

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ УКРЕПЛЕНИЯ ОТКОСОВ УСТУПОВ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ НАВЕСНОГО БУРОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭКСКАВАТОРНОЙ БАЗЫ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО)
Зырянов И. В., д. т. н., зам. директора по научной работе
Акишев А. Н., к. т. н., начальник отдела
Бокий И. Б., к. ф.-м. н., заведующий лабораторией
Золотин В. Г., к. т. н., старший научный сотрудник

ООО «Нефтегазкомплектмонтаж»
Крицкий И. С., аспирант

Обосновывается технологическая и экономическая эффективность технологии повышения устойчивости уступа путем установки анкерно-тросово-сетчатой завесы и теплогидроизоляции поверхности при разработке карьеров в условиях криолитозоны.

ВВЕДЕНИЕ

Цель выполненной работы — повышение экономической эффективности разработки карьеров АК «АЛРОСА» (ПАО) за счет уменьшения объема вскрышных работ путем укрепления уступов в условиях криолитозоны.

Ключевой идеей работы является применение технологии укрепления в условиях криолитозоны крупнообъемных участков с неустойчивым состоянием массива пород, потенциально склонного к возможности реализации масштабных плоскостных или комбинированных обрушений уступа, группы уступов или участков бортов карьера в зонах геологических нарушений (даек). Глубина укрепления определяется предполагаемым положением поверхности скольжения и глубиной зоны оттайки массива.

Технология предусматривает повышение устойчивости уступа путем установки анкерно-тросово-сетчатой завесы и теплогидроизоляции поверхности. Для бурения и установки анкеров предлагается применение бурового оборудования в качестве навесного для существующей экскаваторной базы — дооснащение обычного экскаватора с ковшом навесным оборудованием специальной конструкции (буровым лафетом) для получения многофункциональной установки с возможностью выполнения работ как экскаваторным ковшом, так и навесным буровым оборудованием, с отличной проходимостью и с огромным радиусом действия для бурения во всех направлениях и под разными углами без перемещения экскаватора.

Основные решаемые научно-технические и технологические задачи:

1. Снижение ширины берм, укрепление уступов и транспортных съездов.
2. Снижение объемов вскрышных работ и себестоимости добычи полезного ископаемого.
3. Увеличение объемов добычи (без разнаса бортов карьеров). Освободившееся в результате снижения объемов вскрышных работ добычное и транспортное оборудование направляется на ведение добычных работ, что обеспечивает прирост объемов

добычи и рост дисконтированной прибыли. Вместе с этим происходит увеличение бюджетных поступлений за счет роста НДС и налога на прибыль предприятия.

4. Повышение эффективности и безопасности открытой разработки — за счет применения укрепления уступа и участков бортов карьера в зонах геологических нарушений, что, в результате, обеспечивает соблюдение проектных параметров бортов карьера, защиту карьерного оборудования и персонала от падения кусков породы с откосов уступов в рабочее пространство карьера, а также снижение или исключение затрат на ликвидацию последствий аварии от обрушения горных пород.

Научная значимость и новизна работы:

- уточнение и увеличение знаний о ранних этапах процессов образования участков деформаций в прибортовых массивах;
- расширение знаний о деформировании массива под воздействием природных и техногенных нагрузок с учетом фактора времени;
- развитие способов защиты уступов бортов карьеров в условиях криолитозоны;
- развитие методов оценки устойчивости бортов карьеров и обоснованного выбора соответствующих коэффициентов запаса устойчивости уступов карьеров в перекрывающих породах криолитозоны.

Технологическая ценность реализации работы заключается в разработке технологии обеспечения устойчивости откосов уступов с одновременным уменьшением ширины берм.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Одним из основных факторов, определяющих экономическую эффективность открытой разработки месторождений, является результирующий угол наклона борта карьера в предельном положении, который определяется инженерно-геологическими и геокриологическими условиями месторождения, а также технологией их формирования [1–6].

Углубка карьеров ведется поуступно, при этом высота рабочих уступов обычно принимается равной 10–15 м, что соответствует оптимальной производительности бурового и погрузочного оборудования, используемого в России. При постановке на предельный контур карьера рабочие уступы обычно сдваиваются ($h = 30$ м) или страиваются ($h = 45$ м).

При принятии решений о предельной глубине карьера и соответствующем ей среднем коэффициенте вскрыши следует иметь в виду, что независимо от величины предельного (по устойчивости) угла погашения борта его реальное значение при принятых технологиях разработки и транспортной схеме не может превысить значения технологического угла α_6 :

$$\alpha_6 = \arctg \frac{H}{(n-1)h_y \operatorname{ctg} \alpha_y + (n_i-1)b_6 + \Sigma b_T + \Sigma b_{oc}}, \quad (1)$$

где H — проектная глубина карьера; h_y и α_y — соответственно, принятые высота и угол погашения сдвоенного (строенного) уступа; n — общее число уступов в карьере; b_6 — ширина промежуточной бермы между рабочими уступами при их сдваивании на предельном контуре; Σb_T — суммарная ширина транспортных берм (съездов), оставляемых по борту; Σb_{oc} — суммарная ширина берм очистки, оставляемых через 60–120 м по высоте борта для перехвата и удерживания отдельных камней и камнепадов, скатывающихся с верхних уступов.

Особенностью геокриологических условий кимберлитовых месторождений Якутии является их расположение в зоне сплошного распространения мощных толщ мерзлых пород [5–6], что повышает устойчивость бортов карьеров и, менее выражено, устойчивость уступов. Поэтому достаточно часто возникает ситуация, когда технологически достижимый угол борта α_6 окажется существенно меньше геомеханически достижимого угла.

Ограничение высоты уступов на предельных контурах обусловлено следующими причинами:

- так как при разработке скальных пород их отбойка осуществляется буровзрывным способом, то чем больше высота уступа и выше крупность пород, тем больше ширина зоны деформаций от последнего ряда скважин вглубь массива и, следовательно, тем меньше угол погашения уступа и выше скорость его выполаживания во времени;
- использование метода предварительного щелеобразования для защиты законтурного массива от разрушения при взрывных нагрузках сразу на высоту 2–3 рабочих уступов возможно только при наличии станков, обеспечивающих бурение ряда параллельных скважин под заданным углом наклона на глубину, соответствующую общей высоте погашаемого уступа.

Экранирующая щель, созданная перед предельным контуром при взрывании отбойных скважин в предохранительных целиках, в значительной мере ограничивает распространение деформаций и обеспечивает частичную защиту массива пород бермового горизонта. Этого недостаточно для поддержания в устойчивом состоянии нижнего уступа бермового горизонта, поскольку его «козырек» образован взрывом двух отбойных скважин: последнего ряда отбойных скважин перед приконтурной лентой и первого ряда при отработке приконтурной ленты. Нарушение массива в глубину (нижняя часть скважины) будет равно расстоянию до 10–20 диаметров заряда.

Частично нарушенная верхняя приоткосная часть уступа («козырек») под воздействием атмосферных осадков, сейсмического действия массовых взрывов и выветривания пород будет быстро разрушаться. Для безопасной очистки бермы вблизи откоса отсыпают предохранительный вал высотой 1–1,5 м, за которым продолжается разрушение козырька и падение камней. Ширина вала может изменяться от 2,2 до 3–4 м, уменьшая таким образом ширину проезжей части предохранительной бермы и затрудняя ее очистку.

Опытном укрепительных работ на карьерах обосновано, что даже в слабых и сильновыветрелых породах за счет их укрепления арматурой из стали и каната можно создать устойчивый массив, отличающийся значительными прочностными свойствами.

Для защиты пород от выветривания на карьерах применяют покрытия поверхности (бетонные, битумные и гидрофобизирующие), из которых чаще всего используется набрызгбетон, как крупнозернистый, так и мелкозернистый (называемый торкретбетоном).

Так как в соответствии с Правилами охраны труда, углы откоса уступов и бортов определяются проектом, то вполне возможно заложить углы наклона бортов круче расчетных, определенных в соответствии с естественными физико-механическими свойствами пород, при этом искусственно повысив прочностные свойства пород массива — коэффициент сцепления, путем упрочнения, крепления массива пород.

Согласно теории устойчивости откосов однородного массива, его сдвигание происходит по поверхности ослабления близкой по форме к круглоцилиндрической. При этом в верхней части находятся сдвигающие силы, а в нижней — удерживающие. Обе эти силы являются функциями от веса массива, формирующего сползающий клин. С повышением угла наклона борта нижняя его часть, представляющая удерживающие силы, обрабатывается и вывозится во вскрышу. В качестве компенсации, обеспечивающей устойчивость, к нижней части уступа прикрепляется (пришивается) адекватный по весу массив пород, находящийся за поверхностью скольжения, посредством штанг.

На рис. 1 представлен вариант, когда крутой угол уступа позволяет производить понижение горных работ, и приведена принципиальная схема крепления борта уступа карьера.

Скважины под анкера бурятся при постановке каждого слоя в конечное положение, горизонтальной строчкой с промежутком $m \approx 4$ м. Промежуток является функцией от блочности массива — $m = f(l_6)$. Забуриваются скважины в нижнюю бровку, угол наклона скважин — перпендикулярно плоскостям ослабления, поверхности скольжения.

Глубина скважин определяется предполагаемым положением поверхности скольжения, которую необходимо перебурить и прикрепить к ней определенный вес массива. Крезь устанавливается по мере выбуривания скважин. Между анкерами скважин натягивается трос. Верхняя часть уступа во избежание осыпей затягивается сеткой.

Установленное крепление позволит получить устойчивый откос строенного уступа в конечном положении высотой 45 м с углом наклона до 80°.

Однако основным недостатком данной системы на сегодняшний день является технология установки анкеров с применением ручного труда промышленными альпинистами, что приводит к увеличению трудозатрат.

Для решения данной задачи необходимо применение буровых установок с возможностью бурения ниже уровня земли. Так как приобретение нового бурового оборудования является весьма затратным мероприятием, можно рассматривать возможность модернизации существующего оборудования путем установки навесного бурового лафета.

ТЕХНОЛОГИЯ УКРЕПЛЕНИЯ ОТКОСОВ УСТУПОВ

Технология укрепления уступов состоит в следующем:

- бурение шпуров с помощью навесного лафета;
- установка анкеро-троссовой завесы с применением буроинъекционных анкеров;
- инъецирование массива;
- гидроизоляция поверхности уступа;
- формирование теплозащитного экрана.

Применение бурового оборудования типа ExcaDrill (финской компании Junttan) в качестве навесного оборудования для экскаваторной базы позволяет использовать существующее оборудование. Требуется меньше пяти минут, чтобы сменить ковш экскаватора на навесное буровое оборудование. Это делает экскаватор универсальной машиной и значительно экономит ресурсы компании.

Анкера подбираются в зависимости от типов грунтов, вида и величины нагрузок и глубины заделки. Грунтовые буроинъекционные анкера Ischebeck Titan и их российские аналоги —

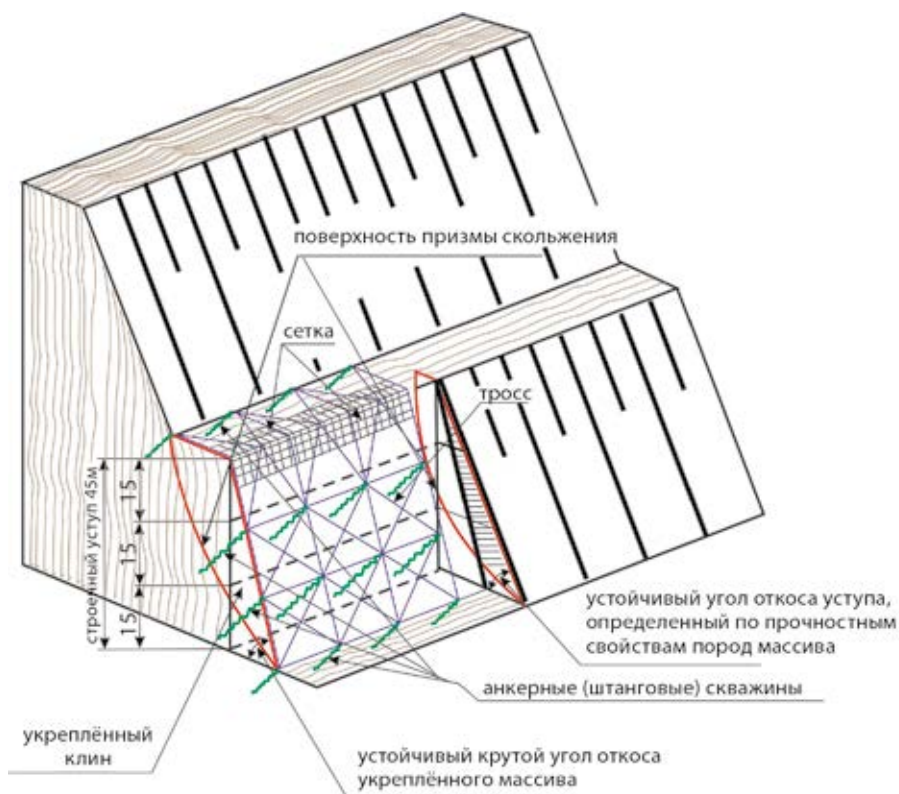


Рис. 1. Фрагмент закрепленной части борта карьера, поставленной в крутое конечное положение

Табл. 1. Расчет ожидаемого экономического эффекта от внедрения

№№ п. п.	Наименование показателя	Ед. изм.	Базовый вариант	Вариант новой техники
Исходные данные				
1	Объем вскрыши	тыс. м ³	37200	30200
2	Сокращение объема вскрыши	тыс. м ³		7000
3	Грузооборот	тыс. ткм	558000	453000
4	Снижение грузооборота	тыс. ткм		105000
5	Площадь искусственного укрепления откосов уступов	тыс. пог. м		4,0
6	Себестоимость 1 м ³ вскрыши (условно-переменная часть)	тыс. м ²		60,0
7	Себестоимость 1 ткм (условно-переменная часть)	руб/м ³	113,28	113,28
8	Себестоимость 1 м ² укрепления уступа	руб/ткм	8,56	8,56
Расчетные данные				
1	Затраты на вскрышные работы	тыс. руб.	4214016	3421056
2	Затраты на транспортировку вскрыши	тыс. руб.	4776480	3877680
3	Затраты на утепление откосов	тыс. руб.	0	480000
Всего затраты		тыс. руб.	8990496	7778736
Балансовая прибыль		тыс. руб.		1211760
Отчисления в бюджет (налог на прибыль — 20%)		тыс. руб.		242352
Экономический эффект		тыс. руб.		969408

анкера «Атлант» рассчитаны на большие нагрузки, работают на сжатие, растяжение и изгиб и имеют широкий спектр применения для укрепления откосов и горных массивов.

Технология инъектирования заключается в бурении с промывкой и в последовательном нагнетании густого цементного раствора, который просачивается в окружающий сваю грунт, укрепляет стенки буровой скважины и соединяет сваю и грунт. Буровая штанга остается в скважине в качестве армирующего элемента.

Гидроизоляция поверхности уступа может осуществляться разными способами. Возможно применение защитных покрытий на основе одно- или поликомпонентных быстросохнущих битумно-латексных эмульсий (или резино-битумных мастик), нанесенных холодным распылением, которые образуют на обрабатываемой поверхности водонепроницаемую эластичную полимерную мембрану. Такие покрытия обладают значительной адгезией, механической прочностью, эластичностью. Эти свойства сохраняются в широком диапазоне температур от -50°C до $+80^{\circ}\text{C}$. Материал может наноситься на поверхность сложного рельефа, в том числе и на вертикальные стены.

Такие покрытия типа Protaktor или Rapidflex обладают значительной адгезией, механической прочностью, эластичностью. Rapidflex является битумно-латексной эмульсией на водной основе. Для придания конечному покрытию повышенной эластичности и увеличения прочностных свойств битум дополнительно модифицируется патентованными полимерами.

Также для гидроизоляции и снижения растепления поверхности уступа возможно применение полимерных гидроизоляционных мембран, армированных синтетической сеткой. Благодаря армированию такая мембрана отличается повышенной прочностью на разрыв, что является важным параметром для систем с механическим креплением. К таким мембранам относится Plastfoil Polar, которая дополнительно обладает усиленной морозостойкостью, идеально подходит для эксплуатации в холодных регионах.

Для выбора типа гидроизоляционного материала необходимо провести испытания непосредственно на участках карьера, причём возможна комбинация материалов.

Формирование теплозащитного экрана можно осуществить путем нанесения полиуретановой пены (ППУ) или пеноизола на сетку, предназначенную для препятствования вывалам камней. В данном случае сетка выступит каркасом для теплозащитного экрана, а пена будет выполнять функцию теплоизолятора и одновременно защищать сетку и тросы от атмосферной коррозии, тем самым продлевая срок ее эксплуатации. Пеноизол во многом схож с пенополиуретаном, но имеет принципиально отличный химический состав.

ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Одним из основных факторов, определяющих экономическую эффективность открытой разработки месторождений, является результирующий угол наклона борта карьера в предельном положении, который определяется инженерно-геологическими и геокриологическими условиями месторождения, а также технологией их формирования.

В этом случае будет достигнуто увеличение угла наклона уступов и уменьшение ширины предохранительных берм. Экономический эффект от предлагаемой технологии будет получен за счет уменьшения объема вскрышных работ и рассчитан по формуле:

$$\mathcal{E} = (Z_1 - Z_2) \times (1 - k_6), \quad (2)$$

где Z_1 , Z_2 — затраты по базовому варианту и варианту новой техники; $k_6 = 0,20$ — коэффициент, учитывающий отчисления в бюджет (налог на прибыль).

Результаты расчета по мероприятию по месторождению трубка Нюрбинская представлены в **табл. 1**. При отработке месторождения возникла необходимость изменения параметров нерабочих уступов в связи с учетом разрывных нарушений подоткосного массива. Применение предлагаемой технологии

укрепления откосов уступов позволит выйти на проектные параметры отработки карьера.

Экономическая целесообразность применения способов обеспечения устойчивости уступов и бортов карьера в основном достигается сокращением затрат при реализации данных мероприятий, по сравнению с затратами на ликвидацию последствий аварий в результате деформаций, а также сокращением объемов вскрыши:

$$C = [C_B \times (S_{BC} - S_{BP}) - C_Y \times (L_1 + L_2)] \times L + C_L, \quad (3)$$

где C_B — стоимость 1 м^3 вскрыши, руб.; S_{BP} и S_{BC} — площади прирастаемой и сокращаемой вскрыши, соответственно, м^2 ; C_Y — стоимость стабилизации 1 м^2 площади откоса (с учетом тепло- и гидроизоляции), руб.; L_1 и L_2 — длина откоса борта и бермы, соответственно, подлежащих стабилизации, м; L — протяженность участка, подлежащего стабилизации, м; C_L — затраты на ликвидацию последствий аварии в результате обрушения пород, руб. ■

Литература

1. Галустьян Э. Л. Совершенствование конструкции нерабочих бортов карьеров // Горный журнал. 1996. № 1–2. С. 93–95.
2. Галустьян Э. Л. Типизация бортов карьеров по критерию оптимальности углов их наклона // Горный журнал. 1999. № 2. С. 29–33.
3. Еремин Г. М. Отстройка крутонаклонных и вертикальных откосов и способы их крепления в нарушенных зонах // ГИАБ. 2005. № 5. С. 320–325.
4. Цирель С. В., Павлович А. А. Проблемы и пути развития геомеханического обоснования параметров бортов карьеров // Горный журнал. 2017. № 7. С. 39–45. DOI: 10.17580/gzh.2017.07.07.
5. Акишев А. Н., Бокий И. Б., Зырянов И. В. К вопросу развития геотехнологии открытой разработки алмазородных месторождений // Совершенствование технологии горных работ и подготовка кадров для обеспечения техносферной безопасности в условиях Северо-Востока России: сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 80-летию Е. Н. Чемезова, 25 апреля 2018 г. Якутск, 2018. С. 267–274.
6. Зырянов И. В., Акишев А. Н., Бокий И. Б. и др. Инновации при проектировании алмазородных карьеров в криолитозоне // Горная промышленность. 2018. № 5. С. 66–69.
7. Акишев А. Н., Бокий И. Б. К вопросу о возможности увеличения угла наклона борта карьера в условиях криолитозоны // ГИАБ. 2014. № 8. С. 36–40.
8. <http://tokyorope.ru>.
9. <https://www.junttan.com>.
10. <http://avanta-yug.ru/kategorii/burovye-navesnye-ustanovki.html>.
11. <https://www.ischebeck.ru/ru.home/ru.geotechnical-solutions/ru.the-vision.html>.
12. <http://www.alcomp.ru/proectirovanie/ustrojstvo-gruntovykh-ankeroev>.
13. <http://www.technoprok.ru/produkcija/materialy/rapidfleks.html>.
14. <http://koronacolor.ru/catalog>.
15. http://plastfoil.ru/katalog_produkcii/plastfoil_polar.
16. <http://uteplimvse.ru/vidy/zhidkij/polynor.html>.