аналитическими способами, что накладывает ряд дополнительных ограничений и погрешностей.

Приведенный пример использования ВА представляет собой решение локального характера, т.е. оптимизация, анализ и измерение осуществляются в рамках контура входных и выходных параметров конкретных типов оборудования, когда весь технологический процесс от забоя до получения конечной продукции остается без внимания.

ВЫВОД И ОБСУЖДЕНИЕ

Для проверки выдвинутой ранее гипотезы в широком смысле, а именно на основе показаний автоматизированных систем предсказывать качество входного сырья на этапе подготовительных работ, необходимо рассматри-

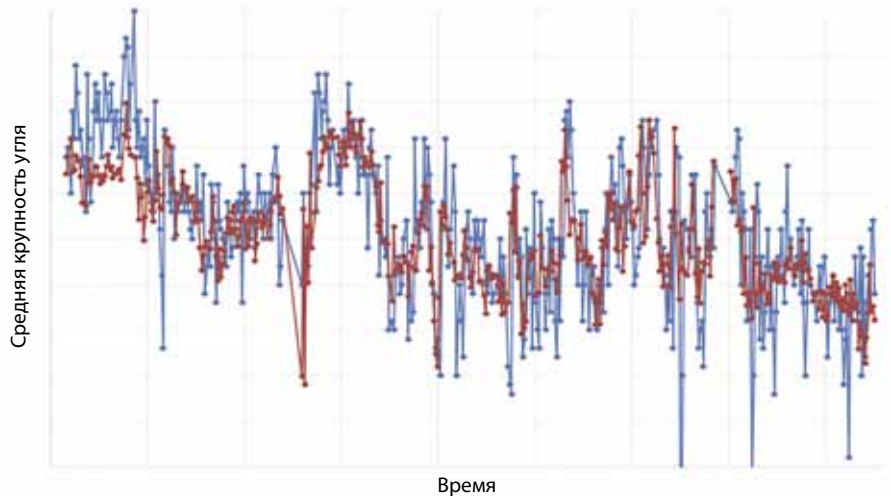


Рис. 3. Пример виртуального анализатора на крупность угля, синим цветом – показания анализатора; красным цветом – выход крупного класса на классифицирующем грохоте

Fig. 3. An example of virtual coal grade analyzer, where the blue color shows the analyzer readings, and the red color shows the output of the coarse-grade coal at the classifying screen

вать весь технологический процесс как единый комплекс. То есть автоматизированные системы должны быть увязаны в единое цифровое пространство, позволяющее отслеживать сырье не только по объему, но и по качественным характеристикам. Другими словами, различного рода построенные локальные модели, созданные на фабрике (например, ВА), или прямые показания с датчиков оборудования обогатительных фабрик, автосамосвалов, погрузчиков и пр. так или иначе необходимо «транслировать» на выемочные блоки массива.

Идея проводимого исследования заключается в том, чтобы найти различного рода зависимости между геологическими условиями, характеристиками работы технологического оборудования, результатами лабораторных исследований и т.д. Подход к управлению качеством на базе подобных аналитических цифровых продуктов полностью изменит устоявшиеся бизнес-процессы в управлении качеством. При установлении математических зависимостей и прозрачности потока сырья от забоя до обогатительной фабрики последняя будет глубоко интегрирована в горные работы, а не ограничиться с разрезом на перегрузочных складах или решетке приемного бункера.

Однако полноценно возможно провести подобное исследование только при наличии качественных данных по всем технологическим переделам, начиная от подготовительных работ, заканчивая отгрузкой готовой продукции.

Например, при открытом ведении горных работ уже существуют ИТ-продукты, способные отследить качество и степень его усреднения на перегрузочных складах и непосредственно в кузове самосвала. Так, на рис. 4 представлен фрагмент продукта российской компании «Pikleta», который виртуально производит деление складских площадей на секции и по позиционированию самосвалов определяет усредненное качество сырья в границах каждой секции [4].

В целом, контроль, отслеживание и анализ параметров всего технологического оборудования позволят собрать базу данных архивной информации, которая дает возможность проецировать все полученные в процессе обогащения параметры на выемочный блок, откуда был отгружен уголь, при условии сквозной интеграции систем для контроля качества угля от забоя до склада готовой продукции [5].

С учетом вышесказанного приоритизация в процессе автоматизации и цифровизации технологических процессов должна рассматриваться параллельно основным технологическим процессам. К примеру, автоматизированная система контроля расхода топлива на автосамосвалах не должна иметь приоритет над системой сквозного учета качества на складах, хоть и мгновенный экономический эффект от системы контроля топлива, несомненно, в моменте может быть выше. Однако реализованная система контроля и учета складов позволит развивать цифровые системы в контуре фабрики, что в комплексе даст гораздо больший экономический эффект, чем контроль расхода топлива на самосвалах.

К сожалению, на данный момент времени в угледобывающей промышленности внедрение систем цифровизации и автоматизации осуществляется, базируясь на локальных быстрых экономических эффектах без анализа всей структуры технологических процессов и без фундаментального понимания подходов к сбору, анализу данных при управлении горнотехническими системами.

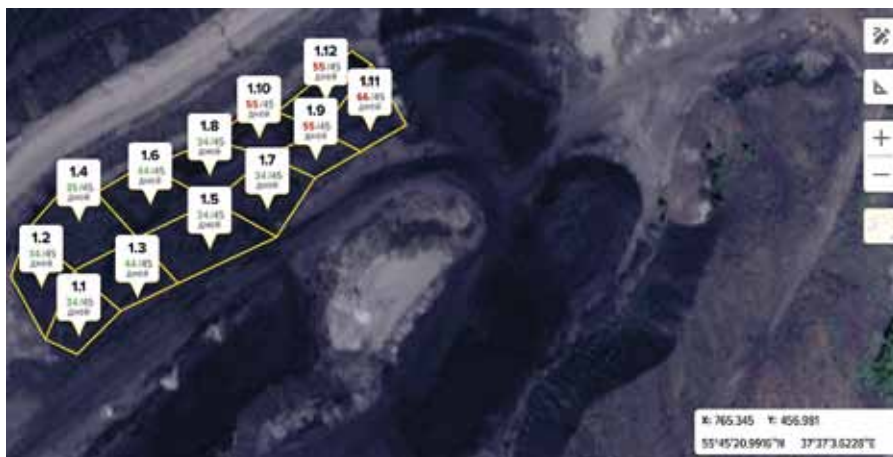


Рис. 4. Секционное складирование полезного ископаемого

Fig. 4. Sectional stockpiling of useful minerals

Список литературы

1. Хазин М.Л. Роботизированные карьерные самосвалы // Известия Уральского государственного горного университета. 2020. № 3. С. 123-130.
2. Методические подходы к стандартизации сбора, хранения и анализа данных при управлении горнотехническими системами / В.Н. Захаров, Д.Р. Каплунов, Д.А. Клебанов и др. // Горный журнал. 2022. № 12. С. 23-43. DOI: 10.17580/gzh.2022.12.
3. Усовершенствованное управление ТП: от контура регулирования до общезаводской оптимизации / П.Л. Логунов, М.В. Шаманин, Д.В. Кнеллер и др. // Автоматизация в промышленности. 2015. № 4. С. 4-14.
4. Официальный сайт Piklema. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.piklema.ru/> (дата обращения: 15.11.2023).
5. Рыльникова М.В., Клебанов Д.А., Князькин Е.А. Анализ данных как основа повышения эффективности работы горнотранспортного оборудования при ведении открытых горных работ // Горная промышленность. 2023. № 1. С. 52-56. URL: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-1-52-56> (дата обращения: 15.11.2023).

Original Paper

UDC 622.795.4:658.5 © D.A. Klebanov, E.A. Knyazkin, M.A. Makeev, 2021 ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2023, № 12, pp. 92-97
DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-12-92-97>

Title
PREDICTIVE ANALYTICS IN QUALITY MANAGEMENT AT MINING AND PROCESSING OPERATIONS AS EXEMPLIFIED BY COAL MINING AND PROCESSING

Authors

Klebanov D.A.¹, Knyazkin E.A.¹, Makeev M.A.²

¹ Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences (IPKON RAS), Moscow, 111020, Russian Federation

² Piklema LLC, Moscow, 107078, Russian Federation

Authors Information

Klebanov D.A., PhD (Engineering), Head of Laboratory of Intelligent Monitoring Methods of Hydraulic Engineering Installations, e-mail: Klebanov_d@ipkonran.ru

Knyazkin E.A., PhD (Engineering), Head of the Laboratory of Environmentally Balanced Subsoil Development

Makeev M.A., Managing Director, Research Associate, e-mail: mm@piklema.com

Abstract

The article discusses the challenges of controlling charge preparation and coal washing while mining mineral deposits. It is pointed out that quality control of different technological processes of the mining system leads to delays or unaccounted quality from 1500 to 5000 tons, which affects the output parameters of the commercial products of the preparation plant. A hypothesis of optimizing the mining system operation is formulated, which consists in the fact that based on the analytics of coal quality data

COAL PREPARATION

collected in a single system it is possible to determine the types of possible losses and their quantitative index, as well as to work out solutions aimed at harmonizing the coal preparation processes and technological processes of the mining system. The formulated hypothesis has been tested and it has been proved that timely determination of loss types based on analyzing the technological process data can significantly increase the efficiency of mining operations and preparation when managing the mining engineering system. An approach is proposed to prioritizing the tasks of digitalization of mining engineering systems and coal preparation in coal mining. The idea of evolutionary formation of business processes at the interface between the surface mine and the coal preparation plant is shown against the background of IT tools development.

Keywords

Mining engineering system, Quality management, Ore flows, Big data, Data analytics, Production optimization, Coal preparation, Warehouse management, Advisor to dispatcher, Virtual analyzer.

References

1. Khazin M.L. Robotic mining dump trucks. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, 2020, (3), pp. 123-130. (In Russ.).
 2. Zakharov V.N., Kaplunov D.R., Klebanov D.A. et al. Methodical approaches to the standardization of data collection, storage and analysis in the management of mining engineering systems. *Gornyj zhurnal*, 2022, (12), pp. 23-43. (In Russ.). DOI: 10.17580/gzh.2022.12.

3. Logunov P.L., Shamanin M.V., Kneller D.V. et al. Advanced technological process control: from control loop to plant-wide optimization. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2015, (4), pp. 4-14. (In Russ.).
 4. Official website of Piklema. [Electronic resource]. Available at: <https://www.piklema.ru/> (accessed 15.11.2023).
 5. Rylnikova M.V., Klebanov D.A. & Knyazkin E.A. Data analysis as a basis for improving the efficiency of mining equipment in open pit operations. *Gornaya promyshlennost'*, 2023, (1), pp. 52-56. (In Russ.). Available at: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-1-52-56> (accessed 15.11.2023).

Acknowledgements

The research was supported by the Russian Science Foundation Grant No 22-17-00142, <https://rscf.ru/project/22-17-00142/>.

For citation

Klebanov D.A., Knyazkin E.A. & Makeev M.A. Predictive analytics in quality management at mining and processing operations as exemplified by coal mining and processing. *Ugol*, 2023, (12), pp. 92-97. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-12-92-97.

Paper info

Received September 18, 2023
 Reviewed November 10, 2023
 Accepted November 27, 2023

Горняки шахты «Есаульская» добыли 1 млн тонн угля с начала 2023 г.



31 октября 2023 г. добычной участок № 1 шахты «Есаульская» Распадской угольной компании (РУК) под руководством начальника участка Дмитрия Волкова и бригадира Олега Басманова выдал на-гора 1 млн тонн угля с начала года. С производственным достижением горняков поздравил генеральный директор Распадской угольной компании Владимир Мельниченко.

Миллион тонн угля добыт из двух лав по пласту 29а. До апреля 2023 г. бригада Олега Басманова дорабатывала запасы лавы № 29-39. После ремонта оборудования, который занял более 3 месяцев, в июле горняки начали добывать уголь из новой лавы № 29-30. В настоящее время здесь ежемесячно выдают на-гора 180 тыс. тонн угля.

Производительно работать им помогают современный комбайн и механизированный комплекс с новой управляющей гидравликой. Для безопасной работы лава № 29-30 оснащена современными цифровыми датчиками контроля метана, кислорода и оксида углерода. Для проветривания выемочного участка и отвода метановоздушной смеси с поверхности пробурили 4 скважины большого диаметра.

Общие запасы пласта 29а – более 10 млн тонн коксующегося угля марки ГЖ.

*Управление по связям с общественностью
 Распадской угольной компании*



Генеральный директор РУК Владимир Мельниченко вручил горнякам памятный кубок и благодарственное письмо за отличную работу

