

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.272.6

ОБОСНОВАНИЕ ТОЛЩИНЫ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОЙ ПОДУШКИ ПРИ ОТРАБОТКЕ ПОДКАРЬЕРНЫХ ЗАПАСОВ ТРУБКИ “УДАЧНАЯ” СИСТЕМАМИ С ОБРУШЕНИЕМ

И. В. Соколов¹, А. А. Смирнов¹, Ю. Г. Антипин¹, И. В. Никитин¹, М. В. Тишков²

¹Институт горного дела УрО РАН, E-mail: geotech@igduran.ru,
ул. Мамина-Сибиряка, 58, 620075, г. Екатеринбург, Россия

²Институт “Якутнипроалмаз”, ул. Ленина, 39, г. Мирный, Республика Саха (Якутия), Россия

Представлены результаты исследований по обоснованию параметров массива разрыхленных пород и руд (предохранительная подушка), формируемого для защиты и изоляции подземных горных работ от открытого пространства карьера при отработке кимберлитовой трубки “Удачная” системами с обрушением. Толщина подушки определена по действию динамического удара обрушающихся пород и образующейся при этом воздушной волны, по предотвращению аэродинамических связей с карьером и термоизоляции подземных горных работ. Рассчитана толщина предохранительной подушки с учетом увеличения глубины разработки до отн. – 680 м.

Кимберлитовое месторождение, предохранительный массив, системы разработки с обрушением, проветривание рудника, выпуск руды

DOI: 10.15372/FTPRPI20180207

Месторождение кимберлитов “Удачное” представляет собой столбообразную вертикальную залежь, разветвляющуюся ниже дна существующего карьера (отн. – 320 м) на два конусообразных рудных тела — западное (ЗРТ) и восточное (ВРТ). Рудные тела имеют горизонтальную мощность около 300 м и прослеживаются до глубины 1400 м с постепенным уменьшением площади поперечного сечения. Угол падения ЗРТ достигает 85°, ВРТ — 80°.

Проектом института “Уралгипроруда” для подземной отработки регламентируется система этажного принудительного обрушения, на отдельных участках — подэтажного обрушения [1]. Первым горизонтом выпуска, на который отрабатываются прибортовые и подкарьерные запасы, является горизонт – 365 м. Далее принят последовательный порядок отработки этажей сверху вниз с горизонтами выпуска – 398, – 465, – 565 и – 665 м.

Запроектированная система разработки гарантирует за счет массовой отбойки руды полноту обрушения запасов и в определенной степени управление гранулометрическим составом отбитой руды [2, 3]. Между тем возможно применение системы разработки с блоковым самообрушением руды, главное преимущество которой, наряду со снижением затрат на отбойку, — большая сохранность кристаллов алмазов при добыче [4].

Эффективное и безопасное применение систем с массовым обрушением руды во многом обусловлено решением проблемы изоляции подземных горных работ (ПГР) от выработанного пространства карьера и защиты подземных выработок от воздействия негативных факторов [5, 6]. При субвертикальном падении рудных тел и отсутствии налегающих пород возможен выпуск всей отбитой под дном карьера руды через подземные выработки выпуска. Однако при этом возникает прямая активная аэродинамическая связь (ААС) подземных выработок с карьерным пространством, что в условиях длительного действия отрицательных температур приводит к попаданию холодного воздуха в выработку, обледенению ее контуров, замораживанию коммуникаций водоснабжения, усложнению работы горных машин и снижению комфортности. При ведении ПГР возможно частичное обрушение пород с бортов карьера, разрушение целиков над выработками выпуска под действием динамического удара обрушившихся пород [7]. Достаточно опасным является и действие возникающей при этом воздушной волны [8].

В условиях отработки рудных тел месторождения проблема изоляции ПГР технологически наиболее просто решается путем создания предохранительного слоя (“подушки”) из предварительно отбитой и не выпускаемой руды. Возможен вариант образования предохранительной подушки одновременно за счет разрыхленной (взорванной) руды и пустых пород. Основная характеристика подушки — ее толщина, которая должна определяться по факторам динамического удара обрушающихся пород, возникающей при этом ударной воздушной волны, предотвращения аэродинамической связи между ПГР и карьерным пространством, термоизоляции ПГР [9]. Отдельная задача — взаимное согласование способа формирования предохранительной подушки с порядком и технологией отработки подкарьерных запасов.

В соответствии с решениями по доработке карьера, над центральной частью ЗРТ на дне карьера (отм. –320 м) создан навал из вскрышных пород объемом 2368 тыс. м³ (высотой до 60 м), перекрывающий 65 % площади рудного тела. Краевые части ЗРТ (35 %) перекрыты рудой, отбитой из нижних уступов карьера. Таким образом, на начало отработки подкарьерных запасов над ЗРТ практически создана рудо-породная предохранительная подушка (рис. 1).

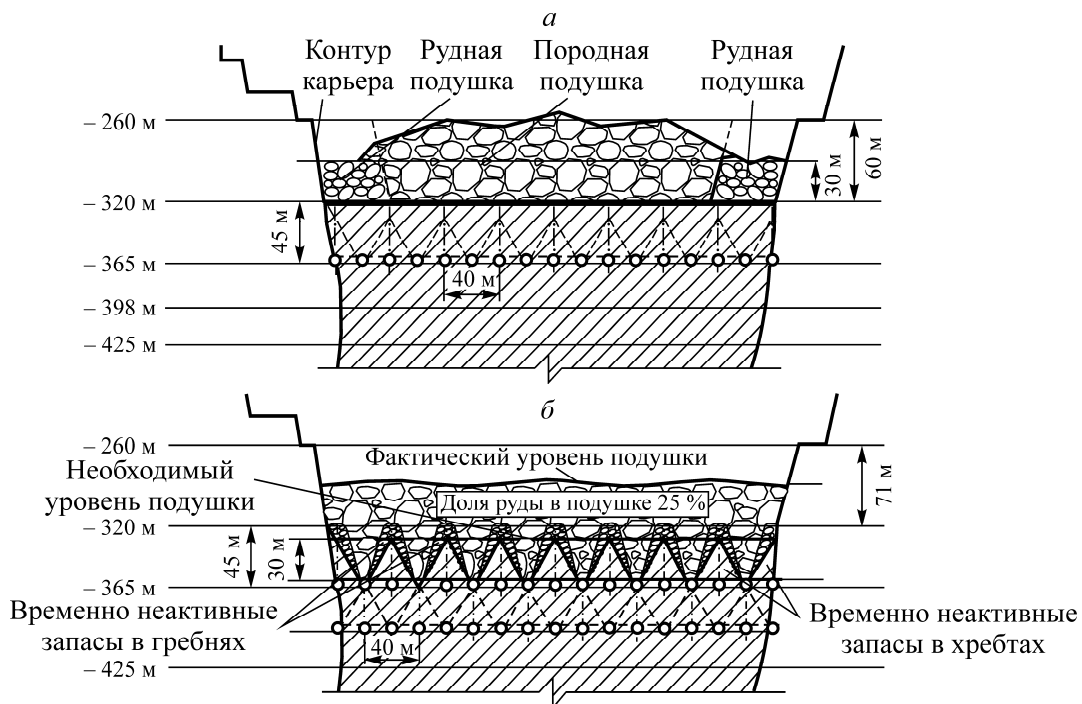


Рис. 1. Формирование предохранительной рудо-породной подушки на различных этапах отработки ЗРТ: а — до начала отработки подкарьерных запасов (положение навала пустой породы на дне карьера); б — на конец отработки подэтажа –320/–365 м

Сходство условий отработки ЗРТ и ВРТ дает основание для одинакового подхода к определению толщины подушки. Под предохранительной подушкой понимается минимально необходимый слой оставляемой руды или породы над горизонтом выпуска каждого этажа (подэтажа). Поэтому при отработке этажа слой выпускаемой руды всегда будет больше предохранительной подушки. За толщину предохранительной подушки принимается толщина минимального слоя отбитой руды или породы над кровлей выпускных и доставочных выработок горизонта выпуска, обеспечивающая безопасные условия труда на этом горизонте и в целом по подземному руднику. Так как поддержание ровной верхней поверхности подушки практически неосуществимо, то верхней границей подушки необходимо считать горизонтальную плоскость по самой низкой точке ее поверхности. Очевидно, что с понижением горных работ толщина предохранительной подушки увеличивается.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОЙ ПОДУШКИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ УДАРЕ ОБРУШАЮЩИХСЯ ПОРОД

Расчетная схема для определения динамического воздействия падающих пород построена исходя из следующих исходных положений (рис. 2).

1. В качестве защищаемых выработок приняты выработки горизонта выпуска, над которыми находится рудная или породная подушка толщиной $h_{под}$.

2. Высота нижних уступов над дном карьера принята 100 м. Толщина падающего слоя определяется разностью между углом разрыва (трещинообразования) и углом обрушения, равной 15° .

3. По условию максимально сильного удара принято допущение, что слой породы при падении не теряет своей сплошности и падает на горизонтальную поверхность подушки. Фактически данный слой не сохраняет своей сплошности, но воздействие на подушку падения раздробленных пород будет всегда меньше, чем воздействие падения сплошной плиты оторвавшегося слоя.

4. Минимальный расчетный угол сдвижения во вмещающих породах по всему периметру рудных тел в условиях полной подработки принят $\delta_p = 65^\circ$, угол разрывов $\delta_p'' = 70^\circ$, угол обрушения $\nu = 85^\circ$ [1].

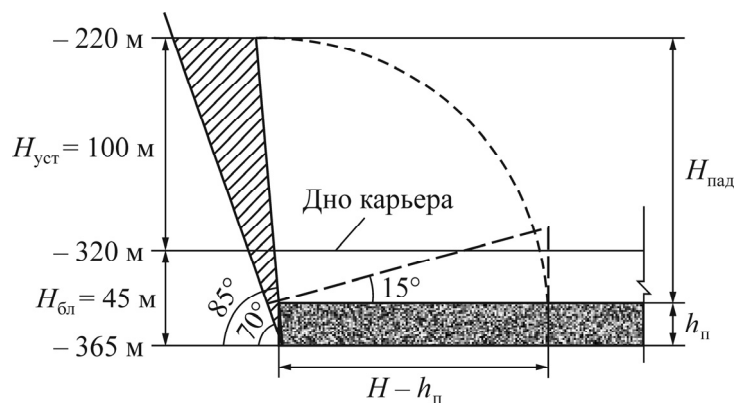


Рис. 2. Расчетная схема обрушения нижнего уступа карьера на основание блока 1 (гор. -365 м): $H_{уст}$ — высота уступов; $H_{пад}$ — толщина падающего слоя; $H_{бл}$ — высота добычного блока

При выполнении расчета используется метод коэффициента постели (гипотеза Винклера) [10], что дает возможность рассматривать действие на подушку падения выделенного “столба” высотой h_c с площадью основания 1 м^2 . Энергия падения $W_{п}$ (Дж) зависит от высоты падения и массы падающей породы, а сопротивлением воздуха при падении породного слоя можно пренебречь [11, 12]. Тогда

$$W_{\text{п}} = MgH_{\text{п}},$$

где M — масса падающего слоя пород, кг; g — ускорение свободного падения, м/с^2 ; $H_{\text{п}}$ — высота падения, м.

Из расчетной схемы видно, что и высота падения, и масса породы меняются по длине упавшего слоя (плиты) и являются максимальными на его конце. Действие кратковременного импульса ударной нагрузки вызывает направленное перемещение кусков породы (руды) подушки и образование ядра уплотнения. Допуская шаровидную форму ядра уплотнения в случае точечной нагрузки, можно принять, что максимум воздействия сосредоточен в точке, находящейся от конца упавшей плиты на расстоянии $h_{\text{под}}$. Из принятого условия максимальное воздействие на подушку оказывает падение “столба” породы высотой

$$h_{\text{с}} = (H_{\text{п}} - h_{\text{под}})\text{tg}15^{\circ}.$$

Энергия падающей плиты тратится на ее дробление, уплотнение подушки, тепловые и волновые потери. Согласно закону уплотняемости дискретных сред [13], относительное изменение объема пор уплотняемой среды в результате подвижки пропорционально изменению действующего давления. В соответствии с этим положением энергия уплотнения в зоне влияния удара (на 1 м^2 площади) равна [14]

$$W_{\text{уп}} = \frac{Sh_3 a_{\text{п}} \sigma_{\text{д}}^2}{4},$$

где $S = 1 \text{ м}^2$ — площадь подушки, воспринимающая удар падающей плиты; h_3 — зона поглощения энергии удара, м; $\sigma_{\text{д}}$ — динамическое давление, Па; $a_{\text{п}}$ — коэффициент пропорциональности. Безопасная величина подушки определяется по условию превышения ее толщины над зоной поглощения энергии удара: $h_{\text{под}} > h_3$. Учитывая ориентировочный характер деформационных характеристик материала подушки, для ее безопасной величины принят коэффициент запаса 1.2. Расчет безопасной толщины подушки проведен для уровней: горизонта выпуска –365 м — высота падающего слоя $H_{\text{п}} = 145$ м; горизонта выпуска –465 м — $H_{\text{п}} = 245$ м; горизонта –500 м — $H_{\text{п}} = 280$ м. При высоте падающего слоя больше 280 м его верхняя часть упадет на противоположный борт. Исходя из этого, удар обрушившегося слоя на нижележащие горизонты –565 и –665 м будет таким же, как и на гор. –500 м. Результаты расчетов представлены на рис. 3 и в табл. 1.

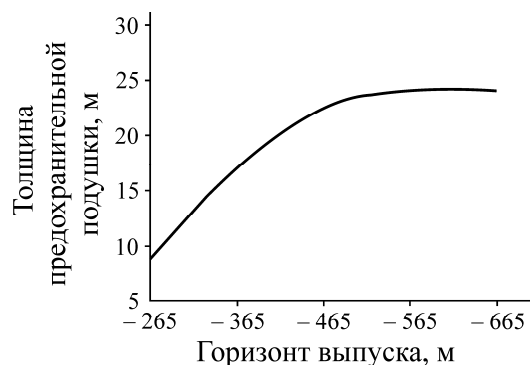


Рис. 3. Толщина предохранительной подушки по фактору динамического удара обрушившихся пород

ТАБЛИЦА 1. Энергия уплотнения и высота зоны поглощения энергии удара породами подушки при динамическом ударе обрушившихся пород борта карьера

Толщина подушки, м	$W_{\text{п}}$	$W_{\text{уп}}$	h_3 , м
	тыс. кДж		
Высота падающего слоя от горизонта выпуска 145 м (гор. – 365 м)			
10	124.4	49.7	14.5
15	115.3	46.1	14.2
20	106.6	42.6	13.9
30	90.2	36.1	13.3
40	75.2	30.1	12.7
Высота падающего слоя от горизонта выпуска 245 м (гор. – 465 м)			
10	376.8	150.7	19.1
15	361.0	144.4	18.9
20	345.5	138.2	18.7
30	315.4	126.2	18.2
40	286.8	114.7	17.8
Высота падающего слоя от горизонта выпуска 280 м (гор. – 500 м)			
10	497.4	199.0	20.4
15	479.2	191.7	20.3
20	461.3	184.5	20.1
30	426.5	170.6	19.7
40	393.0	157.2	19.3

Жирным отмечена безопасная величина подушки

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОЙ ПОДУШКИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ БЕЗОПАСНОСТЬ ПО ДЕЙСТВИЮ ВОЗДУШНОЙ ВОЛНЫ ПРИ ОБРУШЕНИИ ПОРОД

Если удар от обрушения влияет на устойчивость горных выработок, то воздействие на работников, находящихся в шахте, оказывает в основном воздушная волна. Главным препятствием распространению воздушных волн при внезапных обрушениях пород служат предохранительные подушки [15]. Их параметры должны обеспечивать безопасный для людей перепад давления (до 20 кПа) и допустимую скорость движения воздуха (до 15 м/с) на выходе воздушных волн из массива подушки в подземные горные выработки. Толщина подушки определяется исходя из аэродинамического сопротивления пород подушки движению воздушного потока в режиме фильтрации. Данная методика [16] апробирована в натуральных условиях Лениногорского комбината (Республика Казахстан) и на рудниках Горной Шории.

На рис. 1 представлена расчетная схема для гор. – 365 м. Исходные положения: средняя расчетная высота падения плиты на поверхность подушки принята 75 м; максимальная ширина плиты равна хорде четверти дуги средней окружности обрабатываемых трубок на гор. – 365 м (210 м), а высота 145 м; максимальная горизонтальная площадь упавшей плиты 30 500 м². Самым опасным является падение подобной плиты с высоты: 175 м для гор. – 465 м, 275 м — для гор. – 565 м, 375 м — для гор. – 665 м.

Минимально необходимая толщина предохранительной подушки

$$h_{\text{п}} = k_1 k_2 k_3 k_4 H_{\text{пад}},$$

где k_1, k_2, k_3, k_4 — коэффициенты, учитывающие аэродинамическое сопротивление породной подушки, обрушающейся породной массы и выработок выпуска, степень изолированности подземной пустоты соответственно.

Опуская промежуточные расчеты, значения $h_{пн}$ в зависимости от $H_{пад}$ при различных средних диаметрах куска руды подушки $d_{ср}$ представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Изменение толщины предохранительной подушки (м) в зависимости от высоты падения и среднего куска руды (породы) подушки

$d_{ср}, м$	k	$H_{пад}, м$			
		75 (гор. – 365 м)	175 (гор. – 465 м)	275 (гор. – 565 м)	375 (гор. – 665 м)
0.15	0.077	5.8	13.5	21.2	28.9
0.25	0.129	9.7	22.6	35.5	48.4
0.35	0.180	13.5	31.5	49.5	67.5
0.45	0.232	17.4	40.6	63.8	87.0

Учитывая ориентировочный характер исходных данных, при определении рекомендуемой толщины предохранительной подушки следует ввести коэффициент запаса 1.2. По опыту применения систем с обрушением для отработки скальных руд наиболее вероятным средним размером куска будет 0.25 м [17].

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПРЯМЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ПОДЗЕМНЫМИ ГОРНЫМИ РАБОТАМИ И ОТКРЫТЫМ ПРОСТРАНСТВОМ КАРЬЕРА

Проветривание горных работ осуществляется нагнетательным способом по центральной схеме. При полном развитии горных работ (отработка этажей – 480/– 380 м, – 580/– 480 м) свежий воздух будет подаваться по стволам “Клетевому” и “Вентиляционно-Вспомогательному”. К рудным телам свежий воздух будет поступать по квершлагам соответствующих горизонтов, затем на горизонты выпуска и буровые горизонты; загрязненный выводиться по вентиляционным восстающим на вентиляционный горизонт – 380 м, далее по квершлагам к стволу “Скиповому” и на поверхность.

Над обрабатываемыми рудными телами будет располагаться рудная или породная предохранительная подушка, под которой проводится очистная выемка. Аэродинамическая связь горных работ с выработанным пространством карьера будет осуществляться в виде фильтрационных воздушных потоков через сыпучий материал подушки, отбитую руду очистных блоков и выработки выпуска.

С вентиляционной точки зрения предохранительную подушку можно рассматривать как перемычку, но с резко отличающимися от настоящих (бетонных, деревянных и т. д.) перемычек аэродинамическими параметрами (пропускной способностью воздуха, величиной аэродинамического сопротивления). Сопротивление фильтрующегося через подушку воздуха будет зависеть от фракционного состава пород слоя, высоты слоя, перепада давления. Тонкоизмельченный материал обладает большим сопротивлением, а следовательно, большим изолирующим свойством. Увеличение толщины слоя также обеспечивает большее сопротивление.

При нагнетательном способе проветривания и условии равенства температур воздуха в подземных выработках и карьерном пространстве исходящий воздух будет удаляться по вентиляционным выработкам гор. – 380 м. При разности температур появляется дополнительный,

наряду с вентиляторами главного проветривания (ГВУ), побудитель движения воздуха — тепловая депрессия, называемая естественной тягой. Она по величине и по направлению действия в разные периоды года разная и зависит от температур поступающего и исходящего воздуха, разности высотных отметок устьев воздухоподающих стволов и выдающих выработок.

В самом простом случае вентиляционную систему рудника можно рассматривать в виде двух столбов воздуха (воздухоподающие стволы и столб воздуха, равный глубине карьера), соединенных горизонтальными выработками. В летний период (при условии, что ГВУ не работает) вес столба воздуха в стволах будет больше, чем в карьере. В этом случае естественная тяга может быть подсчитана по формуле

$$h_e = 0.0047H(t_k - t_{ст}),$$

где H — высота столба воздуха (глубина карьера или ведения горных работ), м; t_k , $t_{ст}$ — температура воздуха в карьере и стволе соответственно, °С; 0.0047 — коэффициент, показывающий соотношение между температурой и плотностью воздуха.

Увеличивающаяся высота карьерного столба воздуха приводит к росту естественной тяги. Например, при ведении горных работ на гор. –365 м при средней температуре воздуха в карьере в июле +12.3°С и в стволах +5.1°С $h_e = 24.2$ даПа, а на гор. –465 м — $h_e = 26.0$ даПа.

В зимний период столб воздуха в карьере будет иметь большой вес, что обусловлено (при условии, что ГВУ не работает) поступлением холодного воздуха из карьера в шахту и выходом его через стволы. Так, при средней температуре в карьере в январе –27.5°С и в стволах 0°С при работах на гор. –365 м $h_e = -92.4$ даПа, на гор. –465 м — $h_e = -105.3$ даПа. Проектом предусмотрен подогрев воздуха в зимний период до +2°С.

В табл. 3 приведены результаты расчетов значений и направлений действия естественных тяг при разных глубинах отработки месторождения и температурах наружного воздуха. Видно, что естественная тяга для рудника “Удачный” достаточно значима, особенно при максимальных отрицательных и положительных температурах и соразмерна с величиной подпора, создаваемого ГВУ.

ТАБЛИЦА 3. Значение естественных тяг по среднемесячной температуре при ведении горных работ, даПа

Температура	Гор. –365 м, $H=715$ м	Гор. –465 м, $H=815$ м	Гор. –565 м, $H=915$ м	Гор. –665 м, $H=1015$ м
Средняя холодного периода –22.2°С	–74.6	–86.6	–98.9	–117.8
Средняя за максимально холодную пятидневку –48°С	–161.3	–185.4	–209.9	–240.9
За максимально холодный день –54°С	–181.5	–208.4	–235.7	–269.5
Средняя теплого периода +6.5°С	21.8	23.4	24.5	19.0
За максимально теплый день +35°С	117.6	132.5	147.1	155.0

В холодный период года (7 мес.) естественная тяга противодействует работе ГВУ и может дезорганизовать как участковую, так и общешахтную вентиляцию. При системах с обрушением для ограничения влияния естественных тяг используются следующие мероприятия: засыпка выработанного пространства карьера кусковым материалом; изоляция отработанных подземным способом участков месторождения глухими перемычками; применение нагнетательного общешахтного проветривания с режимами работы ГВУ, позволяющими противодействовать естественным тягам.

Увеличение сопротивления выработанных карьерных пространств путем их засыпки не обеспечивает требуемого результата [18, 19]. Засыпка мелкой породой (размер частиц до 15 мм) с добавкой песка и глины с последующим заиливанием дает определенный эффект при толщине слоя не менее 10 м в сочетании с другими мероприятиями. Изоляция отработанных участков перемычками может рассматриваться как способ регулирования воздухораспределения на рабочем горизонте, позволяющий повысить коэффициент доставки воздуха к рабочим блокам [20, 21]. Установка перемычек в эксплуатационных выработках практически невозможна, поэтому действие тяги из карьера в шахту сохранится через очистное пространство и выпускные отверстия.

Наиболее действенным способом уменьшения естественной тяги является создание подпора ГВУ на эксплуатационном горизонте. Для предотвращения поступления холодного воздуха из карьера ГВУ должны создавать депрессию на эксплуатационных горизонтах не менее значений h_e , показанных в табл. 4 для холодного периода.

ТАБЛИЦА 4. Необходимое количество воздуха для предотвращения естественных тяг из карьера при $t_k = -50^\circ\text{C}$, $\text{м}^3/\text{с}$

Показатель	Толщина подушки, м						
	10	20	30	40	50	60	70
Горизонт – 365 м, $h_e = -168.0$ дПа	648	458	374	324	290	265	245
Горизонт – 465 м, $h_e = -193.0$ дПа	1389	982	802	694	621	567	525
Горизонт – 565 м, $h_e = -218.5$ дПа	1478	1045	853	739	661	603	559
Горизонт – 665 м, $h_e = -250.5$ дПа	1583	1119	914	791	708	646	598

Наличие предохранительной подушки как дополнительного аэродинамического сопротивления R способствует увеличению депрессии вентилятора, но добиться такой же величины, что и естественная тяга, только за счет подушки в реальных условиях сложно. При увеличении толщины подушки задача исключения поступления в выработки холодного воздуха под действием тяги несколько облегчается, но фильтрация сохранится и в целом картина воздухораспределения останется прежней.

Для введения в расчеты вентиляционных сетей слоя сыпучего материала как вентиляционной ветви необходимы данные об аэродинамическом сопротивлении подушки. При оценке фильтрации воздуха через кусковой материал должны учитываться следующие факторы: удельный вес и вязкость воздуха; пористость среды; форма и характер поверхности кусков; эквивалентный диаметр каналов в слое; режим движения; степень проявления сил вязкости и инерции; скорость течения и т. д. Учесть все параметры в единой аналитической зависимости сложно, поэтому относительно точные результаты можно получить только экспериментальным путем.

В [21] показано, что удельное сопротивление слоя сыпучей руды или породы из смеси фракций 0–300 мм (сопротивление 1 м^2 подушки при 10 м толщины слоя) составляет $0.0018 \text{ Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^8$. В большинстве случаев фракции 0–300 мм занимают в общем объеме руды отбитой руды 75–85%, причем доля мелких кусков (0–100 мм) более 50%. При таком грансоставе наличие крупных фракций практически не влияет на аэродинамическое сопротивление.

Поскольку аэродинамическая связь осуществляется через погрузочные заезды, можно допустить площадь фильтрации равной суммарной площади действующих заездов. При отработке гор. –365 м и одновременной работе четырех погрузочных заездов суммарная площадь их будет 67.6 м^2 . При толщине подушки 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 м соответственно R составит 0.0004, 0.0008, 0.0012, 0.0016, 0.0020, 0.0024, 0.0028 $\text{Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^8$. При работах на гор. –465, –565 и –665 м количество действующих заездов 8, их суммарная площадь 135.2 м^2 , тогда при толщине подушки 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 м соответственно R составит 0.0001, 0.0002, 0.0003, 0.0004, 0.0005, 0.0006, 0.0007 $\text{Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^8$.

Реальным путем уменьшения негативного влияния естественной тяги в холодный период является создание ГВУ постоянного подпора (давления) в выработках эксплуатационного горизонта, равного или большего, чем величина тяги. В этом случае необходимо подавать по воздухоподающим выработкам количество воздуха, равное тому, которое поступило бы в шахту из карьера при отключенной ГВУ, и исчисляемое как $Q = \sqrt{h_e / R}$ (м³/с). Соответствующие расчеты проведены для горизонтов выпуска подземного рудника при температуре атмосферного воздуха в карьере $t_k = -50^\circ\text{C}$ (средней температуре за максимально холодную пятидневку) (табл. 4).

Рациональная толщина предохранительной подушки будет такой, при которой требуемое для предотвращения тяги через подушку количество воздуха сопоставимо с необходимым количеством воздуха для проветривания эксплуатационных горизонтов рудника. В соответствии с принятыми проектными решениями выделено пять периодов проветривания рудника с показателями, представленными в табл. 5.

ТАБЛИЦА 5. Сводные результаты расчета проветривания рудника

Период проветривания	Потребное количество воздуха, м ³ /с	Депрессия, даПа	
		Лето	Зима
I (гор. – 365 м)	333.2	405.2	421.0
II (гор. – 365 м, – 465 м)	504.1	452.2	486.7
III (гор. – 465 м)	495.6	470.2	494.9
IV (гор. – 465 м, – 565 м)	494.6	471.6	500.8
V (гор. – 565 м)	500.6	484.8	511.4

Сопоставление данных табл. 4 и 5 по необходимому количеству воздуха показало, что рациональная толщина предохранительной подушки над горизонтом выпуска – 365 м равна 30 м, гор. – 465 м — 45 м, гор. – 565 м — 55 м. Учитывая, что в первом и втором периоде проветривания выдача загрязненного воздуха будет происходить по штольням гор. – 170 и – 190 м, целесообразно над горизонтом – 398 м оставить предохранительную подушку толщиной 35 м. При отработке этажа – 580/– 680 м необходимое количество воздуха для проветривания рудника по аналогии с вышележащими этажами можно принять 500–510 м³/с. В таком случае толщина предохранительной подушки над горизонтом выпуска – 665 м может быть равной 65 м.

ТЕРМОИЗОЛЯЦИЯ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

Мощность криолитозоны с отрицательными температурами в районе трубки “Удачная” — 810–1050 м. Ниже этих глубин прослеживаются положительные температуры с градиентом повышения на каждые 100 м в среднем 0.6–0.8^oC. Глубина годового теплообмена зависит от условий теплообмена горных пород с атмосферой. Оттайка пород в августе-сентябре достигает максимального значения около 1.5 м. В зимний период температура на подошве талого слоя опускается до – 17^oC.

Подкарьерные запасы трубки “Удачная” представляют собой переохлажденный массив вследствие влияния низких температур. В бортах карьера мощность слоя годовых колебаний температур изменяется от 20 до 30 м. Термоизоляция ППР зависит от наличия между открытым пространством карьера и подземными выработками раздробленных пород подушки. Степень термоизоляции определяется переносом тепла как через породы подушки, так и потоком проходящего через подушку воздуха.

Теплопроводность горных пород, в том числе и кимберлитов, в массиве невелика. Температурный режим горного массива трубки на различных глубинах в большей степени обусловлен не теплофизическими свойствами пород и руд, а переносом тепла дренирующими рассолами. Так, на глубоких горизонтах карьера в зимнее время наблюдается повышение температуры по сравнению с температурой на поверхности на 3–4°С за счет выноса тепла дренирующими водами [22].

В случае предохранительной подушки существенное влияние оказывает разрыхленность складывающихся ее руд или пород. Благодаря малой теплопроводности находящегося в порах подушки воздуха, ее теплоизоляционные свойства будут выше, чем горного массива [23–25]. При толщине подушки 30 м, что соответствует максимальной мощности слоя годовых колебаний температуры в бортах карьера [22, 26], термоизоляция ПГР будет достаточно надежной.

Рекомендуемая толщина предохранительной подушки, необходимая для обеспечения безопасности подземных горных работ на руднике “Удачный”, приведена в табл. 6.

ТАБЛИЦА 6. Необходимая толщина подушки в зависимости от действия различных факторов

Фактор	Необходимая толщина подушки, м				
	Гор. – 365 м	Гор. – 398 м	Гор. – 465 м	Гор. – 565 м	Гор. – 665 м
Действие удара обрушившихся пород	17	19	27	36	45
Действие воздушной волны при обрушении пород	12	15	27	43	58
Предотвращение ААС подземных выработок с карьерным пространством	30	33	45	55	65
Термоизоляция подземных горных работ	30	30	30	30	30
Рекомендуемая толщина подушки, м	30	35	45	55	65

ВЫВОДЫ

Основной характеристикой предохранительной подушки является ее толщина над горизонтом выпуска. Наиболее значимым фактором, определяющим необходимую толщину подушки, является аэродинамическая связь подземных выработок с карьерным пространством через слой обрушенной руды или породы.

Для рудника “Удачный” при использовании систем с массовым обрушением руды минимальная необходимая толщина предохранительной подушки над горизонтом выпуска растет с увеличением глубины горных работ от 30 м (гор. – 365 м) до 65 м (гор. – 665 м). В процессе отработки добычных блоков слой руды над горизонтом выпуска всегда будет больше необходимой толщины предохранительной подушки, что надежно обеспечивает безопасность горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов И. В., Смирнов А. А., Антипин Ю. Г., Барановский К. В. Рациональная конструкция траншейного днища для выпуска руды при отработке переходной зоны подземного рудника “Удачный” // ФТПРПИ. — 2013. — № 1. — С. 106–117.
2. Бондаренко И. Ф., Хон В. И., Никитин Р. Я., Васильев А. В. Особенности ведения БВР на этапе доработки сверхглубокого кимберлитового карьера “Удачный” // Взрывное дело. — 2014. — № 111/68. — С. 132–144.
3. Бондаренко И. Ф., Жариков С. Н., Зырянов И. В., Шеменев В. Г. Буровзрывные работы на кимберлитовых карьерах Якутии. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2017. — 172 с.
4. Коваленко А. А., Тишков М. В. Оценка подземного способа отработки месторождения трубки “Удачная” с применением системы с самообрушением // ГИАБ. — 2017. — № 4. — С. 117–128.

5. **Соколов И. В., Антипин Ю. Г., Никитин И. В.** Принципы формирования и критерий оценки геотехнологической стратегии освоения переходных зон рудных месторождений подземным способом // ГИАБ. — 2017. — № 9. — С. 151–160. doi: 10.25018/0236-1493-2017-9-0-151-160.
6. **Волков Ю. В., Соколов И. В.** Оптимизация подземной геотехнологии в стратегии освоения рудных месторождений комбинированным способом // Горн. журн. — 2011. — № 11. — С. 41–44.
7. **Савич И. Н., Насибуллин Н. Н.** К вопросу о формировании предохранительной подушки при подземной разработке кимберлитовых руд // ГИАБ. — 2004. — № 3. — С. 209–210.
8. **Соколов И. В., Смирнов А. А., Антипин Ю. Г., Кульминский А. С.** Отработка подкарьерных запасов трубки “Удачная” в сложных климатических, горно- и гидрогеологических условиях // Горн. журн. — 2011. — № 1. — С. 63–66.
9. **Волков Ю. В., Смирнов А. А., Соколов И. В., Антипин Ю. Г., Чаговец Г. А.** Предохранительная подушка при комбинированной разработке кимберлитового месторождения // Комбинированная геотехнология: комплексное освоение и сохранение недр земли: тр. междунар. науч.-техн. конф., г. Екатеринбург, 2009. — Магнитогорск: МГТУ, 2011. — С. 34–44.
10. **Снитко Н. К.** Статическое и динамическое давление грунтов и расчет подпорных стенок. — Л.: Стройиздат, 1970. — 207 с.
11. **Покровский Г. И., Федоров С. М.** Возведение гидротехнических земляных сооружений направленным взрывом. — М.: Стройиздат, 1971. — 216 с.
12. **Черниговский А. А.** Расчет зарядов при массовых взрывах на выброс. — М.: Недра, 1976. — 319 с.
13. **Цытович Н. А.** Механика грунтов. — М.: Высш. шк., 1983. — 288 с.
14. **Падуков В. А., Антоненко В. А.** Способ оценки влияния взрыва, величины подвижки и уплотнения магазинированной руды при отбойке в зажиме // Физика и технология разработки рудных месторождений в Заполярье. — Л.: Наука, 1967. — С. 35–41.
15. **Именитов В. Р., Абрамов В. Ф., Меркулов А. Н.** К расчету необходимой толщины породной подушки при возможных внезапных массовых обрушениях пород // Горн. журн. — 1969. — № 7. — С. 7–10.
16. **Именитов В. Р., Попов В. В.** Определение параметров предохранительной подушки над выпускными выработками // Горн. журн. — 1973. — № 10. — С. 24–26.
17. **Шубин Г. В., Заровняев Б. Н., Бондаренко И. Ф., Курилко А. С.** Натурные исследования сыпучих свойств руд и вскрышных пород для их использования при создании предохранительной “подушки” на дне карьера “Удачный” АК “АЛРОСА” // Горн. журн. — 2015. — № 4. — С. 15–19.
18. **Куликов В. П.** Исследование аэродинамической связи вентиляционных горизонтов с поверхностью на Высокогорском руднике: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Свердловск, 1960. — 18 с.
19. **Куликов В. П.** Пути улучшения общешахтного проветривания рудников // Колыма. — 1962. — № 12. — С. 26–28.
20. **Ярцев В. А.** Проблемы проветривания рудных шахт с аэродинамически активными обрушениями: дис. д-ра техн. наук. — Свердловск, 1967. — 168 с.
21. **Токмаков В. В.** Выбор энергетически обоснованного способа проветривания шахт с аэродинамически активными обрушениями: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Свердловск, 1968. — 23 с.
22. **Дроздов А. В.** Захоронение дренажных рассолов в многолетнемерзлых породах (на примере криолитозоны Сибирской платформы). — Иркутск: ИГТУ, 2007. — 296 с.
23. **Ржевский В. В., Новик Г. Я.** Основы физики горных пород. — М.: Недра, 1984. — 359 с.
24. **Справочник по рудничной вентиляции / под ред. К. З. Ушакова.** — М.: Недра, 1977. — 328 с.
25. **Заровняев Б. Н., Шубин Г. В., Курилко А. С., Хохолов Ю. А.** Прогноз температурно-влажностного состояния предохранительной подушки при отработке подкарьерных запасов руды в условиях криолитозоны // Горн. журн. — 2016. — № 9. — С. 33–36.
26. **Заровняев Б. Н., Шубин Г. В., Васильев И. В., Курилко А. С., Каймонов М. В.** Специфика комбинированной доработки глубоких алмазных трубок в условиях криолитозоны // ГИАБ. — 2012. — № 7. — С. 189–195.

Поступила в редакцию 19/XII 2017