

УДК 622.233.235

Реготунов Андрей Сергеевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория разрушения горных пород,
Институт горного дела УрО РАН,
620075 г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: pochta8400@inbox.ru

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ И ВЫБОРУ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ АДАПТАЦИИ БУРОВЫХ РАБОТ К ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ УСЛОВИЯМ НА КАРЬЕРАХ*

Аннотация:

Представлена систематизированная информация о применяемых технических решениях для адаптации производимых на карьерах России буровых работ к изменяющимся условиям, повышающим их энергоэффективность и безопасность. В результате анализа методом экспертных оценок установлено, что эффективность и безопасность реализации технологических изменений в буровых работах определяется техническими решениями, связанными с получением информации о состоянии горных пород в естественном залегании, изменением способа бурения, конструкции бурового станка и инструмента. Эти направления исследования имеют значительные резервы для развития буровых работ и заслуживают внимания в первую очередь. Также установлены наиболее значимые параметры, учитываемые при выборе технических решений для адаптации параметров разрушения массивов горных пород при бурении взрывных скважин. Приведен порядок оценки эффективности инноваций в процессе совершенствования буровзрывных работ (БВР), основанный на поэтапном изучении влияющих факторов, управляющих процессами выбора адаптационных решений к меняющимся условиям, выявлении рациональных переходных процессов в результате применения статического подхода к технико-экономической оценке целесообразности применения с учетом возможностей горного предприятия. Определены перспективные направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: разрушение горных пород, буровые работы, карьер, адаптация, технические решения, факторы.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.04.089

Regotunov Andrey S.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.;
e-mail: pochta8400@inbox.ru

A METHODOLOGICAL APPROACH TO EVALUATING AND SELECTING TECHNICAL SOLUTIONS FOR ADAPTING DRILLING OPERATIONS TO CHANGING CONDITIONS IN QUARRIES

Abstract:

The article presents systematized information on the applied technical solutions for adapting drilling operations performed in Russian quarries to changing conditions that increase their energy efficiency and safety. As a result of the analysis by the method of expert assessments, it was found that the effectiveness and safety of the implementation of technological changes in drilling operations is determined by technical solutions related to obtaining information about the state of rocks in their natural occurrence, changing the drilling method, the design of the drilling machine and tools. These areas of research have significant reserves for the development of drilling operations and deserve attention first of all. The most significant parameters have also been determined, which are taken into account when choosing technical solutions for adapting the parameters of destruction of rock masses during drilling of blast wells. The procedure for evaluating the effectiveness of innovations in the process of improving the drilling and blasting operations is given, based on a step-by-step study of the influencing factors governing the selection of adaptive solutions to changing conditions, identifying rational transients as a result of applying a static approach to the feasibility assessment of the feasibility of application, taking into account the capabilities of a mining enterprise. Promising areas for further research have been identified.

Key words: rock destruction, drilling, quarry, adaptation, technical solutions, factors.

* Обобщение ранее проведенных исследований, финансируемых в рамках Госзадания №075-00581-19-00, темы № 0405-2019-0005(2019-2021): «Методы учета переходных процессов технологического развития при освоении глубокозалегающих сложноструктурных месторождений полезных ископаемых», с дополнительным привлечением хозяйственных средств, выполнено для целей Государственного задания №075-00412-22 ПР, темы 1 (2022-2024): «Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем» (FUWE-2022-0005), пер. №1021062010531-8-1.5.1.

Введение

При освоении открытым способом месторождений твердых полезных ископаемых широко применяется бурение взрывных скважин шарошечными буровыми станками. В России и СНГ объем шарошечного бурения составляет более 90 %, и в перспективе указанный способ бурения сохранит свои позиции на открытых горных работах. На карьерах РФ и СНГ широкое применение получили отечественные станки среднего типа (по массе) – СБШ -250МН и его модификации.

Основным видом породоразрушающего инструмента, применяемого на современных буровых станках, являются шарошечные долота режуще-скалывающего действия. Наибольшее применение на карьерах России и СНГ получили трехшарошечные долота.

В себестоимости бурения 1 м скважины в зависимости от крепости разрабатываемых руд и пород затраты на буровой инструмент составляют от 15 до 75 % [1], а суммарные затраты на буровой инструмент за весь период работы бурового станка превышают в несколько раз номинальную стоимость буровой техники.

Нарастание по мере увеличения глубины извлекаемых запасов геологической информации и изменение горнотехнических условий, постепенное замещение на предприятиях устаревшей горной техники новыми прогрессивными моделями, изменение экономических условий и других внешних факторов вызывают необходимость решения вопросов устойчивого технологического развития буровых работ.

Таким образом, цель работы – разработка методического подхода для оценки и выбора технических решений при адаптации буровых работ на карьерах.

Систематизация технических решений для адаптации параметров буровых работ

Факторы, вызывающие необходимость совершенствовать параметры буровой техники, можно разделить на несколько основных групп [2]:

- горнотехнические;
- горно-геологические (свойства и структура массива горных пород);
- конструктивные параметры бурового инструмента;
- технические параметры бурового станка;
- система технического обслуживания и ремонта;
- требования промышленной безопасности;
- экономические.

Влияние совокупности факторов в период эксплуатации в карьере вызывает необходимость адаптации параметров буровой техники и инструмента к новым условиям. Адаптация подразумевает поддержание основных параметров технологического процесса на приемлемом уровне с точки зрения энергоэффективности и промышленной безопасности при изменении условий внешней и внутренней среды за счет переходных процессов. Под переходными процессами понимаются заранее предусмотренные действия, направленные на своевременное выявление и учет недостающей информации о взаимосвязях между параметрами принимаемых нововведений и изменяющимися условиями ведения горных работ в динамике развития карьера [3]. Результатом заранее организованных и своевременно произведенных действий в производственной системе является [4] внедрение ранее апробированных или инновационных технических решений; модернизация действующей технологии с целью компенсации негативного воздействия внутренней среды; приспособление технологического процесса к условиям сокращения объемов производства при затухании горных работ или устойчивом снижении спроса на продукцию предприятия.

Рассмотрим основные виды современных технических решений для адаптации буровых работ к меняющимся условиям, внедренные в течение последних 20 лет на горных предприятиях с открытым способом разработки месторождений (табл. 1).

Таблица 1

Технические решения для адаптации параметров буровых работ к меняющимся условиям

Группа	Техническое решение	Результат внедрения на предприятиях	Горное предприятие
1	2	3	4
I	Изменение конструкции долота под конкретные породы	В результате создания рационального механизма разрушения повысились производительность бурового станка, износостойчивость шарошечных долот и снизились затраты на буровой инструмент на 35 – 40 %. Обеспечено высокое качество дробления горной массы.	ПАО «Ураласбест», Качканарский ГОК, Костомукшский ГОК [5 – 7]. В условиях карьеров Красноярско-го края и Хакасии - Горевский ГОК, Полнос [9 - 10]
II	Изменение способа бурения	Переход с ударно-канатного способа на шарошечный позволил значительно повысить производительность, а по себестоимости бурения 1 м скважины произошло существенное снижение затрат.	ПАО «Ураласбест», Качканарский ГОК, Костомукшский ГОК, Михайловский ГОК, Лебединский ГОК, Оленегорский ГОК, Стойленский ГОК и др.
	Изменение способа бурения	Переход на некоторых блоках от шарошечного к термическому способу бурения повысил производительность бурения скважин.	Михайловский ГОК. Выборочно на отдельных блоках, так как термический способ бурения имеет ограниченную область применения, связанную с избирательностью термического разрушения, эффективность которого в большой степени зависит от содержания SiO ₂ в составе массива (не менее 68 – 72 %).
III	Изменение режима бурения	Позволяет снизить параметры вибрации пола машинного отделения и рабочего места машиниста (амплитуду колебаний, а также частично частоту колебаний), повышает сменную производительность не менее чем на 15 %.	На карьерах: ПАО Алроса, ПАО «Полнос», Мазульского известнякового рудника ОАО «Русал-Ачинск», Нефелинового рудника ОАО «Русал», угольные разрезы СУЭКа [10 - 11].
		Обеспечивает повышение скорости бурения на 30 – 40 % без снижения стойкости шарошечного долота.	
IV	Совершенствование конструкции бурового станка	В результате модернизации буровых станков СБШ-250МНА-32, проведенной заводом-изготовителем ОАО «Рудгормаш» за последние 15 лет, производительность бурения ими выросла на 15 - 20 %.	На карьерах России: Качканарский ГОК, Лебединский ГОК, Михайловский ГОК, Олимпиадинский ГОК и др. [12 – 15].

Окончание таблицы 1

1	2	3	4
		На предприятиях в последнее время эксплуатируются новые высокопроизводительные каркасно-платформенные буровые станки СБШ 250/270-60 КП. Улучшилась организация их ремонта и увеличилась надежность эксплуатации.	
V	Контроль процесса бурения и уточнение физико-механических свойств горных пород	Повышение контроля за расходом бурового инструмента.	ОАО «Карельский Окамыш», ОАО «Разрез Тугнуйский», ОАО «Полиметалл», ОАО «СУЭК-Кузбасс», Айхальский ГОК ПАО «Полюс», Оленегорский ГОК (Олкон) [16 – 17].
		Повышение безопасности буровых работ (создание дистанционно управляемых станков для работы на карьерах АК «АЛРОСА» на узких площадках, опасность их обрушения велика).	
		Сокращение расходов на ВВ и бурение скважин до 10 %, повышение производительности горнотранспортного оборудования до 8 %, улучшение качества дробления горной массы. Экономический эффект составил 510 млн руб. на разрезе «Тугнуйский», АО «СУЭК» – составил 510 млн руб.	
VI	Система технического обслуживания и ремонтов	Несвоевременное списание устаревших станков ведет к снижению производительности и повышению опасности применения.	ОАО «Ураласбест» [18], Качканарский ГОК, другие железорудные карьеры.

Из шести основных групп технических решений (табл. 1) для адаптации параметров буровых работ к изменяющимся условиям влияние на смежные процессы оказывают две группы:

– изменение конструкции долота под конкретные породы при условии, что меняется и диаметр;

– контроль процесса бурения взрывных скважин с одновременным уточнением свойств горных пород, так как обеспечивается техническая возможность повышения качества дробления за счет корректировки конструкции скважинного заряда взрывчатого вещества в соответствии с уточненным распределением горных пород в массиве по трудности бурения.

Влияние отображается на организационно-технических факторах и параметрах:

– взрывного разрушения – удельный расход ВВ, гранулометрический состав взорванной горной массы;

– экскавации – емкость ковша экскаватора, длительность цикла погрузки, производительность экскаватора, удельные затраты на экскавацию;

– транспортирования – объем кузова транспортного средства, грузоподъемность транспортного средства, удельные затраты на транспортирование, производительность транспорта;

– крупного дробления на дробильно-обоганительной фабрике – угол захвата, производительность, мощность электродвигателя.

Для оценки влияния указанных технических решений на смежные технологические решения в будущих исследованиях процесса адаптации буровых работ на карьерах предстоит выбрать специальный критерий.

Оценка технических решений по значимости влияния на адаптацию параметров буровых работ на карьерах России

Для оценки относительной важности технических решений применен метод экспертных оценок мнений специалистов, выявленных по их публикациям [19]. Мнения специалистов переведены в количественную форму – единицей указано изменение показателя, ноль показывает отсутствие изменения показателя при данном техническом решении. В табл. 2 приведены параметры, учитываемые при оценке технических решений при осуществлении технологических изменений на карьерах России при адаптации параметров буровых работ к меняющимся условиям.

Таблица 2

Результаты оценки относительной важности технических решений для адаптации параметров буровых работ

Техническое решение	Оцениваемый показатель										B_i	Нормированная относительная важность B_{in}
	Производительность			Эффективность		Безопасность				Качество		
	Мощность бурового станка	Квалификация персонала	Организация процесса	Затраты материальные	Время процесса	Персонал	Окружающая среда	Оборудование	Инфраструктура			
Контроль процесса бурения и уточнение физико-механических и структурных характеристик массива горных пород	1	1	1	1	1	1	Техническое решение	Оцениваемый показатель	B_i	1	0,8	0,200
Изменение способа бурения	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0,8	0,200
Изменение режима бурения	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0,6	0,150
Изменение конструкции бурового инструмента (диаметр, параметры вооружения)	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0,5	0,125
Изменение конструкции бурового станка без изменения способа бурения	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0,7	0,175
Совершенствование системы технического обслуживания и ремонтов	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0,6	0,150
											Суммарное значение отн. важности	Сумма нормированной отн. важности
Относительная важность показателя W_i	1	0,67	0,67	1	1	1	0	0,67	0	0,67	Относительная важность в баллах $\Sigma=6,68$	
Нормированное значение относительной важности показателя W_{in}	0,150	0,100	0,100	0,150	0,150	0,150	0	0,100	0	0,100	Сумма значений нормированной относительной важности $\Sigma=1$	

Для каждого технического решения определялся показатель относительного влияния на выбранные параметры B_i :

$$B_i = (\sum_{i=1}^k T) / N. \quad (1)$$

Далее рассчитывался нормированный показатель влияния B_{in} :

$$B_{in} = B_i / \sum_{i=1}^k B_i, \quad (2)$$

где $\sum_{i=1}^k T$ – количество показателей, изменяющихся в лучшую сторону при данном техническом решении; N – общее количество оцениваемых параметров.

Для оценки относительной важности каждого параметра W_i из всей совокупности оцениваемых при выборе того или иного технического решения производилось суммирование баллов («по вертикали»), присвоенных по каждому конкретному техническому решению для определенного наименования параметра.

Далее сумма баллов, полученная по каждому параметру, делилась на общее количество рассматриваемых технических решений. Полученные значения W_i по каждому параметру суммировались («по горизонтали») с целью определения нормированной относительной важности W_{in} согласно выражению:

$$W_{in} = W_i / \sum_{i=1}^{n=k} W_i, \quad (3)$$

где W_i – значение относительной важности параметра, то есть отношение суммы технических решений, в каждом из которых учитывается рассматриваемый параметр, отнесенный к общему количеству технических решений; $\sum_{i=1}^{n=k} W_i$ – суммарное значение относительной важности в баллах по каждому параметру. По нормированной относительной важности определялась значимость каждого оцениваемого параметра при выборе технического решения.

В результате анализа методом экспертных оценок относительной важности технических решений для приведения производственной системы буровых работ к улучшенному состоянию установлено, что эффективная и безопасная адаптация параметров буровых работ (рис. 1), в первую очередь, основывается на технических решениях, связанных с получением информации о состоянии горных пород в естественном залегании, изменением способа бурения, конструкции бурового станка.



Рис. 1. Относительная важность технических решений для адаптации параметров буровых работ

В результате экспертной оценки относительной важности показателей, которые учитываются при выборе технических решений (рис. 2), установлено, что, в первую очередь, специалисты обращают внимание на влияние вносимых технических изменений на величину потребляемой буровым станком мощности, величину материальных ресурсов и времени, затрачиваемых на процесс бурения, а также на изменение промышленной безопасности для персонала. В средней степени оценивают при выборе технических решений их влияние на необходимость изменения требований к квалификации персонала, на уровень промышленной безопасности буровых станков, организацию процесса и качество пробуренных скважин. Предполагаемые изменения безопасности инфраструктуры и в целом окружающей среды при выборе технических решений не учитываются.



Рис. 2. Относительная важность показателей, учитываемых при выборе технических решений

Следует отметить, что компенсация негативного влияния факторов начинается на горных предприятиях, как правило, за счет внутренних резервов и в тот момент, когда становится ясно, что без осуществления перехода на новые параметры процесса бурения скважин дальнейшая производственная деятельность неэффективна и небезопасна.

Важно также отметить, что адаптация параметров буровых работ ведется с учетом одной какой-то определенной группы факторов, выбранных интуитивно специалистами. В результате такого субъективного подхода предприятия закладывают предпосылки увеличения затрат и повышения рисков аварийных ситуаций в перспективе. А далее для решения той же задачи вновь потребуется отвлечение сил предприятия. Такой подход является дополнительным источником психологической напряженности у работников предприятий. От того, какой подход применяется, зависит качество и надежность решения задачи.

Структура оценки и выбора технических решений

Оценка целесообразности выбора технических решений производится на основании порядка, указанного на рис.3.



Рис.3. Порядок обоснования выбора технических решений для адаптации буровых работ с учетом изменения горнотехнических условий

Согласно рис. 3 вначале выполняется анализ исходной геолого-маркшейдерской документации, в том числе планов и разрезов карьера; плана развития и текущего положения горных работ; текущего проекта разработки месторождения (технологической части).

Проводится изучение документации, регламентирующей БВР – типового проекта буровзрывных работ, проектов БВР выемочных блоков.

Изучается техническая документация на применяемые буровые станки и инструмент. Устанавливается среднесписочное количество буровых станков, сроки службы, модели, паспортные характеристики, режимы бурения.

Проводится ретроспективный анализ достигнутых технико-экономических показателей эксплуатации буровых станков и инструмента за несколько лет в различных по крепости и трещиноватости горных породах.

В результате выполненных действий устанавливаются исходные горнотехнические условия ведения буровых работ, влияющие организационные факторы и перечень горно-геологических и технических факторов, требующих экспериментального изучения на отдельных выемочных блоках.

Далее в объеме исследуемых блоков проводится инструментальное измерение параметров работы двигателей бурового станка [20] в различных по крепости и трещиноватости горных породах, увязанное с исследованием изменения состояния шарошечных долот. Выполняется изучение условий очистки скважин от продуктов разрушения.

В результате обработки полученных данных определяется информация об изменении во времени бурения скважин показателей процесса – осевого усилия, момента и

частоты вращения, мощности компрессора, длительности вспомогательных операций, скорости и энергоемкости бурения, трудности бурения.

Фактические данные об изменении показателей процесса бурения проходят многофакторный дисперсионный анализ.

В результате многофакторного дисперсионного анализа статистических характеристик определяются факторы, в наибольшей степени влияющие на снижение скорости и увеличение энергоемкости бурения в различных по крепости и трещиноватости горных породах. Учитывая установленную информацию о влиянии значимых факторов, определяется рациональный спектр адаптационных технических решений, компенсирующих факторы, в наибольшей степени снижающих эффективность буровых работ.

Для выбранных технических решений производится статическая (на данный момент) технико-экономическая оценка эффективности их применения. Подход основан на применении критерия, представляющего неравенство:

$$\Delta \mathcal{E} > 0$$

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta \mathcal{D} + \Delta \mathcal{Z}_3 + \Delta \mathcal{Z}_{\text{пб}} + \Delta \mathcal{Z}_{\text{вр}}, \quad (4)$$

где $\Delta \mathcal{E}$ – экономия затрат, руб/м; $\Delta \mathcal{D}$ – изменение дохода, получаемого от внедрения предлагаемого технического решения, руб/м; $\Delta \mathcal{Z}_3$ – изменение эксплуатационных затрат, руб/м; $\Delta \mathcal{Z}_{\text{пб}}$ – изменение затрат, связанных с повышением уровня промышленной безопасности, руб/м; $\Delta \mathcal{Z}_{\text{вр}}$ – изменение затрат, связанных с влиянием на качество дробления в смежном технологическом процессе, руб/м.

Для оценки внедрения технического решения – контроль процесса бурения и уточнение физико-механических и структурных характеристик массива горных пород принято неравенство, полученное на основе выражения [21]:

$$\Delta \mathcal{E} > 0$$

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta \mathcal{D} + \Delta \mathcal{Z}_{\text{ав}} + \Delta \mathcal{Z}_{\text{вр}}, \quad (5)$$

где $\Delta \mathcal{D}$ – изменение дохода, получаемого от эксплуатации бурового станка, оснащенного устройствами контроля, руб/м; $\Delta \mathcal{Z}_3$ – изменение эксплуатационных затрат, руб/м; $\Delta \mathcal{Z}_{\text{ав}}$ – изменение затрат, связанных с возможными авариями либо затратами по предотвращению аварий (по результатам технического диагностирования), руб/м; $\Delta \mathcal{Z}_{\text{вр}}$ – изменение затрат, связанных с повышением точности соблюдения параметров бурения и их влиянием на качество дробления в последующем процессе, руб/м.

Изменение дохода, получаемого от эксплуатации бурового станка $\Delta \mathcal{D}$, определяется согласно выражению:

$$\Delta \mathcal{D} = \Delta C_6 Q, \quad (6)$$

где ΔC_6 – изменение себестоимости бурения, руб/м; Q – объем бурения скважин, м.

Для оценки внедрения технического решения – изменение способа бурения для конкретных условий ведения буровых работ, модифицируя выражение, приведенное в [22], получили критерий:

$$\Delta \mathcal{E} > 0$$

$$\Delta \mathcal{E} = \left[\left(\frac{603_{\text{п}}}{\vartheta_1 t_{\text{см}}} + \frac{S_{\text{д1}}}{L_{\text{д1}}} \right) - \left(\frac{603_{\text{п}}}{\vartheta_2 t_{\text{см}}} + \frac{S_{\text{д2}}}{L_{\text{д2}}} \right) + B_+ \right] Q, \quad (7)$$

где $3_{\text{п}}$ – условно-постоянные расходы на бурение скважин, руб; $t_{\text{см}}$ – продолжительность чистого бурения станками в смену, зависящая от организации работ, мин; ϑ_1 – фактическая скорость бурения до внедрения нового способа, м/ч; $S_{\text{д1}}$ – стоимость применяемых шарошечных долот, руб; $L_{\text{д1}}$ – стойкость применяемых шарошечных долот при рациональном режиме прежнего способа бурения, м; ϑ_2 – фактическая скорость бурения предлагаемым способом, м/ч; $S_{\text{д2}}$ – стоимость бурового инструмента для нового способа, руб; $L_{\text{д2}}$ – стойкость бурового инструмента при рациональном режиме нового способа бурения, м; B_+ – экономия затрат, связанная с повышением уровня безопасности бурения скважин, руб/м; Q – объем бурения скважин, м.

Для оценки внедрения технического решения – изменения конструкции бурового станка – предложен критерий:

$$\Delta \mathcal{E} > 0$$

$$\Delta \mathcal{E} = [(C_6 - C_H) + E(K_H - K_6) + \Delta B_+ + \Delta \mathcal{E}_{\text{серв}} \pm \mathcal{E}_{\text{доп}}] Q_{\text{годн}}, \quad (8)$$

где C_6 – себестоимость бурения базовой (применяемой) техникой, руб/м; C_H – себестоимость бурения станком новой модели, руб/м; K_H – удельные капитальные затраты для базовой (применяемой) буровой техники, руб/м; K_6 – удельные капитальные затраты для буровой техники новой модели, руб/м; E – нормативный коэффициент экономической эффективности; ΔB_+ – экономия затрат, связанная с повышением уровня безопасности бурения скважин, руб/м; $\Delta \mathcal{E}_{\text{серв}}$ – экономия затрат, связанная с улучшением сервисного обслуживания, руб/м; $\mathcal{E}_{\text{доп}}$ – дополнительная годовая экономия (или убытки), возникающие при изменении технологии буровзрывных работ при эксплуатации буровых станков новой модели, руб/м; зависит от полноты учета влияющих на экономику бурения факторов; $Q_{\text{годн}}$ – годовой объем буровых работ с применением буровых станков новой модели, м.

Себестоимость бурения базовой (применяемой) техникой C_6 определяется согласно [23]:

$$C_6 = \frac{C_{\text{мсб}}}{\Pi_{\text{сб}}} + \frac{C_{\text{д}}}{L_6}, \quad (9)$$

где $C_{\text{мсб}}$ – себестоимость машино-смены для применяемого бурового станка, руб; $\Pi_{\text{сб}}$ – сменная производительность применяемого бурового (базового) станка; $C_{\text{д}}$ – стоимость шарошечного долота, руб; L_6 – стойкость шарошечного долота при бурении взрывных скважин базовым (применяемым) буровым станком, м.

$$C_{\text{мсб}} = C_{\text{зпб}} + C_{\text{аб}} + C_{\text{эб}} + C_{\text{мб}} + C_{\text{вб}} + C_{\text{тб}}, \quad (10)$$

где $C_{\text{зпб}}$ – сменные затраты на заработную плату машинисту применяемого бурового станка, руб; $C_{\text{аб}}$ – сменные затраты на амортизационные отчисления, руб; $C_{\text{эб}}$ – сменные затраты на потребляемую энергию, руб; $C_{\text{мб}}$ – сменные затраты на вспомогательные материалы, используемые при бурении; $C_{\text{вб}}$ – сменные затраты на расход воды, используемый при бурении, руб; $C_{\text{тб}}$ – сменные затраты на текущие и капитальные ремонты применяемого (базового) бурового станка, руб.

$$C_H = \frac{C_{\text{мсн}}}{\Pi_{\text{сн}}} + \frac{C_{\text{д}}}{L_H}, \quad (11)$$

где $C_{\text{мсн}}$ – себестоимость машино-смены для бурового станка новой модели, руб; $\Pi_{\text{сн}}$ – сменная производительность бурового станка новой модели; $C_{\text{д}}$ – стоимость шарошечного долота, руб; L_H – стойкость шарошечного долота при бурении взрывных скважин буровым станком новой модели, м.

$$C_{\text{мсн}} = C_{\text{зпн}} + C_{\text{ан}} + C_{\text{эн}} + C_{\text{мн}} + C_{\text{вн}} + C_{\text{тн}}, \quad (12)$$

где $C_{\text{зпн}}$ – сменные затраты на заработную плату машинисту бурового станка новой модели, руб; $C_{\text{ан}}$ – сменные затраты на амортизационные отчисления, руб; $C_{\text{эн}}$ – сменные затраты на потребляемую энергию, руб; $C_{\text{мн}}$ – сменные затраты на вспомогательные материалы, используемые при бурении станком новой модели; $C_{\text{вн}}$ – сменные затраты на расход воды, используемый при бурении, руб; $C_{\text{тн}}$ – затраты на текущие и капитальные ремонты бурового станка новой модели, руб.

$$K_H = \frac{1,3K_{\text{балн}}}{Q_{\text{годн}}}, \quad (13)$$

где $K_{\text{балн}}$ – балансовая стоимость бурового станка новой модели, руб.:

$$K_{\text{балн}} = (1,12 \div 1,15) \Pi_H, \quad (14)$$

где Π_H – цена бурового станка новой модели, руб,

$$K_6 = \frac{1,3K_{\text{балб}}}{Q_{\text{годн}}}, \quad (15)$$

где $K_{\text{балб}}$ – балансовая стоимость применяемого бурового станка, руб.

$$K_{\text{балб}} = (1,12 \div 1,15)C_6, \quad (16)$$

где C_6 – цена применяемого бурового станка, руб.

В последующем выбранные технические решения доводятся до полного соответствия условиям конкретного горного предприятия при условии соблюдения рациональных режимов и правил промышленной безопасности.

О перспективе дальнейших исследований

К настоящему времени в области шарошечного бурения взрывных скважин выполнен значительный объем исследований. Большинство из них проведено в годы интенсивного развития открытых горных работ – в 60 – 70-е годы XX века. Для различных условий отдельных горных предприятий установлены взаимосвязи и критерии эффективности бурения, зависящие от основных факторов процесса. До сих пор не создано единой теории бурения скважин. Отсутствие надежных методик учета прочих факторов, закономерностей изменения их во времени часто приводит к ошибкам при планировании буровых работ, повышая риски невыполнения на горном предприятии производственной программы. Адаптация технологии бурения решается опытным путем, интуитивно. В результате такого подхода создаются предпосылки увеличения затрат и повышения рисков возникновения аварийных ситуаций при ведении горных работ.

Учитывая современное развитие цифровых технологий, для обоснования оптимальных способов и средств адаптации параметров буровых работ к имеющимся и перспективным горно-геологическим и горнотехническим условиям становится возможным выполнять предпроектную проверку буровой техники и инструмента, производить на горных предприятиях всесторонний учет факторов бурения, влияющих на действующую буровую технику, а также устанавливать закономерности изменения факторов во времени и в зависимости от свойств массива горных пород. Поэтому основное перспективное направление развития исследований по Государственному заданию в 2024 году и последующих периодах – это создание методик и программ для оценки эффективности и безопасности применения буровой техники в изменяющихся условиях горного предприятия на основе многокритериальной оценки планируемых технических решений для совершенствования технологии и техники буровых работ, прогноза эффективности и безопасности проектируемой буровой техники и инструмента в перспективных условиях разработки месторождения полезных ископаемых. Целесообразно продолжить исследования закономерностей изменения технического состояния буровых станков в различных условиях применения и создания цифровых моделей для прогнозирования уровня изменения показателей и параметров состояния буровой техники и рисков аварийных ситуаций с учетом многочисленных факторов в условиях открытой добычи месторождений твердых полезных ископаемых.

Выводы

1. В результате исследования систематизированы современные технические решения для адаптации параметров производства буровых работ на карьерах к сложившимся новым горно-геологическим и другим условиям ведения работ. Дальнейшее совершенствование процессов бурения взрывных скважин представляется в уточнении прочностных и структурных свойств массива горных пород и выработке на этой основе технических решений, позволяющих оптимизировать материальные затраты при производстве технологических взрывов. Эффективность и безопасность реализации изменений в буровых работах определяется техническими решениями, связанными с получением информации о состоянии горных пород в естественном залегании, изменением способа бурения, конструкции бурового станка и инструмента. Эти направления исследования имеют значительные резервы для развития буровых работ и заслуживают внимания в первую очередь.

2. Разработан методический подход к оценке и выбору эффективных технических решений в процессе совершенствования буровых работ, отличающийся поэтапным изучением факторов, управляющих процессами выбора адаптационных решений. Согласно установленной информации о влиянии значимых факторов, выявляются рациональные действия с последующей оценкой их экономической целесообразности применения с учетом возможностей горного предприятия. Дальнейшее развитие исследований необходимо вести по пути создания методик, обеспечивающих повышение уровня интерпретации информации, получаемой в процессе бурения взрывных скважин, для установления более точных регрессионных зависимостей технических показателей процесса бурения взрывных скважин от значимых горнотехнических и горно-геологических факторов. Это позволит точнее определять технические решения для совершенствования технологии и техники буровых работ.

Список литературы

1. Анистратов К.Ю., Донченко Т.В., Опанасенко П.И., Строгий И.Б., 2018. Анализ рынка буровых станков для открытых горных работ горнодобывающих предприятий России. *Горная промышленность*, № 2, С. 84 – 89. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2018-2-138-84-89>
2. Реготунов А.С., Кутуев В.А., Жариков С.Н., 2021. Систематизация факторов, предопределяющих переходные процессы в буровзрывных работах. *Проблемы недропользования*, №4, С. 62 – 72. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2021.04.062>
3. Реготунов А.С., Жариков С.Н., Сухов Р.И., Кутуев В.А., 2021. Оценка современного состояния буровзрывных работ и необходимость осуществления переходных процессов на некоторых крупных горных предприятиях Урала и Сибири. *Проблемы недропользования*, № 2, С. 52 – 62. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2021.02.052>
4. Яковлев В.Л., 2019. *Исследование переходных процессов – новое направление в развитии методологии комплексного освоения георесурсов*. Екатеринбург: УрО РАН, 284 с.
5. Сухов Р.И., Шахматов Д.С., Паньков И.В. и др., 1991. Об удельной энергоёмкости разрушения горных пород при бурении взрывных скважин. *Горный журнал*, № 3, С. 26 – 28.
6. Лубенец Ю.Ю., 2004. Опыт эксплуатации буровых долот на Костомукшском ГОКе. *Горный журнал*, № 5, С. 42 – 43.
7. Сухов Р.И., 1996. Результаты испытаний отечественных и зарубежных шарошечных долот, и перспективы создания высокостойкого бурового инструмента. *Международная конф. по открытым горным работам*, II (М., 19 -22.05.96): сб. докл. Москва, С. 196 – 197.
8. Сухов Р.И., 1995. Перспективы оснащения открытых горных работ буровыми станками большого диаметра. *Горный журнал*, № С. 25 – 27.
9. Бовин К.А., 2019. Анализ эксплуатации техники бурения взрывных скважин на карьерах Красноярского края и Хакасии. URL: http://www.gornoe-delo.ru/jgd/2018/2018_1.pdf (дата обращения 22.09.2023).
10. Шигин А.О., 2014. Повышение ресурса шарошечного бурового инструмента за счет оптимизации режимных параметров при бурении сложноструктурных массивов горных пород. *Вестник ИрГТУ*, №10 (93), С. 59 – 67.
11. Загривный Э.А., 1996. *Динамические модели и устойчивость подсистемы «исполнительный орган – забой» горной машины*: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный институт, 39 с.
12. Буткин В.Д., Гилев А.В. и др., 2010. *Выбор и рациональная эксплуатация буровых инструментов и станков на карьерах*. Красноярск: СФУ, 236 с.

13. Токаренко А.В., Гуленков Э.В., 2013. Оценка эффективности работы буровых станков на карьерах Олимпиадинского ГОКа. *Горный журнал*, № 3, С. 76 – 77.
14. Зенин В. В., 2007. Опыт эксплуатации буровых станков производства ОАО «Рудгормаш», *Уголь*, №10 (978), С. 50 – 54.
15. Лель Ю.И., 2011. Эффективность эксплуатации новых моделей буровых станков на карьерах Урала. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 6, С. 199 – 206.
16. Коваленко В.А., 2017. Автоматизированная подготовка производства на карьерах. Программно-технический комплекс «Blast Maker». *Добывающая промышленность*, № 3, С. 50 – 53.
17. Шигин А.О., Гилев А.В., Шигина А.А., 2017. Автоматизация шарошечного бурения взрывных скважин на карьерах. *Горный журнал*, № 2, С. 79 – 82.
18. Контеев О.Ю., Худяков А.Г., Болкисева Ю.В., Болкисев В.С., 2009. Безопасность эксплуатации шарошечных карьерных буровых станков с истекшим сроком службы. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 10, С. 165 – 169.
19. Реготунов А.С., Меньшиков П.В., Жариков С.Н., Кутуев В.А., 2022. Современные технические решения для адаптации параметров взрывного разрушения горных пород на карьерах. *Проблемы недропользования*, № 3, С. 114 – 127. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.03.114>
20. Сухов Р.И., Реготунов А.С., Гращенко Д.А., 2019. Развитие метода получения информации о состоянии массива горных пород в процессе бурения технологических скважин. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № S37, С. 446 – 454. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-11-37-446-454>
21. Анистратов К.Ю., Градусов М.С., Стремилев В.Я., Тетерин М.В., 2007. Экономико-математическая модель функционирования предприятия технологического карьерного транспорта. *Горная промышленность*, № 1, С. 20 – 26.
22. Хмызников К.П., Лыков Ю.В., 2000. *Механическое оборудование карьеров. Буровые станки*. Учеб. пособие. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУ, 63 с.
23. Крюков Г.М., 2004. *Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании. Часть II. Разрушение горных пород при бурении*. Москва: Изд-во МГГУ, 106 с.

References

1. Anistratov K.Yu., Donchenko T.V., Opanasenko P.I., Strogii I.B., 2018. Analiz rynka burovyykh stankov dlya otkrytykh gornykh rabot gornodobyvayushchikh predpriyatii Rossii [Market analysis of drilling rigs for open-pit mining operations of mining enterprises in Russia]. *Gornaya promyshlennost'*, № 2, P. 84 – 89. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2018-2-138-84-89>
2. Regotunov A.S., Kutuev V.A., Zharikov S.N., 2021. Sistematizatsiya faktorov, predopredelyayushchikh perekhodnye protsessy v burovzryvnykh rabotakh [Systematization of factors determining transients in drilling and blasting operations]. *Problemy nedropol'zovaniya*, №4, P. 62 – 72. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2021.04.062>
3. Regotunov A.S., Zharikov S.N., Sukhov R.I., Kutuev V.A., 2021. Otsenka sovremennogo sostoyaniya burovzryvnykh rabot i neobkhodimost' osushchestvleniya perekhodnykh protsessov na nekotorykh krupnykh gornykh predpriyatiyakh Urala i Sibiri [Assessment of the current state of drilling and blasting operations and the need for transition processes at some large mining enterprises of the Urals and Siberia]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 2, P. 52 – 62. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2021.02.052>
4. Yakovlev V.L., 2019. Issledovanie perekhodnykh protsessov – novoe napravlenie v razvitiy metodologii kompleksnogo osvoeniya georesurov [Study of transients as a new direction in the development of the methodology of integrated development of georesources]. Ekaterinburg: UrO RAN, 284 p.

5. Sukhov R.I., Shakhmatov D.S., Pan'kov I.V. i dr., 1991. Ob udel'noi energoemkosti razrusheniya gornyx porod pri burenii vzryvnykh skvazhin [On the specific energy intensity of rock destruction during drilling of blast wells]. Gornyi zhurnal, № 3, P. 26 – 28.
6. Lubenets Yu.Yu., 2004. Opyt ekspluatatsii burovnykh dolot na Kostomukshskom GOKe [Experience in the operation of drilling bits at the Kostomuksha GOK]. Gornyi zhurnal, № 5, P. 42 – 43.
7. Sukhov R.I., 1996. Rezul'taty ispytaniy otechestvennykh i zarubezhnykh sharoshechnykh dolot, i perspektivy sozdaniya vysokostoikogo burovogo instrumenta [Test results of domestic and foreign roller bits, and the prospects for creating a highly resistant drilling tool]. Mezhdunarodnaya konf. po otkrytym gornym rabotam, II (M., 19 -22.05.96): sb. dokl. Moscow, P. 196 – 197.
8. Sukhov R.I., 1995. Perspektivy osnashcheniya otkrytykh gornyx rabot burovymi stankami bol'shogo diametra [Prospects for equipping open-pit mining operations with large-diameter drilling rigs]. Gornyi zhurnal, № P. 25 – 27.
9. Bovin K.A., 2019. Analiz ekspluatatsii tekhniki bureniya vzryvnykh skvazhin na kar'erakh Krasnoyarskogo kraya i Khakasii [Analysis of the operation of explosive well drilling techniques in the quarries of the Krasnoyarsk Territory and Khakassia [Electronic resource]: an article in a scientific and technical electronic journal]. URL: http://www.gornoe-delo.ru/jgd/2018/2018_1.pdf (data obrashcheniya 22.09.2023).
10. Shigin A.O., 2014. Povyshenie resursa sharoshechnogo burovogo instrumenta za schet optimizatsii rezhimnykh parametrov pri burenii slozhnostrukturnykh massivov gornyx porod [Increasing the life of a spherical drilling tool by optimizing the operating parameters when drilling complex-structured rock massifs]. Vestnik IrGTU, №10 (93), P. 59 – 67.
11. Zagriynyi E.A., 1996. Dinamicheskie modeli i ustoichivost' podsistemy "ispolnitel'nyi organ – zaboii" gornoi mashiny: Avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk [Dynamic models and stability of the subsystem "executive body – face" of a mining machine: Abstract of the dissertation of the Doctor of Technical Sciences]. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskii gornyi institut, 39 p.
12. Butkin V.D., Gilev A.V. i dr., 2010. Vybory i ratsional'naya ekspluatatsiya burovnykh instrumentov i stankov na kar'erakh [Selection and rational operation of drilling tools and machines in quarries]. Krasnoyarsk: SFU, 236 p.
13. Tokarenko A.V., Gulenkov E.V., 2013. Otsenka effektivnosti raboty burovnykh stankov na kar'erakh Olimpiadinskogo GOKa [Evaluation of the efficiency of drilling rigs in the quarries of the Olympiadinsky GOK]. Gornyi zhurnal, № 3, P. 76 – 77.
14. Zenin V. V., 2007. Opyt ekspluatatsii burovnykh stankov proizvodstva OAO "Rudgormash" [Experience in the operation of drilling rigs manufactured by JSC «Rudgormash»], Ugol', №10 (978), P. 50 – 54.
15. Lel' Yu.I., 2011. Effektivnost' ekspluatatsii novykh modelei burovnykh stankov na kar'erakh Urala [Efficiency of operation of new models of drilling rigs in the quarries of the Urals]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 6, P. 199 – 206.
16. Kovalenko V.A., 2017. Avtomatizirovannaya podgotovka proizvodstva na kar'erakh. Programmno-tekhnicheskii kompleks "Blast Maker"[Automated production preparation at quarries. Software and hardware complex "Blast Maker"]. Dobyvayushchaya promyshlennost', № 3, S. 50 – 53.
17. Shigin A.O., Gilev A.V., Shigina A.A., 2017. Avtomatizatsiya sharoshechnogo bureniya vzryvnykh skvazhin na kar'erakh [Automation of ball drilling of blast wells in quarries]. Gornyi zhurnal, № 2, P. 79 – 82.
18. Konteev O.Yu., Khudyakov A.G., Bolkiseva Yu.V., Bolkisev V.S., 2009. Bezopasnost' ekspluatatsii sharoshechnykh kar'ernykh burovnykh stankov s istekshim srokom sluzhby [Safety of operation of long-life roller pit drilling rigs]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 10, P. 165 – 169.

19. Regotunov A.S., Men'shikov P.V., Zharikov S.N., Kutuev V.A., 2022. Sovremennye tekhnicheskie resheniya dlya adaptatsii parametrov vzryvnogo razrusheniya gornykh porod na kar'erakh [Modern technical solutions for adapting the parameters of explosive rock destruction in quarries]. Problemy nedropol'zovaniya, № 3, P. 114 – 127. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.03.114>

20. Sukhov R.I., Regotunov A.S., Grashchenko D.A., 2019. Razvitie metoda polucheniya informatsii o sostoyanii massiva gornykh porod v protsesse bureniya tekhnologicheskikh skvazhin [Development of a method for obtaining information about the state of a rock mass in the process of drilling technological wells]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № S37, P. 446 – 454. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-11-37-446-454>

21. Anistratov K.Yu., Gradusov M.S., Stremilov V.Ya., Teterin M.V., 2007. Ekonomiko-matematicheskaya model' funktsionirovaniya predpriyatiya tekhnologicheskogo kar'ernogo transporta [An economic and mathematical model of the functioning of a technological quarry transport enterprise]. Gornaya promyshlennost', № 1, P. 20 – 26.

22. Khmyznikov K.P., Lykov Yu.V., 2000. Mekhanicheskoe oborudovanie kar'erov. Burovye stanki [Mechanical equipment of quarries. Drilling rigs]. Ucheb. posobie. Sankt-Peterburg: Izd-vo SPBGU, 63 p.

23. Kryukov G.M., 2004. Fizika razrusheniya gornykh porod pri burenii i vzryvanii. Chast' II. Razrushenie gornykh porod pri burenii [Physics of rock destruction during drilling and blasting. Part II. Destruction of rocks during drilling]. Moscow: Izd-vo MGGU, 106 p.