

УДК 338.512:622.235

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ НА СТОИМОСТЬ ГОРНЫХ РАБОТ



М. А. МАРИНИН¹,
зав. кафедрой взрывного дела, канд. техн. наук



О. А. МАРИНИНА¹,
зав. кафедрой отраслевой экономики,
канд. экон. наук,
Marinina_OA@pers.spmi.ru



Р. А. РАХМАНОВ²,
научный сотрудник, канд. техн. наук

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

² Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН, Москва, Россия

Введение

Интенсификация открытой разработки рудных месторождений ставит перед исследователями задачи поиска оптимальных решений ведения горных работ [1–5]. Современные исследования [6–10] в области оптимизации операционных расходов свидетельствуют, что значительная экономия затрат на горнодобывающем предприятии может быть достигнута за счет рационализации применяемой технологии – буровзрывных работ (БВР), экскавации, транспортирования и отвалобразования в зависимости от гранулометрического состава взорванной горной массы (ВГМ). Гранулометрический состав ВГМ формируется заданными параметрами технологии бурения и взрывания [11–14], которые должны устанавливаться с учетом исходных физико-механических свойств разрабатываемых горных пород [15–17]. Оценка распределения гранулометрического состава ВГМ осуществляется фотопламетрическим способом [18–21]. Оптимально подобранная технология БВР обеспечивает эффективные условия эксплуатации всего комплекса [22–25]. Исследования ученых [26–29]

Разработан методический подход к оптимизации стоимости вскрышных работ в зависимости от гранулометрического состава взорванной горной массы. Предложена укрупненная методика оценки удельных затрат на вскрышные работы, обоснованы принципы факторной зависимости гранулометрического состава взорванной горной массы и стоимости проведения горных работ; выполнены апробация методики на основе экспериментальных данных, полученных в результате серии взрывов в условиях золоторудного карьера, и верификация полученных расчетных значений путем сопоставления удельных затрат методом укрупненного счета и прямых экономических расчетов; доказана валидность предложенного методического подхода на основе учета параметров удельной стоимости эксплуатации и производительности оборудования на вскрышных работах. Результаты исследования могут быть использованы в инженерных изысканиях при обосновании параметров проекта буровзрывных работ с учетом технологических особенностей горнотранспортного комплекса.

Ключевые слова: карьер, открытые горные работы, взорванная горная масса, гранулометрический состав, буровзрывные работы, экскавация, транспортирование, себестоимость, удельная стоимость эксплуатации оборудования, производительность

DOI: 10.17580/gzh.2023.09.04

доказывают, что качество дробления горных пород оказывает динамическое влияние на экономические показатели основных технологических процессов горнодобывающего производства. Например, уменьшение размера среднего куска ВГМ может достигаться за счет роста затрат на бурение и взрывание, при этом расходы на погрузку и транспортирование горной массы снижаются [30–32]. Учитывая зависимости изменения параметров ВГМ и удельных затрат вскрышных и добычных процессов, которые, в свою очередь, ограничены горно-геологическими, технологическими и организационными факторами, следует отметить, что вопросы оптимизации операционных расходов горных работ требуют учета индивидуальных особенностей отдельно взятого объекта и методического обоснования.

Большинство исследований в области оптимизации затрат БВР посвящены технической части. В том числе исследования [33–36] связаны с определением влияния организационно-технологических факторов на производительность горнотранспортного оборудования, применяемого на вскрышных и добычных работах. Методики определения стоимости горных работ сводятся, как правило, к оценке удельных показателей методом прямого счета, что предусматривает расчет

затрат с учетом меняющихся показателей производительности оборудования, трудоемкости, норм и цен материалов. Оценка стоимости методом прямого счета в случае анализа расходов относительно меняющихся параметров гранулометрического состава ВГМ или других горнотехнических показателей, оказывающих влияние на производительность оборудования, является достаточно точным методом, но трудоемким, так как требует подготовки значительного объема исходных данных и их обработки. В данном исследовании предложен альтернативный подход к оценке стоимости вскрышных работ укрупненным методом, базирующемся на учете параметров удельной стоимости эксплуатации и производительности оборудования. Апробация предложенного способа укрупненной оценки стоимости вскрышных работ в зависимости от меняющегося гранулометрического состава ВГМ выполнена на экспериментальных данных серии его измерений по мере отработки реальных блоков и хронометража работы экскаваторно-автомобильного комплекса для различных горно-геологических условий вскрышных участков золоторудного карьера. Валидность метода доказана путем сопоставления показателей удельных стоимостей вскрышных работ, полученных при укрупненном и прямом счете.

Методы исследований

Метод прямого счета – это метод оценки затрат на вскрышные работы, в основе которого лежит использование норм расхода материальных и трудовых ресурсов по каждому процессу (работе). Оценка затрат методом прямого счета основана на производстве норм расхода материальных и трудовых ресурсов, их стоимости и объема продукции (работ, услуг).

Метод укрупненной оценки используется, если необходимо определить влияние различных факторов на процессы (работы) производства; суть метода основана на выявлении технологических и экономических факторов, которые оказывают влияние на изменение результирующих показателей.

В настоящем исследовании методика укрупненной оценки затрат заключается в группировке затрат, зависящих и не зависящих от деятельности оборудования, по этапам вскрышных работ. Часть затрат, не зависящих от производительности техники, оценивали путем калькуляции с использованием норм, нормативов, лимитов и объемов производства, другую часть определяли, исходя из меняющихся значений производительности оборудования в зависимости от гранулометрического состава ВГМ и стоимости эксплуатации оборудования по процессным переделам с учетом определяющих технико-экономических факторов (рис. 1).

Калькуляционные статьи затрат по процессам БВР – экскавация – транспортирование соответствуют удельным денежным расходам (УДР), которые подлежат поштатейному учету, поскольку они наиболее чувствительны к качеству взрыва. Результаты анализа затрат по процессу горных работ свидетельствуют о том, что наибольшая доля расходов приходится



Рис. 1. Схематичная модель входных и выходных параметров исследуемого объекта – факторы, оказывающие влияние на изменение затрат горных работ по процессам



Рис. 2 Структурный анализ затрат по процессам (а) и статьям себестоимости (б) вскрышных работ



на транспортирование горной массы и составляет 64 %, далее на БВР – 25 % и на экскавацию – 11 % (рис. 2, а).

Распределение статей затрат по УДР для процессов БВР, экскавации и транспортирования приведено на рис. 2, б. Структурный анализ по статьям исключает значение амортизационных отчислений, ввиду разных подходов к расчетам амортизации и невозможности управления данным фактором, а именно: замены уже существующего оборудования в компании [37]. Оценка эффективности принятия решения по выбору того или иного оборудования должна проводиться на этапе его закупки. При этом отметим, что значительная часть расходов в структуре себестоимости приходится на амортизацию и для условий аналогичных золотодобывающих карьеров составляет: на этапе БВР 24–30 %, на этапе экскавации 34–40 %, на этапе транспортирования 20–25 % [10].

Методика определения удельных затрат укрупненным методом для целей оптимизации показателей гранулометрического состава ВГМ включает сумму удельных затрат на

Таблица 1. Методика оценки удельных затрат (укрупненный метод)

Этапы	Методика
БВР	<p>Затраты на заработную плату, руб.:</p> $Z_{з.п} = P_i \cdot Q_{\text{бур.}i}$ <p>где $Z_{з.п}$ – затраты на заработную плату за смену, руб.; P_i – сдельная расценка по i-му размеру ВГМ, руб/м; $Q_{\text{бур.}i}$ – объем бурения в смену, сутки, год по i-му размеру ВГМ, м.</p> <p>Материальные затраты</p> <p>Затраты на взрывчатые вещества (ВВ) и средства инициирования (СИ), руб.:</p> $Z_m = H_i \cdot C_i \cdot Q_{\text{г.м.}i}$ <p>где Z_m – затраты на материальные ресурсы, руб.; H_i – норма i-го ВВ и (или) СИ, кг/м³; C_i – цена за единицу i-го ВВ и (или) СИ, руб/кг.; $Q_{\text{г.м.}i}$ – объем горной массы в смену по i-му размеру ВГМ, м³ (т).</p> <p>Затраты на содержание и эксплуатацию бурового оборудования $Z_{б.о.}$, руб.:</p> $Z_{б.о.} = TCO_j \cdot Q_{\text{бур.}i}$ <p>TCO_j – удельные эксплуатационные затраты по j-му буровому станку, руб/маш.ч;</p> $Z_{б.о. \text{ полные}} = TCO_{\text{зам}} \cdot Q_{\text{бур.}i}$ <p>$TCO_{\text{зам}}$ – удельные эксплуатационные затраты по j-му оборудованию с учетом амортизационных отчислений, руб/м.</p> <p>Общие затраты на бурение i-го размера ВГМ (в смену, сутки, годовые объемы):</p> $Z_{\text{бур.}i} = Z_{з.п} + Z_m + Z_{б.о.}$ <p>Удельные затраты бурения планового объема горной массы, руб/м³ (т):</p> $УДР_{\text{бур.}i} = Z_{\text{бур.}i} / Q_{\text{г.м.}i}$ <p>$Z_{\text{бур.см}}$ – затраты на бурение (в смену, сутки, год), руб.; $Q_{\text{г.м.}i}$ – объем горной массы (в смену, сутки, годовые объемы) по i-му размеру ВГМ, м³ (т).</p>
Экскавация ВГМ	<p>Производительность (норма выработки) соответственно по i-му размеру ВГМ p-го погрузчика $Q_{\text{выр.}p,i}$, м³ (т):</p> $Q_{\text{выр.}p,i} = P_{\text{ср.}p,i} \cdot T_{\text{см}} \cdot K_{\text{КИО } p} \cdot K_{\text{КТП } p}$ <p>где $P_{\text{ср.}p,i}$ – средняя минутная производительность соответственно по i-му размеру ВГМ p-го погрузчика; $T_{\text{см}}$ – продолжительность смены, мин; $K_{\text{КИО } p}$ – коэффициент использования оборудования (КИО) p-го погрузчика, доли ед.; $K_{\text{КТП } p}$ – коэффициент технической готовности p-го погрузчика, доли ед.</p> <p>Число погрузчиков, необходимых для выполнения планового годового объема добычи $n_{\text{пл } ip}$:</p> $n_{\text{пл } ip} = Q_{\text{вск.план}} / Q_{\text{выр.}p,i}$ <p>$Q_{\text{вск.план}}$ – плановый годовой объем вскрышных пород, тыс. м³, т.</p> <p>Удельные затраты на погрузку вскрышных пород i-го размера ВГМ p-го погрузчика $УДР_{\text{эк.}ip}$, руб/м³ (т):</p> $УДР_{\text{эк.}ip} = (TCO_p \cdot n_{\text{пл } ip} \cdot T_{\text{см}}) / Q_{\text{выр.}p,i}$ <p>TCO_p – затраты на содержание и обслуживание p-го погрузчика, руб/машиночас.</p>
Транспортирование ВГМ	<p>Производительность (норма выработки) соответственно по i-му размеру ВГМ b-го автосамосвала (в массиве) $Q_{\text{выр.}b,i}$, м³ (т):</p> $Q_{\text{выр.}b,i} = (T_{\text{см}} \cdot K_{\text{КИО } b} / t_{\text{об}}) \cdot V_{\text{ВГМ } b,i}$ <p>где $T_{\text{см}}$ – продолжительность смены, мин; $K_{\text{КИО } b}$ – КИО b-го автосамосвала, доли ед.; $t_{\text{об}}$ – время одного цикла, мин.; $V_{\text{ВГМ } b,i}$ – объем горной массы в массиве по i-му размеру ВГМ b-го автосамосвала, м³ (т);</p> $V_{\text{ВГМ } i} = n_k \cdot E_p \cdot K_3$ <p>n_k – число ковшей, погружаемых в i-й автосамосвал, доли ед.; E_p – вместимость ковша p-го погрузчика, м³ (т); K_3 – коэффициент экскавации.</p> <p>УДР в смену, руб/т-км</p> <p>Удельные затраты на транспортирование вскрышных пород i-го размера ВГМ, руб/м³ (т):</p> $УДР_{\text{тр.}ib} = TCO_{\text{эт.тр.}b} \cdot Q_{\text{эт.}b} / Q_{\text{выр.}b,i}$ <p>$Q_{\text{эт.}b}$ – производительность (норма выработки) эталонного b-го автосамосвала, м³ (т); $TCO_{\text{эт.тр.}b}$ – удельные затраты на транспортирование вскрышных пород эталонного b-го автосамосвала, руб/м³ (т).</p>

бурение и взрывание ($УДР_{\text{бур.}i}$), экскавацию ($УДР_{\text{эк.}ip}$), и транспортирование ($УДР_{\text{тр.}ib}$) горной массы (табл. 1).

Методика определения TCO^* базируется на оценке стоимости машиночаса исходя из расходов на покупку оборудования и затрат на эксплуатацию оборудования в единицу времени. Для точности расчетов следует принять значения стоимости 1 машиночаса, наиболее близкого к расчетному году, который позволит учесть текущую конъюнктуру цен на расходные материалы, топливо и индексацию заработной платы.

Исходными данными для апробации предложенного методического подхода послужили экспериментальные данные, полученные на конкретном горно-обогатительном комбинате. Для оценки удельных затрат были использованы замеры granulometric composition ВГМ и производительности горнотранспортного оборудования для условий вскрышных блоков на основе выгрузки из системы диспетчеризации карьера и точечных фото- и видеофиксаций хронометража работы оборудования. Применены технико-экономические показатели

*Методика оценки издержек владения и эксплуатационных расходов Owning and Operating Costs (O&O); предназначена для оценки технико-экономических показателей машин Cat.

для анализа структуры затрат и определения эталонных значений расходов владения и эксплуатации оборудования. Калькуляционными единицами были приняты объемы ВГМ (м³), привязанные к плану горных работ, что позволило учесть цикличность выполнения работ в рамках смены, суток, месяца, года.

В работе рассматривали парк бурового оборудования, применяемый при ведении горных работ на различных участках карьера, что, в свою очередь, в значительной степени влияло на параметры БВР и их экономическую составляющую. Фактические технические характеристики парка бурового оборудования приведены ниже.

Тип бурового оборудования	Диаметр долота, мм
СБШ-250	246
PV-351	311
PV-235	246
DML	215

Экскаваторно-автомобильный комплекс для анализа принят наиболее производительный, а именно: электрический канатный экскаватор WK-35 типа «прямая лопата» с ковшом вместимостью 35 м³ и автосамосвал CAT 793D грузоподъемностью 220 т. Вспомогательное оборудование, задействованное на зачистке забоя и подъездах экскаватора, в расчете не учитывали, так как для всех вариантов оно было принято одинаковым.

Для условий объекта исследования ранее установлено, что гранулометрический состав ВГМ, а именно средневзвешенный кусок, является определяющим параметром, влияющим на производительность загрузки экскаватором WK-35 в автосамосвал CAT 793D. Под величиной средневзвешенного размера куска ВГМ понимается значение, соответствующее 63,2 % на кумулятивной кривой распределения гранулометрического состава [17].

Обсуждение результатов исследований

В результате проведенных исследований и апробации предложенного методического подхода установлено, что существует зависимость удельных затрат от значений средневзвешенного куска ВГМ, обусловленная изменением организационно-технологических факторов: производительности оборудования, материальных расходов и трудоемкости работ. На рис. 3 представлены УДР для различных значений размера куска ВГМ, определенные методами укрупненного и прямого экономического расчета. УДР приведены в условных единицах (у.е.), которые получены путем пересчета стоимостных показателей в проценты с сохранением пропорции к фактическим значениям.

На рис. 4 приведен результат расчета УДР прямым и укрупненным методами для горнотранспортного комплекса PV-351, WK-35, CAT 793D и его влияния на гранулометрический состав ВГМ. Как видно, оптимальным значением гранулометрического состава как для прямого, так и укрупненного способа расчета следует принимать диапазон 400–500 мм (зона оптимум отмечена зеленым контуром).

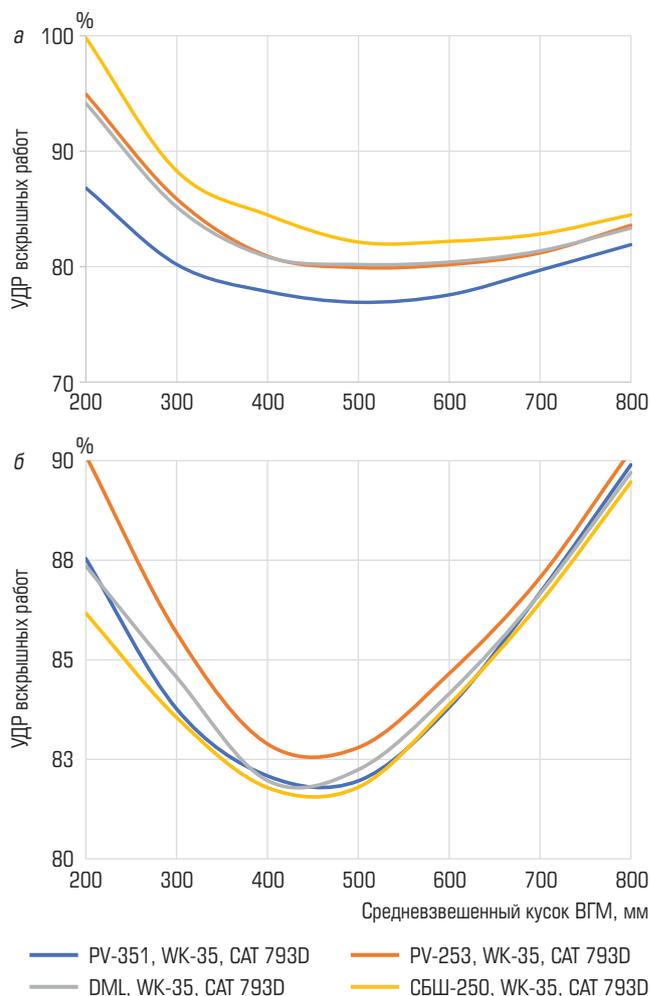


Рис. 3. Зависимости УДР от значений гранулометрического состава ВГМ, определенных методами укрупненного (а) и прямого счета (б).

УДР приведены в условных единицах, которые получены путем пересчета стоимостных показателей в проценты, с сохранением пропорции к фактическим значениям

Верификация полученных результатов удельных затрат и валидность предложенного метода доказаны путем сопоставления УДР, полученных методами укрупненного и прямого счета (рис. 5). Для верификации выбраны УДР БВР и экскавации разного гранулометрического состава ВГМ при условии применения базового оборудования PV-351, WK-35 и CAT 793D.

Данные рис. 5 свидетельствуют о высокой чувствительности УДР к изменению выхода средневзвешенного куска ВГМ, при этом в случае экскавации наблюдается прямая зависимость, а в случае БВР – обратная связь с высоким коэффициентом парной корреляции. Необходимо отметить, что в расчетах принималось условие 100%-ной обеспеченности экскаваторного парка автосамосвалами.

Аналогичным образом было проведено сравнение результатов диапазонов УДР в зависимости от меняющихся условий

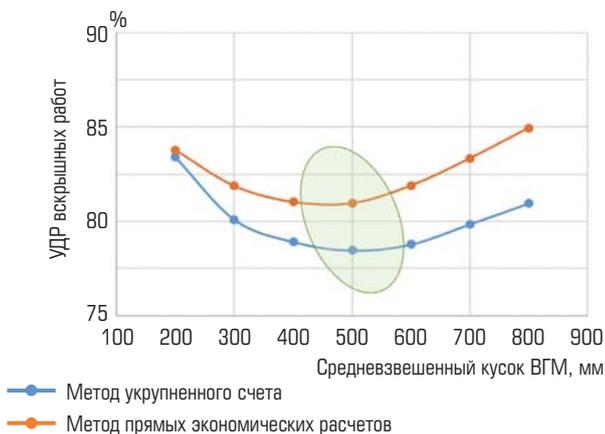


Рис. 4. Сравнение УДР прямым и укрупненным методом для горнотранспортного комплекса PV-351, WK-35, CAT 793D.

УДР приведены в условных единицах, которые получены путем пересчета стоимостных показателей в проценты, с сохранением пропорции к фактическим значениям

гранулометрического состава ВГМ, оборудования и метода оценки. Анализ значений УДР БВР с использованием машин PV-351 свидетельствует о снижении затрат в диапазоне изменения характерного размера ВГМ от 0,2 до 0,8 м. Снижение обусловлено изменением трудоемкости выполнения работ за счет уменьшения объемов бурения в зависимости от варьирования сетки скважин, норм расходов взрывчатых материалов и затрат на содержание и эксплуатацию бурового оборудования в части условно-переменных расходов (энергия, топливо, запасные части).

Анализ результатов расчетов УДР по статье «экскавация горной массы» также свидетельствует об изменении расходов в зависимости от характерного размера ВГМ от 0,2 до 0,8 м. При этом методика укрупненного счета для этапа экскавации предполагает оценку затрат только по фактору производительности оборудования и удельных расходов на обслуживание оборудования, т. е. рост затрат с увеличением размера куска ВГМ зависит от снижения производительности экскаватора. Снижение производительности экскаватора влияет на увеличение времени цикла транспортирования (диапазон «чистого» времени одной погрузки колеблется от 1:50 до 2:30 мин), что приводит к снижению производительности процесса транспортирования в рамках смены на 20 мин (в рамках суток на 40 мин). В условиях автоматизированного управления процессом подачи автосамосвалов на погрузку такое изменение времени цикла погрузки не является существенным.

Анализ результатов расчетов УДР по статье «транспортирование горной массы» свидетельствует о незначительном изменении расходов в зависимости от характерного размера ВГМ при плече откатки 6 км. Изменение формируется преимущественно за счет общего снижения тоннажа погрузки (на

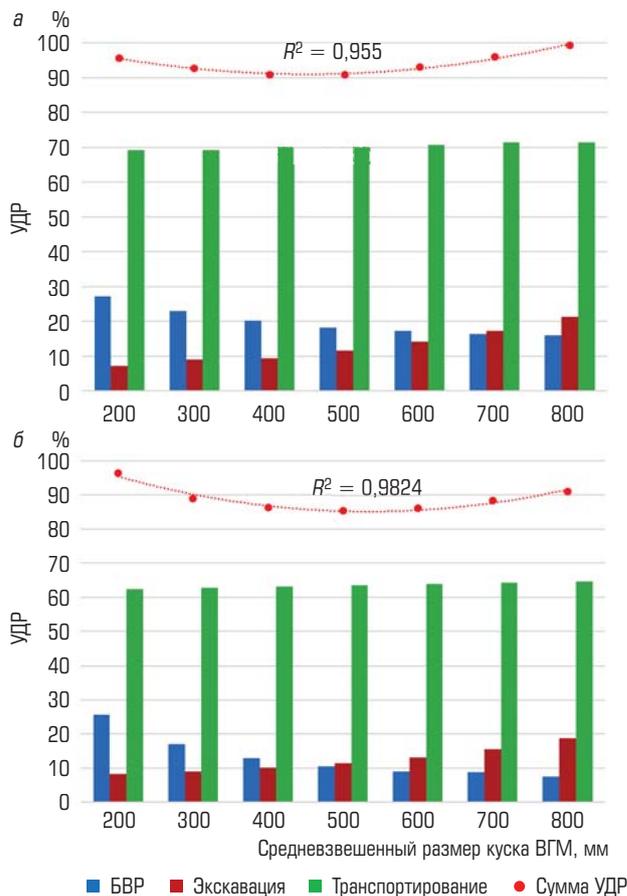


Рис. 5. УДР БВР и экскавации, полученных методами укрупненного (а) и прямого (б) расчета.

УДР приведены в условных единицах, которые получены путем пересчета стоимостных показателей в проценты, с сохранением пропорции к фактическим значениям

Таблица 2. Структура затрат по процессам для PV-351, WK-35, CAT 793D в зависимости от размера куска ВГМ

Процесс, затраты, %	Размер куска, мм						
	200	300	400	500	600	700	800
БВР	16,3	15,8	15,4	14,6	13,9	13,1	12,1
Экскавация	8,1	9,4	9,4	10,7	11,8	13,1	15,4
Транспортирование	75,7	74,9	75,2	74,7	74,3	73,8	72,4
УДР вскрышных работ	100	100	100	100	100	100	100

несколько тонн) при увеличении размера фракции ВГМ. Изменение УДР транспортирования горной массы относительно гранулометрического состава является незначительным, однако структура затрат по процессам в зависимости от кондиционного куска свидетельствует, что наибольший удельный вес приходится на транспортные расходы (табл. 2). В связи с этим возникает необходимость дальнейшей оценки чувствительности затрат по фактору изменения плеча транспортирования.

Следует отметить, что в рамках данного исследования не оценивали коэффициент наполнения кузова автосамосвала с учетом его паспортной загрузки, в связи с чем вопрос наполнения кузова автосамосвала в зависимости от гранулометрического состава ВГМ требует дополнительного исследования.

Заключение

Гранулометрический состав взорванной горной массы оказывает значительное влияние на продолжительность основных и подготовительно-заключительных операций экскавации и транспортирования и, соответственно, стоимость горных работ.

Результаты общего структурного анализа себестоимости вскрышных работ свидетельствуют о том, что наибольшая доля УДР приходится на этап транспортирования горной массы и составляет 64 %, далее на БВР – 25 % и экскавацию – 11 %. Значительная часть расходов в структуре себестоимости по всем этапам приходится на амортизацию, которая составляет на этапах БВР 24,9 %, экскавации – 34 % и транспортирования – 20 %.

В исследовании установлено, что наибольшее влияние на изменение значений УДР в зависимости от изменения размера средневзвешенного куска ВГМ относится к УДР БВР. Изменение значений УДР транспортирования в зависимости от изменения средневзвешенного куска ВГМ незначительное. Прогнозная модель УДР экскавации отражает прямую связь между величиной удельных затрат и значением средневзвешенного куска ВГМ при экскавации.

Результаты расчета УДР вскрышных работ укрупненным методом свидетельствуют о том, что минимальные УДР обеспечиваются комплексом горнотранспортного оборудования PV-351, WK-35 и CAT 793D при выходе средневзвешенного куска ВГМ в 500 мм. Согласно расчету УДР вскрышных работ методом прямого счета, минимальные УДР обеспечиваются комплексом PV-351, WK-35 и CAT 793D при выходе средневзвешенного куска ВГМ в 400 мм.

Предложенная методика укрупненной оценки основана на – применении технологии оценки факторного влияния на результирующий показатель удельных расходов;

– использовании в расчетах значения объема вскрышных работ, определяемого планом горных работ как целевого критерия;

– использовании издержек владения и эксплуатационных расходов как эталонных значений при обосновании затрат на обслуживание оборудования.

Методический подход к оценке затрат заключается в группировке затрат, зависящих и не зависящих от производительности оборудования на этапах горных работ. Часть затрат, не зависящих от производительности техники, оценивается методом калькуляции с использованием норм, нормативов, лимитов и объемов производства, другая часть определяется исходя из меняющихся значений производительности оборудования в зависимости от гранулометрического состава ВГМ и стоимости эксплуатации оборудования.

Валидность разработанной методики укрупненного счета УДР в зависимости от гранулометрического состава ВГМ доказана на основе альтернативного метода прямых экономических расчетов с использованием реальных экспериментальных данных из системы диспетчеризации карьера и точечных фото- и видеофиксаций хронометража работы оборудования рудного карьера, что свидетельствует о возможности использования предложенного подхода в практической деятельности.

Результаты исследования могут быть использованы при обосновании технологических параметров на этапе предварительной проектной оценки отработки месторождения или на стадии планирования модернизации и замены оборудования. Определение оптимальных параметров гранулометрического состава ВГМ, в значительной степени оказывающего влияние на производительность технологических процессов, позволяет снизить стоимость горных работ и может стать основным элементом в разработке технических решений по повышению эффективности деятельности горных компаний.

Библиографический список

См. англ. блок. 

GORNYI ZHURNAL», 2023, № 9, pp. 28–34
DOI: 10.17580/gzh.2023.09.04

Methodological approach to assessing influence of blasted rock fragmentation on mining costs

Information about authors

M. A. Marinin¹, Head of Department for Blasting, Candidate of Engineering Sciences

O. A. Marinina¹, Head of Department of Economics, Candidate of Economic Sciences, Marinina_OA@pers.spmi.ru

R. A. Rakhmanov², Researcher, Candidate of Engineering Sciences

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

²Academician Melnikov Research Institute for Comprehensive Exploitation of Mineral Resources—IPKON, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract

Rational management of drilling and blasting technology, and a reasonable choice of blasted rock fragmentation quality can reduce mining costs and increase efficiency of both mining and processing. The purpose of this study is to develop a methodical approach to optimizing the cost of overburden stripping depending on fragmentation of blasted rock mass. The paper proposes a methodology for estimation of unit costs of stripping and substantiates the principles of factor dependence of blasted rock fragmentation and mining costs. The methodology is tested on the basis of experimental data obtained from a series of blasts in a gold mine and verified by comparing the unit costs by aggregate account and direct economic calculations. The validity of the proposed methodological approach is proved by the enumeration of operating cost per productivity of equipment in stripping. The results of the research can be used in the prefeasibility study of mineral mining, or at the stage of reequipment planning. Optimization of fragmentation quality of blasted rock mass, which greatly influences efficiency of production processes, enables reducing cost

of mining operations, and may become a key element in engineering decision-making on enhancement of performance of mining companies.

Keywords: quarry, open pit mining, blasted rock mass, fragmentation, drilling and blasting, excavation, haulage, cost, unit cost of equipment operation, productivity.

References

- Fomin S. I., Ivanov V. V., Semenov A. S., Ovsyannikov M. P. Incremental open-pit mining of steeply dipping ore deposits. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020. Vol. 15, No. 11. pp. 1306–1311.
- Litvinenko V. S., Petrov E. I., Vasilevskaya D. V., Yakovenko A. V., Naumov I. A et al. Assessment of the role of the state in the management of mineral resources. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 259. pp. 95–111.
- Kuznetsov D. V., Kosolapov A. I. Research of the influence of the excavating and automotive equipment complexes parameters on the speed of faces advance. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 626. 012020. DOI: 10.1088/1755-1315/626/1/012020
- Matrokhina K. V., Trofimets V. Ya., Mazakov E. B., Makhovikov A. B., Khaykin M. M. Development of methodology for scenario analysis of investment projects of enterprises of the mineral resource complex. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 259. pp. 112–124.
- Yakovlev V. L., Glebov A. V., Bersenyov V. A., Kulniyaz S. S., Ligotskiy D. N. Influence of an installation angle of the conveyor lift on the volumes of mining and preparing work at quarries at the cyclic-flow technology of ore mining. *News of the Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences*. 2020. No. 4(442). pp. 127–137.
- McKee D. J. Understanding mine to mill. Brisbane : The Cooperative Research Centre for Optimising Resource Extraction, 2013. 96 p.
- Cameron P., Drinkwater D., Pease J. The ABC of mine to mill and metal price cycles. *Proceedings of the 13th AusIMM Mill Operators' Conference*. Melbourne : The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2016. pp. 349–358.
- Ozdemir B., Kumral M. A system-wide approach to minimize the operational cost of bench production in open-cast mining operations. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2019. Vol. 6, Iss. 1. pp. 84–94.
- Kuznetsov D. V., Odaev D. G., Linkov Ya. E. Peculiarities of technological motor transport selection used for deep North open pits operation. *GIAB*. 2017. No. 5. pp. 54–65.
- Varannai B., Johansson D., Schunnesson H. Crusher to Mill Transportation Time Calculation—The Aitik Case. *Minerals*. 2022. Vol. 12, Iss. 2. 147. DOI: 10.3390/min12020147
- Isheiskiy V. A., Martynushkin E. A., Vasiliev A. S., Smirnov S. A. Data collection features of during the blast wells drilling for the formation of geostructural block models. *Ustoychivoe razvitiye gornyykh territoriy*. 2021. Vol. 13, No. 4(50). pp. 608–619.
- Moldovan D. V., Chernobay V. I., Sokolov S. T., Bazhenova A. V. Design concepts for explosion products locking in chamber. *GIAB*. 2022. No. 6-2. pp. 5–17.
- Dolzhikov V. V., Ryadinsky D. E., Yakovlev A. A. Influence of deceleration intervals on the amplitudes of stress waves during the explosion of a system of borehole charges. *GIAB*. 2022. No. 6-2. pp. 18–32.
- Alenichev I. A., Rakhmanov R. A. Empirical regularities investigation of rock mass discharge by explosion on the free surface of a pit bench. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 249. pp. 334–341.
- Rakishhev B. R., Orynbay A. A., Auezova A. M., Kuttybaev A. E. Grain size composition of broken rocks under different conditions of blasting. *GIAB*. 2019. No. 8. pp. 83–94.
- Afanasev P., Pasyukov A., Kurta I. Optimal parameters for drilling explosions when developing coal deposits by open-pit method. *Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering : International Scientific Conference*. 2019. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 164. 01012. DOI: 10.1051/e3sconf/202016401012
- Afanasev P. I., Menzhulin M. G. Change in the average lump size in the crushing zone based on the calculation of energy dissipation. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2022. No. 4. pp. 408–419.
- Koteleva N., Khokhlov S., Frenkel I. Digitalization in open-pit mining: A new approach in monitoring and control of rock fragmentation. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, Iss. 22. 10848. DOI: 10.3390/app112210848
- Rakishhev B. R., Orynbay A. A., Musakhan A. B. Granulometric composition of rock mass and blasted rock mass at different particle size scales of natural rocks and pieces of rock. *Vzryvnoe delo*. 2021. No. 132-89. pp. 7–26.
- Zharikov I. F., Seinov N. P. About the preparation sveby smyfor mass for schema cycle-potry technology. *Vzryvnoe delo*. 2020. No. 126-83. pp. 16–27.
- 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.
- Opanasenko P. I., Isaichenkov A. B. Optimization of semi-hard overburden fragmentation by blasting in Tugnuisky open pit mine. *Gornyi Zhurnal*. 2015. No. 9. pp. 54–57.
- Fomin S. I., Ovsyannikov M. P. Substantiation of the optimal performance parameters for a quarry during the stage-wise development of steeply dipping ore deposits. *Journal of Mining Institute*. 2022. DOI: 10.31897/PMI.2022.73
- Kurganov V. M., Gryaznov M. V., Kolobanov S. V. Assessment of operational reliability of quarry excavator-dump truck complexes. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 241. pp. 10–21.
- Ivanov S. L., Ivanova P. V., Kuvshinkin S. Yu. Promising model range career excavators operating time assessment in real operating conditions. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 242. pp. 228–233.
- Khokhlov S. V., Vinogradov Yu. I., Noskov A. P., Bazhenova A. V. Predicting displacements of ore body boundaries in generation of blasted rock pile. *GIAB*. 2023. No. 3. pp. 40–56.
- Dey S., Mandal S. K., Bhar C. Application of MR and ANN in the prediction of the shovel cycle time, thereby improving the performance of the shovel-dumper operation – A case study. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2022. Vol. 122, No. 10. pp. 597–606.
- Brunton I., Thornton D., Hodson R., Sprott D. Impact of Blast Fragmentation on Hydraulic Excavator Dig Time. *Proceedings of the 5th Large Open Pit Mining Conference*. Kalgoorlie, 2002. pp. 39–48.
- Beyglou A., Johansson D., Schunnesson H. Target fragmentation for efficient loading and crushing – the Aitik case. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2017. Vol. 117, No. 11. pp. 1053–1062.
- Ponomarenko T., Nevskaya M., Jonek-Kowalska I. Mineral resource depletion assessment: Alternatives, problems, results. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, Iss. 2. 862. DOI: 10.3390/su13020862
- Tsvetkova A., Katysheva E. Present problems of mineral and raw materials resources replenishment in Russia. *Proceedings of the 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference*. Albena, 2019. Vol. 19, Iss. 5.3. pp. 573–578.
- Makharatkin P. N., Abdulaev E. K., Vishnyakov G. Yu., Botyan E. Yu., Pushkarev A. E. Increase of efficiency of dump trucks functioning on the basis of justification of their rational speed by means of simulation modeling. *GIAB*. 2022. No. 6-2. pp. 237–250. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_237
- Nikkhah A., Vakyabad A. B., Hassanzadeh A., Niedoba T., Surowiak A. An evaluation on the impact of ore fragmented by blasting on mining performance. *Minerals*. 2022. Vol. 12, Iss. 2. 258. DOI: 10.3390/min12020258
- Bo Ke, Ruohan Pan, Jian Zhang, Wei Wang, Yong Hu et al. Parameter optimization and fragmentation prediction of fan-shaped deep hole blasting in Sanxin Gold and Copper Mine. *Minerals*. 2022. Vol. 12, Iss. 7. 788. DOI: 10.3390/min12070788
- Navarro T. V. F., Curi A., Lopes P. F. T. Minimização efetiva de custos de produção em mina à céu aberto. *Ouro Preto*, 2017. 94 p.
- Isyachenkov A. B. Algorithm of minimization of expenses at use of the Bucyrus 495HD excavator on Tugnuisky coal mine. *GIAB*. 2014. No. 9. pp. 251–253.
- Ilyushin Yu. V., Kapostey E. I. Developing a comprehensive mathematical model for aluminium production in a Soderberg Electrolyser. *Energies*. 2023. Vol. 16, Iss. 17. 6313. DOI: 10.3390/en16176313