

## ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА БОРТОВОГО СОДЕРЖАНИЯ ПОЛЕЗНЫХ КОМПОНЕНТОВ В РУДЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КАРЬЕРОВ

С.И. Фомин<sup>1</sup>, А.С. Говоров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,  
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: s215078@stud.spmi.ru

**Аннотация:** Бортовое содержание полезного компонента в руде, добываемой в карьере, устанавливается в результате рассмотрения вариантов реализации проектных решений, с учетом горно-геологических, горнотехнических и экономических факторов. При открытом способе отработки рудных месторождений минимальное промышленное содержание полезного компонента и бортовое содержание целесообразно определять с учетом коэффициента вскрыши подсчетного рудного блока. Оптимальное значение бортового содержания является функцией чистого дисконтированного дохода от реализации проекта открытой разработки месторождения и подлежит периодическому пересмотру при корректировке проектной документации и планов развития открытых горных работ, при геологической эксплуатационной доразведке месторождения, при обновлении и дополнении блочной модели рудного месторождения, при изменении технологии извлечения и обогащения полезного ископаемого. На основе проведенных исследований доказано, что при системном анализе параметров и показателей карьера, бортовое содержание полезных компонентов может быть принято только при условии, что в ходе расчетов будет учитываться такой показатель открытых горных работ, как коэффициент вскрыши. Уменьшение бортового содержания в руде позволяет повысить величину чистого дисконтированного дохода, но при этом сократить общие доходы от реализации продукции без учета дисконтирования.

**Ключевые слова:** месторождение, руда, открытая разработка, проектирование, бортовое содержание полезного компонента, чистый дисконтированный доход, границы карьера, экономическая оценка.

**Для цитирования:** Фомин С. И., Говоров А. С. Обоснование выбора бортового содержания полезных компонентов в руде при проектировании карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 12. – С. 169–182. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_12\_0\_169.

### Validation of the chosen cutoff grade value in open pit mine design

S.I. Fomin<sup>1</sup>, A.S. Govorov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia,  
e-mail: s215078@stud.spmi.ru

---

**Abstract:** A cutoff grade in open pit mining is set based from the analysis of alternative design solutions with regard to geological, geotechnical and economic factors. In open pit mining, the minimum economically rational content of a useful component, or a cutoff grade is expedient to be found with allowance for a stripping ratio in an estimation ore block. The optimized cutoff grade is a function of the net present value of the open pit mine project implementation, and is to be periodically revised during adjustment of project documentation and open pit mining plans, in operational geological re-exploration, in amendment and updating of the block model of ore deposits, and upon modification of mineral mining and processing technologies. The implemented research proves that in the system analysis of parameters and performance of an open pit mine, the cutoff grade can only be adopted given the stripping ratio is taken into account. A lower cutoff grade allows higher NPV but reduced general income received from the product sales unadjusted for discounting.

**Key words:** mineral deposit, ore, open pit mining, design, cutoff grade, net present value, open pit limits, economic evaluation.

**For citation:** Fomin S. I., Govorov A. S. Validation of the chosen cutoff grade value in open pit mine design. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(12):169-182. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_12\_0\_169.

---

## Введение

Одним из ключевых вопросов, который необходимо решать при проектировании карьеров является разработка рациональной стратегии управления бортовым содержанием полезных компонентов в добываемой руде. Бортовое содержание — это такое содержание полезного компонента, которое применяется для разделения двух стратегий использования конкретного сорта руды [1].

Определение оптимального бортового содержания является важной задачей при проектировании формирования рабочей зоны карьера. Для оконтуривания рудных тел и планирования их отработки, следует обосновать бортовое содержание полезного компонента в добываемой руде [2 – 5]. При повышении цен на рынке минерального сырья целесообразно увеличение затрат на вскрышные работы, повышение текущего коэффициента вскрыши, создание резерва фронта добычных работ, обеспечивающее продолжительность рентабельной отработки месторождения. Снижение бортово-

го содержания в периоды восходящих ценовых трендов на рынке минерального сырья дает возможность увеличить срок разработки месторождения и обеспечить создание запаса минерального сырья для поддержания нормы доходности в периоды снижения цен [6].

Принятие решения при проектировании карьера по значению бортового содержания следует осуществлять с учетом коэффициента вскрыши, производственной мощности горнодобывающего предприятия, производительности перерабатывающего производства, эксплуатационных затрат, цены конечной продукции предприятия на рынке минерального сырья.

Определение границ карьеров на конец отработки месторождения имеет большое значение, так как они определяют объем промышленных запасов руды и вскрышных пород в контурах карьера. Конечные контуры карьера используются для расчетов производительности и срока службы карьеров, контуры отработки месторождения влияют на вы-

бор способа вскрытия, места заложения вскрывающих и подготовительных выработок, расположения всех наземных коммуникаций.

Проектные контуры карьера можно разделить на следующие категории:

- конечные;
- перспективные;
- промежуточные [7 – 10].

Конечные контуры — это проектные контуры карьера на конец отработки, на которые должны выйти горные работы в конце отработки месторождения. Такой вид границ следует устанавливать с высокой степенью точности.

Перспективные контуры — это такие границы карьера, до которых экономически целесообразна и технически возможна открытая разработка месторождения. Такие границы карьера определяются с меньшей степенью точности и претерпевают корректировки в течение развития горных работ.

Промежуточные контуры — границы, которые достигаются на определенном этапе разработки месторождения карьером.

В процессе реализации проекта контуры неоднократно пересматриваются с учетом изменения во времени параметров рабочей зоны карьера и многих горнотехнических, горно-геологических факторов и ситуации на рынках минерального сырья. Достоверность проектных решений зависит от фактора времени. В случае, если срок этапа разработки месторождения составляет 12 – 15 лет, то контуры карьера определяются как перспективные или промежуточные.

### **Методы исследования**

Целесообразно при управлении формированием границ рудного карьера принимать бортовое содержание как граничное в рудопотоке, использующееся для определения места размещения добытого объема руды. Поэтому на горном

предприятии возможно принятие нескольких видов бортовых содержаний, каждый связан с конкретным потоком руды или способом определения запасов в недрах [11 – 13].

Для отработанного рудного блока должно выполняться правило: извлекаемая ценность этого блока должна компенсировать затраты на добычу, переработку и маркетинг. Содержание полезного компонента, компенсирующее затраты (кроме вскрыши) — это безубыточное граничное содержание полезных компонентов.

Внутренний борт используется для блоков, где содержание полезного компонента в руде будет меньше безубыточного. Эти блоки не могли бы быть отработаны из-за их небольшой ценности при извлечении. Соответственно, они извлекаются как вскрышные породы для того, чтобы обеспечить доступ к нижележащим блокам полезных ископаемых. Компенсация эксплуатационных затрат на добычу этих блоков происходит за счет извлекаемой ценности блоков, добываемых с нижележащих горизонтов. Экономическая оценка результатов добычи подобных блоков не должна учитывать эксплуатационные затраты на отработку, а значит бортовое содержание полезных компонентов будет ниже, чем первоначальное основное.

При определении величин бортового содержания следует учитывать фактор времени отработки месторождения. Оптимальная стратегия изменения во времени бортового содержания полезных компонентов определяется при проектировании и планировании развития горных работ.

Использование блочной модели месторождения в современных программных продуктах для проектирования карьеров позволяет выбрать оптимальный вариант последовательности отработки запасов руды.

Оценка вариантов развития рабочей зоны карьера должна базироваться на предварительных проектных решениях по выбору технологии производства открытых горных работ, параметрах и показателях принятой системы разработки, типоразмеров выемочно-погрузочного и транспортного парка, способа переработки и обогащения руды; служит для прогнозирования наиболее вероятного диапазона эксплуатационных затрат на проведение горных работ и обогащения руды [14–16].

При выборе стратегии развития рабочей зоны карьера целесообразно принимать в качестве исходных данных либо высокие эксплуатационные затраты, либо меньшие цены на конечную продукцию горнодобывающего предприятия в первоначальный период, а затем уменьшать эти затраты или увеличивать цены.

В конечном итоге на начальный период открытой разработки месторождения может быть принято высокое бортовое содержание в руде и высокая извлекаемая ценность. На дальнейших этапах отработки можно принимать более низкое бортовое содержание и извлекаемую ценность блоков руды.

Оптимальное бортовое содержание в руде не должно на определенном этапе отработки месторождения быть больше значения бортового содержания для последующих этапов. В противном случае ранее оцененные блоки руды с низким содержанием могут определяться как вскрышные породы с отрицательными рекомендациями по извлечению их из недр.

Для обоснования целесообразности удаления горной породы с низким содержанием полезного компонента, для обеспечения доступа к ниже залегающим блокам руды следует принимать меньшее значение бортового содержания, являющееся внутренним бортом, определяемым без учета эксплуатационных затрат на добычу.

Значение бортового содержания определяет объем запасов руды в контурах карьера и среднее содержание полезного компонента, является важным фактором, который следует обосновывать при планировании развития горных работ и проектировании карьеров [17–19].

При планировании развития рабочей зоны карьеров следует предусматривать резерв производительности по вскрыше на случай:

- уменьшения производительности карьера по руде из-за изменения горно-геологических условий и данных по запасам;
- падения цен на сырьевых рынках;
- уменьшения спроса на продукцию горнодобывающей компании;
- временного снижения бортового содержания полезных компонентов в руде для поддержания требуемого объема производства концентрата.

### **Результаты и обсуждение**

Одной из целей проектирования карьера является оптимизация бортового содержания по критерию максимум чистого дисконтированного дохода от реализации проекта отработки месторождения. Однако решение выбора бортового содержания должно иметь системный характер, учитывать ряд технико-экономических взаимно влияющих факторов (технические, экономические, экологические, социальные и другие).

Соотношение между бортовым содержанием, производительностью горнодобывающего предприятия и перерабатывающего комплекса, а также затратами на добычу и переработку, рыночной стоимостью реализованной продукции и притоком денежных средств обуславливается изменением бортового содержания, следовательно, перед принятием проектных решений это соотношение следует проанализировать с учетом стохастического характера исходных данных.

Уменьшение бортового содержания может повысить чистый дисконтированный доход (ЧДД) от реализации проекта, но при этом уменьшить общие доходы от продаж без учета дисконтирования. Увеличение бортового содержания влечет за собой размещение на складе низкосортного сырья, переработка которого была рентабельна. Поэтому целесообразно рассмотреть вариант складирования запасов минерального сырья с более низким содержанием полезного компонента в руде для переработки впоследствии.

Удельная прибыль от переработки руды зависит от бортового содержания.

В случае, если при проектировании принято не оптимальное бортовое содержание, изменение запасов руды в контурах карьера может снизить удельную прибыль от переработки добываемой руды или увеличить убытки, которых можно было бы избежать.

Удельная прибыль от переработки руды с содержанием ценного компонента  $\alpha$ :

$$P_y = \alpha_{cp} \cdot K_{и} \cdot (Ц - Z_{TM}) - (Z_d - Z_p - Z_k), \text{ руб./т};$$

$\alpha_{cp}$  – среднее содержание полезного компонента в руде, %;  $K_{и}$  – коэффициент извлечения металла из руды, %;  $Ц$  – рыночная цена конечного продукта, руб./т;  $Z_{TM}$  – удельные затраты на транспортирование и маркетинг, руб./т;  $Z_d$  – удельные затраты на добычу руды, руб./т;  $Z_p$  – удельные затраты на переработку руды, руб./т;  $Z_k$  – удельные косвенные и административные затраты, руб./т.

При последовательном решении проектных задач происходит приближение к рациональному результату в создании горнотехнической системы-карьер, с обоснованными оптимальными параметрами и показателями. Анализ результатов реализации проектов открытой разработки месторождений показывает, что надежность работы горнотехнической системы при этом значительно повышается, оце-

ниваемое количеством отказов системы, возникающих в процессе горно-капитальных и горно-строительных работ.

При проектировании карьеров и планировании горных работ определяется величина бортового содержания полезного компонента в руде, которая определяет параметры карьера, производственную мощность горно-перерабатывающего комплекса, величину чистого дисконтированного дохода (ЧДД) от реализации проекта. При завершении каждого этапа отработки месторождения, определения притока средств, бортовое содержание подлежит пересмотру в проектной документации. Бортовое содержание пересматривается также при корректировке планов развития горных работ, изменении геологических исходных стохастических данных в процессе эксплуатационной разведки, при обновлении модели месторождения, при изменении технологии добычи и переработки, системы разработки и способа вскрытия месторождения.

Исходные проектные данные, технико-экономические показатели являются стохастическими, и существует вероятность их неподтверждения в результате реализации проекта.

Принимаемые проектные решения должны обеспечивать необходимую норму рентабельности горнодобывающего предприятия в течение всего времени отработки месторождения, и поэтому следует обеспечить определенную устойчивость к изменениям внешних условий. Проектирование основывается на различных прогнозных и экспертных оценках перспектив развития ситуации на рынке минерального сырья, изменениях факторов, связанных с отработкой месторождения. Такие прогнозы и экспертные оценки могут иметь значительные погрешности, вероятность ошибок, а также неточность, так как они опираются на стохастические базы исходных

данных, недостаточный объем геологической и технико-экономической информации, информации о перспективах спроса на добываемые в карьере полезные ископаемые.

На надежность принимаемых решений при реализации проектов горнодобывающих предприятий влияют ряд факторов:

1. Горно-геологические исходные данные несут стохастический характер. Уменьшение неопределенности, вызванной этими данными, достигается при проведении детальной эксплуатационной разведки. Однако это вызывает увеличение затрат на геологоразведочные работы.

2. Ошибки в прогнозировании динамики рынков минерального сырья и финансовых рынков, политической ситуации.

3. Недостаточно высокий уровень квалификации экспертов осуществляющих проведение экспертиз проектной документации.

4. Отсутствие анализа чувствительности проектных показателей на изменение внешних условий.

Из вариантов принимаемых проектных решений предпочтительными являются те, которые оперативно адаптируются к динамике рынков минерального сырья.

«Более предпочтительными могут оказаться проекты и их варианты даже с более высокими прямыми издержками, но с меньшими адаптационными затратами, т.е. решения с большими возможностями гибкой подстройки к изменяющимся внешним условиям» [20].

Надежность реализации принимаемых проектных решений резко снижается с увеличением периода прогнозирования на срок более чем 15 лет.

Оценку чувствительности проектных показателей к изменениям исходных данных, принятых в базах исходных дан-

ных, следует проводить с использованием вариантов сценариев реализации проекта карьера в различных условиях, предполагая изменение технологических условий, количественных, качественных и геометрических параметров рудных залежей, цен на рынке минерального сырья, затрат и т.д. Необходимо установить границу области эффективной реализации проекта и разработать организационно-технические рекомендации по вариантам сценариев реализации проекта карьера в различных условиях.

Карьер как горнотехническая система является консервативным — принимаемые решения по параметрам и показателям системы разработки могут реализовываться часто со значительной задержкой во времени. Для увеличения границ карьера при изменении проектного бортового содержания полезного компонента в руде необходимо обеспечить формирования рабочей зоны с учетом закономерностей ее развития.

Блочная или каркасная модель месторождения, разработанная на основе данных геологической разведки, фактические геологические, геотехнические свойства и технико-экономические показатели существенно отличаются от принятых на начальной стадии проектирования и требуют периодической корректировки во времени реализации проекта.

Бортовые содержания должны регулярно пересматриваться в соответствии с динамикой рынков минерального сырья, волатильностью цен, эксплуатационных и капитальных затрат.

При увеличении бортового содержания можно достичь определенного улучшения финансово-экономических показателей отработки месторождения. При этом увеличение бортового содержания сократит период окупаемости капитальных вложений и величину проектного риска (вероятность получения ЧДД < 0), см. рисунок.

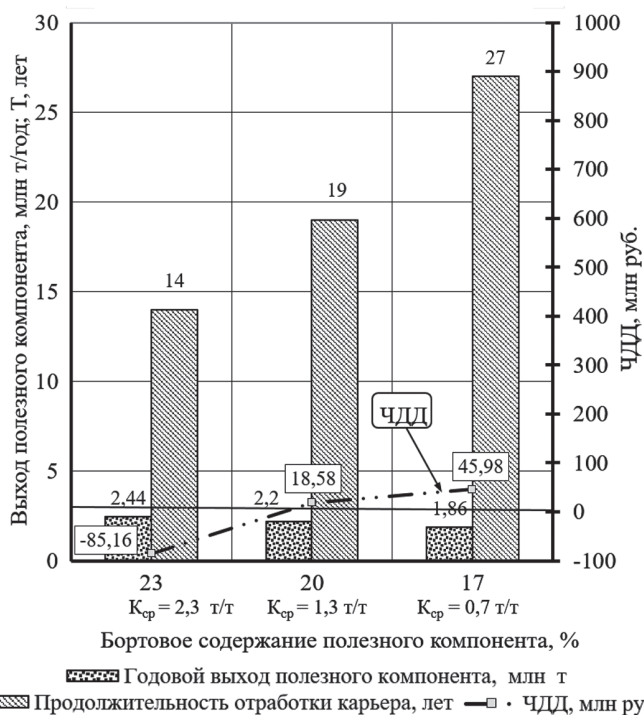


Диаграмма вариантов результатов отработки рудного месторождения открытым способом с различными величинами бортового содержанием полезного компонента и средним коэффициентом вскрыши КСР  
 Diagram of variants of open-cut mining results with different values of cut-off grade of useful component and average stripping ratio  $K_a$

Однако увеличение продолжительности отработки месторождения обеспечит рациональное недропользование, решение социальных проблем на региональном уровне (налоги, рабочие места, инфраструктура).

Для обеспечения оптимальных экономических показателей отработки месторождения и рациональной продолжительности эксплуатации карьера целесообразно в первоначальный период отработки принимать более высокое бортовое содержание, а затем постепенно уменьшать его в процессе разработки карьера, размещая часть добытой руды с более низким содержанием на складах для последующей переработки.

При оптимизации бортового содержания с использованием технико-экономической модели по критерию мак-

симум ЧДД применяются ограничения на используемые в модели экономические показатели (капитальные или эксплуатационные затраты, процентная ставка, цена), производительность перерабатывающего комплекса и карьера по руде, спрос и предложение.

Рациональными вариантами реализации проектных решений являются те, которые оперативно адаптируются к динамике рынков минерального сырья, волатильности цен на конечную продукцию горнодобывающего предприятия, изменению горно-геологических и горнотехнических данных об объекте.

Принятие решения об отнесении горной массы, извлекаемой из карьера к вскрыше или руде, целесообразно проводить, учитывая бортовое содержание, которое установлено по граничным за-

тратам, при которых эксплуатационные затраты покрываются за счет реализации руды с граничным содержанием полезных компонентов.

Значение удельных эксплуатационных затрат на добычу руды увеличивается на величину удельных затрат на вскрышные работы в условиях, когда добывается руда со средним содержанием полезных компонентов выше значения бортового содержания.

Необходимо отметить, что динамика цен на рынках минерального сырья значительно влияет на выбор стратегии определения бортового содержания, что в свою очередь влияет на определение предельных контуров карьеров. Исследования показывают, что увеличение рыночных цен на минеральное сырье сопровождается увеличением себестоимости добычных и вскрышных работ [21 – 23].

### **Заключение**

Результаты анализа данных, представленных на рисунке, показывают, что при наименьшем бортовом содержании в руде, которое составляет 17%, достигается минимальная себестоимость конечного продукта и максимальное значение ЧДД за весь срок разработки месторождения открытым способом.

В процессе проектирования карьеров бортовое содержание полезных компонентов будет более достоверным при учете в расчетах коэффициента вскрыши.

В итоге масса конечного продукта, получаемого из добытой руды, возрастает при положительном приросте зна-

чений в граничном содержании, а при увеличении бортового содержания полезных компонентов в руде растет производительность карьера по вскрышным породам.

При снижении цен на рынке минерального сырья для обеспечения экономической целесообразности открытой разработки месторождения необходимо снизить капитальные и эксплуатационные затраты, текущий коэффициент вскрыши, уменьшить производительность, изменить систему разработки или временно законсервировать работу предприятия до более позитивных внешних условий.

Стратегия, используемая при проектировании карьера, должна основываться на использовании в качестве исходных данных более высоких затрат или низких цен на конечную продукцию в начальной стадии отработки месторождения, а затем для каждой последующей стадии необходимо уменьшать затраты или увеличивать цены на продукцию горнодобывающего предприятия. В результате реализации этой стратегии на начальной стадии будет принято высокое бортовое содержание полезного компонента и высокая извлекаемая ценность руды, а каждая последующая стадия будет иметь более низкое бортовое содержание и извлекаемую ценность добытой руды.

Благодарим коллектив кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета за содействие в подготовке статьи к опубликованию.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

Литературу с п. 1 по п. 10 смотри в REFERENCES.

11. *Беляков Н. Н.* Моделирование открытых горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2014. — № 12. — С. 45 – 51.

12. *Гавришев С. Е., Заляднов В. Ю.* Расширение границ открытой разработки при комплексном освоении участка недр земли // Актуальные проблемы горного дела. — 2016. — № 1. — С. 11 – 15.



13. Hill J. H. Geological and economical estimate of mining projects. London: Informa Group, 1993, 85 p.
14. Капутин Ю. Е. Информационные технологии планирования горных работ. — СПб.: Недра, 2008. — 420 с.
15. Hustrulid W. A., Kuchta M. E. Open pit mine planning & design. Vol. 1. Fundamentals. Rotterdam, 1998, 735 p.
16. Анисимов К. А., Никифоров А. В. Современные технологии отработки алмазонасных месторождений // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2023. — Т. 334. — № 1. — С. 196–208. DOI: 10.18799/24131830/2023/1/3837.
17. Хохлов С. В., Виноградов Ю. И., Носков А. П., Баженова А. В. Прогнозирование смещения рудных контуров при формировании развала взорванной горной массы // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 3. — С. 40–56. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_3\_0\_40.
18. Фомин С. И. Обоснование технологических решений при организации отработки рудных карьеров // Записки Горного института. — 2016. — Т. 221. — С. 644–650.
19. Матрохина К. В., Трофимец В. Я., Мазаков Е. Б., Маховиков А. Б., Хайкин М. М. Развитие методологии сценарного анализа инвестиционных проектов предприятий минерально-сырьевого комплекса // Записки Горного института. — 2023. — Т. 259. — С. 112–124. DOI: 10.31897/PMI.2023.3.
20. 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.
21. 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, no. 22, article 10848. DOI: 10.3390/app112210848.
22. Брагин В. И., Харитонова М. Ю., Мацко Н. А. Вероятностный подход к оценке динамического бортового содержания // Записки Горного института. — 2021. — Т. 251. — С. 617–625. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.1.
23. Gilani S. O., Sattarvand J., Hajihassani M., Abdullah S. S. A stochastic particle swarm based model for long term production planning of open pit mines considering the geological uncertainty // Resources Policy. 2020, vol. 68, article 101738. DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101738. **PLoS**

## REFERENCES

1. Chanda E. K. Network linear programming optimisation of an integrated mining and metallurgical complex. *Advances in applied strategic mine planning*. 2018, pp. 269–285. DOI: 10.1007/978-3-319-69320-0\_18.
2. Dagdelen K., Kawahata K. Value creation through strategic mine planning and cutoff-grade optimization. *Mining Engineering*. 2008, vol. 60, no. 1, pp. 39–45.
3. Dimitrakopoulos R., Martinez L., Ramazan S. *Optimising open pit design with simulated orebodies and Whittle Four-X. A maximum upside/minimum downside approach*. Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series. 2007, pp. 201–206.
4. Tahernejad M. M., Ataei M., Khalokakaie R. A practical approach to open-pit mine planning under price uncertainty using information gap decision theory. *Journal of Mining and Environment*. 2018, vol. 9, no. 2, pp. 527–537. DOI: 10.22044/jme.2017.6220.1439.
5. Armstrong M., Lagos T., Emery X., Homem-de-Mello T., Lagos G., Sauré D. Adaptive open-pit mining planning under geological uncertainty. *Resources Policy*. 2021, vol. 72, article 102086. DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102086.
6. Hoerger S., Hoffman L., Seymour F. Mine planning at Newmonts Nevada operations. *Mining Engineering*. 1999, vol. 51, pp. 26–30.

7. Glacken I. M., Snowden D. V., Edwards A. C. Mineral resource estimation. *Mineral resource and ore reserve estimation. Mining and metallurgy guide to good practice*. The Aus. Inst. 2001, pp. 189 – 198.

8. Guo H., Nguyen H., Vu D. A., Bui X. N. Forecasting mining capital cost for open-pit mining projects based on artificial neural network approach. *Resources Policy*. 2019, vol. 74, no. 3, article 101474. DOI: 10.1016/j.resourpol.2019.101474.

9. Lerchs H., Grossmann I. F. Optimum design of open-pit mines. *CIM Bulletin*. 1965, vol. 58, pp. 47 – 54.

10. Whittle J. A decade of open pit mine planning and optimization – the craft of turning algorithms into packages. *Proceedings of APCOM'99: Computer Applications in the Minerals Industries: 28 International Symposium*. Golden, Colorado, USA, 1999, pp. 15 – 24.

11. Belyakov N. N. Modeling of open-pit mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2014, no. 12, pp. 45 – 51. [In Russ].

12. Gavrishev S. E., Zalyadnov V. Yu. Expansion of the open-pit mining boundaries at the integrated development of the subsoil area. *Aktual'nye problemy gornogo dela*. 2016, no. 1, pp. 11 – 15. [In Russ].

13. Hill J. H. *Geological and economical estimate of mining projects*. London: Informa Group, 1993. 85 p.

14. Капутин Ю. Е. *Информационные технологии планирования горных работ* [Information technologies of planning of mining operations], Saint-Petersburg, Nedra, 2008, 420 p.

15. Hustrulid W. A., Kuchta M. E. *Open pit mine planning & design*. Vol. 1. Fundamentals. Rotterdam, 1998, 735 p.

16. Anisimov K. A., Nikiforov A. V. Modern technologies of diamondiferous deposits mining. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2023, vol. 334, no. 1, pp. 196 – 208. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2023/1/3837.

17. Khokhlov S. V., Vinogradov Yu. I., Noskov A. P., Bazhenova A. V. Predicting displacements of ore body boundaries in generation of blasted rock pile. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 3, pp. 40 – 56. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_3\_0\_40.

18. Fomin S. I. Justification of technological solutions in the organization of ore pit mining. *Journal of Mining Institute*. 2016, vol. 221, pp. 644 – 650. [In Russ].

19. Matrokhina K. V., Trofimets V. Ya., Mazakov E. B., Makhovikov A. B., KHaykin M. M. Development of the methodology of scenario analysis of investment projects of enterprises of mineral and raw materials complex. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 259, pp. 112 – 124. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.3.

20. Fomin S. I., Ivanov V. V., Semenov A. S., Ovsyannikov M. P. Incremental open-pit mining of steeply dipping ore deposits. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020, vol. 15, no. 11, pp. 1306 – 1311.

21. 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, no. 22, article 10848. DOI: 10.3390/app112210848.

22. Bragin V. I., Kharitonova M. Yu., Matsko N. A. Probabilistic approach to the assessment of dynamic board maintenance. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 251, pp. 617 – 625. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.1

23. Gilani S. O., Sattarvand J., Hajihassani M., Abdullah S. S. A stochastic particle swarm based model for long term production planning of open pit mines considering the geological uncertainty. *Resources Policy*. 2020, vol. 68, article 101738. DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101738.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фомин Сергей Игоревич<sup>1</sup> – д-р техн. наук, профессор, e-mail: fominsi@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0939-1189,

Говоров Алексей Сергеевич<sup>1</sup> – аспирант,

e-mail: s215078@stud.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0001-9071-862X,

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.

**Для контактов:** Говоров А.С., e-mail: s215078@stud.spmi.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*S.I. Fomin*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

e-mail: fominsi@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0939-1189,

*A.S. Govorov*<sup>1</sup>, Graduate Student,

e-mail: s215078@stud.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0001-9071-862X,

<sup>1</sup> Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,

199106, Saint-Petersburg, Russia.

**Corresponding author:** A.S. Govorov, e-mail: s215078@stud.spmi.ru.

Получена редакцией 10.04.2023; получена после рецензии 27.09.2023; принята к печати 10.11.2023.

Received by the editors 10.04.2023; received after the review 27.09.2023; accepted for printing 10.11.2023.



---

## ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

---

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ РЕЗЦОВ ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ

(2023, № 5, СВ 4, 12 с.)

*Nguyen The Vinh* – аспирант, ГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: nguyenthevinh@mail.ru.

Представлены результаты моделирования напряженно-деформированного состояния режущей части тангенциального резца очистного комбайна под действием сил сопротивления резанию. Анализ полученных данных позволил определить в резце зоны с концентрацией напряжений и охарактеризовать предпосылки разрушения твердосплавных вставок при тяжелых условиях резания. Выявлено, что напряжения, возникающие в резце в процессе резания угля, сосредоточены преимущественно на границе контакта твердосплавной вставки и корпуса резца, что при абразивно-ударном циклическом нагружении резца может вызвать разрушение головной части корпуса державки с последующим выломом твердосплавной вставки. Определены рациональные соотношения конструктивных параметров твердосплавной вставки, при которых возможно минимизировать напряжения в теле твердосплавного вооружения и корпуса.

Ключевые слова: очистной комбайн, шнековый орган, тангенциальный резец, сила резания, конструктивные параметры, моделирование, напряженно-деформированное состояние.

### SIMULATION AND INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF CLEANING COMBINES TANGENTIAL CUTTERS

*Nguyen The Vinh*, Graduate Student, Mining Institute, National University of Science and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia, e-mail: nguyenthevinh@mail.ru.

The article presents the results of modeling the stress-strain state of the cutting part of the tangential cutter of a cleaning combine under the action of cutting resistance forces. The analysis of the data obtained made it possible to determine stress concentration zones in the cutter and characterize the prerequisites for the destruction of carbide inserts under severe cutting conditions. It is revealed that the stresses arising in the cutter during the coal cutting process are concentrated mainly at the contact boundary of the carbide insert and the cutter body, which, with abrasive-impact cyclic loading of the cutter, can cause destruction of the head part of the holder body with subsequent breakage of the carbide insert. The rational ratios of the design parameters of the carbide insert are determined, at which it is possible to minimize the stresses in the body of the carbide armament and hull.

Key words: cleaning combine, screw, tangential cutter, cutting force, design parameters, simulation, stress-strain state.

---

## ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

---

### МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОВНЯ ТЕХНОГЕННОГО ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТА В ОТВАЛАХ УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗОВ

(2023, № 6, СБ 5, 20 с.)

*Ческидов Василий Владимирович*<sup>1</sup> — канд. техн. наук, доцент, заместитель директора Горного института, e-mail: vcheskidov@misis.ru,  
*Липина Александра Валерьевна*<sup>1</sup> — старший преподаватель,  
*Красноцветов Максим Александрович*<sup>1</sup> — аспирант; <sup>1</sup> ГИ НИТУ «МИСиС».

Для уменьшения затрат проектами крупных угледобывающих компаний предусмотрено формирование внешних или внутренних отвалов значительной высоты. При этом обоснование параметров насыпи (в первую очередь, генерального угла, количества и высоты ярусов и другие) в современной практике осуществляется практически без учета гидрогеологических условий, которые значительно изменяются в процессе отвалобразования. Моделирование положения водоносного горизонта в теле и основании отвала на разных этапах его формирования позволяет прогнозировать его состояние, управлять процессом его отсыпки и повышать безопасность эксплуатации горнотехнического сооружения.

Ключевые слова: добыча угля, отвалы, подземные воды, техногенный водоносный горизонт, моделирование, гидрогеологическое обеспечение горных работ, вскрышные породы, инфильтрация.

#### MODELING OF THE TECHNOGENIC AQUIFER LEVEL IN COAL MINE DUMPS

*V.V. Cheskidov*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Vice-Director, e-mail: vcheskidov@misis.ru,  
*A.V. Lipina*<sup>1</sup>, Senior Lecturer; *M.A. Krasnotsvetov*<sup>1</sup>, Graduate Student;  
<sup>1</sup> Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

To reduce costs, the projects of large coal mining companies provide for the formation of external or internal dumps of considerable height. At the same time, the substantiation of the parameters of the embankment (first of all, the general angle, the number and height of the tiers, and others) in modern practice is carried out practically without taking into account hydrogeological conditions, which change significantly in the process of dumping. Modeling the position of the aquifer in the body and base of the dump at different stages of its formation allows you to predict its condition, control the process of its dumping and improve the safety of operation of mining facilities.

Key words: mining, coal mining, dumps, underground waters, technogenic aquifer, modeling, hydrogeological support of mining operations, overburden, infiltration.



---

## ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

---

### АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ПОДАЧИ НАСОСОВ КАРЬЕРНОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭКСКАВАТОРА В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ

(2023, № 7, СБ 7, 16 с. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_7\_7\_3)

*Рахутин Максим Григорьевич*<sup>1</sup> — д-р техн. наук, профессор, e-mail: rahutin.mg@misis.ru,  
*Чан Ван Хиеп* — аспирант<sup>1</sup>; <sup>1</sup> НИТУ «МИСиС».

На примере карьерного гидравлического экскаватора Komatsu PC2000-8 работающего на разрезе Ха Ту, Куанг Нинь, Социалистическая Республика Вьетнам проведен анализ изменения подачи насосов в процессе рабочего цикла. Представлены расчетные формулы и метод наблюдения для определения продолжительности операций рабочего цикла и подачи насоса в текущий момент времени. Для компьютерного моделирования изменения подачи насосов использовалась разработанная методика расчета и программа для среды Excel. Предложен критерий увеличения продолжительности выполнения рабочей операции в рассматриваемых условиях, характеризуемый предложенным коэффициентом «увеличения продолжительности операции».

Ключевые слова: карьерный гидравлический экскаватор, подача насосов, гидроцилиндры, наблюдение.

#### ANALYSIS OF CHANGES IN SUPPLY OF PUMPS OF A QUARRY HYDRAULIC EXCAVATOR DURING OPERATION

*M.G. Rakhutin*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: rahutin.mg@misis.ru; *Chan Van Hiep*<sup>1</sup>, Graduate Student,  
<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

Using the example of a Komatsu PC2000-8 hydraulic excavator operating at the Ha Tu section, Quang Ninh, Socialist Republic of Vietnam, the analysis of changes in the pump supply during the working cycle was carried out. Calculation formulas and an observation method are presented to determine the duration of the working cycle operations and the pump supply at the current time. The developed calculation method and a program for the Excel environment were used for computer modeling of pump supply changes. A criterion for increasing the duration of a working operation under the conditions under consideration is proposed, characterized by the proposed coefficient of «increasing the duration of the operation».

Key words: quarry hydraulic excavator, pump feed, hydraulic cylinders, supervision.

---

ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ  
(СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

---

МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОВЕДЕНИЯ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА,  
ИНИЦИИРОВАННОЙ ЗАКАЧКОЙ ЖИДКОСТЕЙ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ИХ ВЯЗКОСТЕЙ

(2023, № 7, СВ 8, 20 с.)

Шевцова Анна Александровна — аспирант, Сколковский институт науки и технологий (Сколтех),  
e-mail: Anna.Shevtsova@skoltech.ru.

Представлены результаты лабораторного исследования параметров трещины гидроразрыва (ТГ) и их особенностей в зависимости от вязкости закачиваемой жидкости. Покостовский гранит был выбран ввиду однородности и низкой проницаемости, что исключит влияние природных неоднородностей и утечек жидкости на поведение трещины гидроразрыва. Для изучения особенностей ТГ была разработана специальная экспериментальная методика. Параметры ТГ регистрировались тремя независимыми системами мониторинга. Сочетание нескольких независимых лабораторных методов позволяет надежно определить параметры, которые могут быть использованы для валидации моделей гидравлического разрыва пласта (ГРП). Существующие теоретические модели распространения ГРП имеют ряд ограничений при прогнозировании влияния жидкостей ГРП на свойства пласта. Установлено, что вязкость жидкости ГРП влияет на раскрытие трещины, скорость распространения и извилистость трещины ГРП.

Ключевые слова: гидроразрыв пласта, распространение трещины гидроразрыва, динамика роста трещины, извилистость трещины, акустическая эмиссия, жидкости гидроразрыва, реология жидкости гидроразрыва.

METHODOLOGY FOR LABORATORY STUDIES OF FRACTURE BEHAVIOR INITIATED  
BY INJECTION OF FLUIDS WITH A WIDE RANGE OF VISCOSITIES

A.A. Shevtsova, Graduate Student, Skolkovo Institute of Science and Technology, 121205, Moscow, Russia.

The results of laboratory study of hydraulic fracture parameters (HFP) and features depending on the viscosity of the injected fluid are presented in this article. The granite was selected due to its homogeneity and low permeability, which eliminates the influence of natural inhomogeneities and fluid leakage on fracture behavior. A special experimental technique was developed to study the fracture characteristics. HFP were recorded by three independent monitoring systems. The combination of several independent laboratory methods allows reliable determination of parameters that can be used for validation of hydraulic fracturing models (HFM). Existing theoretical models of hydraulic fracture propagation have a number of limitations in predicting the effect of fracturing fluids on reservoir properties. The obtained dependencies can be taken into account for the HFM, which can improve the efficiency of hydraulic fracturing in field. Laboratory experiments can be considered as a reasonable alternative to testing new fluids, as they provide comprehensive information on the properties of created fractures before applying the new fracturing technology in the field.

Key words: hydraulic fracturing, fracture propagation, fracture propagation dynamics, fracture tortuosity, acoustic emission, fracturing fluids, fracturing fluid rheology.



---

ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ  
(СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

---

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕКОНСТРУКЦИИ ШАХТНЫХ СТОЛОВ В СЛОЖНЫХ  
ГОРНТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

(2023, № 8, СВ 9, 20 с.)

Машин Алексей Николаевич — генеральный директор, АО «Трансинжстрой», e-mail: info@tinso.ru.

Представлен алгоритм численного моделирования, предусматривающий стадийный учет технологии работ и моделирование околостольного массива пород с использованием модели Хоека-Брауна. Разработана технологическая схема реконструкции шахтных ствлов, обеспечивающая снижение геотехнических рисков и повышение безопасности работ в сложных горнотехнических условиях. Важным преимуществом технологии является сохранность существующей крепи благодаря использованию анкерных опорных систем с высокой несущей способностью. Методами математического моделирования установлены закономерности взаимодействия системы «новая крепь-существующая крепь-дезинтегрированный породный массив», формируемой в процессе реконструкции ствлов; выявлены негативные факторы, приводящие к возникновению концентраций напряжений в тубинговой крепи, искривленных в процессе эксплуатации ствлов и предложены конструктивные решения по их компенсации.

Ключевые слова: вертикальный ствол, породный массив, крепь, бетон, анкер, реконструкция, дефекты, напряжения, деформации, устойчивость, несущая способность.

IMPROVING THE TECHNOLOGY OF RECONSTRUCTION OF MINE SHAFTS IN DIFFICULT MINING CONDITIONS

A.M. Mashin, General Director, JSC Transinzstroy, Moscow, Russia, e-mail: info@tinso.ru.

The article presents a numerical modeling algorithm that provides for the stage-by-stage accounting of the work technology and modeling of the near-wellbore rock mass using the Hoek-Brown model. Further, a technological scheme for the reconstruction of mine shafts was developed, which provides a reduction in geotechnical risks and an increase in the safety of work in difficult mining conditions. An important advantage of the technology is the preservation of the existing lining due to the use of anchor support systems with high bearing capacity. Using the methods of mathematical modeling, the regularities of the interaction of the system «new lining-existing lining-disintegrated rock mass», formed during the reconstruction of the shaft, were established, and negative factors were identified that lead to the emergence of stress concentrations in the tubing lining, curved in during the operation of shafts and constructive solutions for their compensation are proposed.

Key words: vertical shaft, rock mass, lining, concrete, anchor, reconstruction, defects, stresses, deformations, stability, bearing capacity.

МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕР ОХРАНЫ УЧАСТКА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ  
ПРОМЫШЛЕННОГО РАЙОНА С СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ИНФРАСТРУКТУРОЙ  
ПРИ ОТРАБОТКЕ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

(2023, № 6, СВ 6, 16 с.)

Лялин Никита Алексеевич<sup>1</sup> – аспирант, e-mail: m141778@edu.misis.com,

Беспалова Юлия Алексеевна<sup>1</sup> – аспирант, e-mail: trekbol3@mail.ru,

Тухель Екатерина Андреевна<sup>1</sup> – доцент, e-mail: tukhel.ea@misis.ru,

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС».

Проведено обоснование параметров сдвижения земной поверхности при разработке угольного пласта. Для обоснования возможности безопасной выемки угля был проведен математический предрасчет влияния очистных работ на поверхность и находящиеся на ней здания и сооружения. Был выполнен расчет: предельной и безопасной глубины ведения горных работ для определения необходимости применения мер защиты; углов сдвижения, углов полного сдвижения, граничных углов и ориентировочного времени протекания процесса сдвижения. Было установлено, что проектная глубина ведения горных работ лежит ниже безопасной глубины на 88 м, что позволяет вести горные работы без угрозы нарушения конструктивной целостности несущих элементов фундаментов зданий и сооружений на поверхности подрабатываемого участка.

Ключевые слова: мульда сдвижения, уголь, подземная разработка, деформации земной поверхности, безопасная и предельная глубина, углы сдвижения, зона опасного влияния.

SURVEYING PROVISION OF MEASURES FOR THE PROTECTION OF THE EARTH SURFACE SITE  
OF INDUSTRIAL AREA WITH THE EXISTING INFRASTRUCTURE DURING THE MINING OF COAL SEAM

N.A. Lialin<sup>1</sup>, Graduate Student, e-mail: m141778@edu.misis.com,

Y.A. Bepalova<sup>1</sup>, Graduate Student, e-mail: trekbol3@mail.ru,

E.A. Tukhel<sup>1</sup>, Assistant Professor, e-mail: tukhel.ea@misis.ru,

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

The purpose of this work is to substantiate the parameters of the earth's surface displacement during the development of a coal seam. To substantiate the possibility of safe coal mining, a mathematical pre-calculation of the impact of cleaning operations on the surface and the buildings and structures located on it was carried out. The calculation of the maximum and safe depth of mining operations was carried out to determine the need for protective measures. In the course of the work, the calculation of the shear angles, the angles of full shear, the boundary angles and the estimated time of the shear process was also performed. It was found that the design depth of mining operations lies below the safe depth by 88 meters, which makes it possible to carry out mining operations without compromising the structural integrity of the bearing elements of the foundations of buildings and structures on the surface of the undermined area.

Key words: displacement trough, coal, underground mining, deformations of the earth's surface, safe and limiting depth, displacement angles, zone of dangerous influence

