
© Е.А. Разумов, В.А Еременко, Д.Ф. Заятдинов,
А.С. Матвеев, П.В. Гречишкін, А.С. Позолотин,
2013

УДК 622.831; 622.2; 622.235

**Е.А. Разумов, В.А Еременко, Д.Ф. Заятдинов,
А.С. Матвеев, П.В. Гречишкін, А.С. Позолотин**

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ АНКЕРНОЙ КРЕПИ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

На основе методических расчетов и экспериментальных исследований предложена двухуровневая схема анкерного крепления подготовительных выработок в вечномерзлых породах. Для обеспечения устойчивости приконтурных слоев выработки, снижения оттаивания и расслоения горных пород рекомендовано применять при перетяжке кровли помимо металлической решетчатой затяжки базальтовый утеплитель.

Ключевые слова: шахта, вечная мерзлота, анкерная крепь, подготовительные выработки, кровля выработки, перетяжка кровли.

Введение

Больше половины территории Российской Федерации находится в условиях криолитозоны, характеризующейся наличием в верхней части земной коры отрицательных температур (до -15°C) с возможностью существования льда в областях изотермической нижней границы (0°C) и глубиной промерзания до 1500 м от земной поверхности. В данных районах сосредоточены запасы ценных руд: золота, урана, меди, молибдена, цинка, палладия, алмазов, редкоземельных металлов, оптического кварца, угля, железа и др. Например, разведанные запасы золота, для отработки подземным способом, составляют 56 %. Добыча ценных руд в зоне многолетней мерзлоты подземным способом ведется по устаревшим проектам, в основном системами разработки с магазинированием руды, различными вариантами камерных и столбовых систем с потерями руды в недрах до 20 % и разубоживанием до 50 % в сложных горнотехнических и

горно-геологических условиях. Актуальным остается вопрос совершенствования технологий разработки угольных месторождений и способов поддержания подготовительных выработок в условиях вечной мерзлоты.

Оценка физико-механических свойств мерзлых пород

Анализ эксплуатации горных выработок в районах Севера показывает, что поддержание крепи в устойчивом состоянии зависит от температурного поля породного массива. При сохранении в мерзлом состоянии горных пород вокруг выработки условия обеспечения устойчивости более благоприятные, чем при оттаивании этих пород. Это объясняется цементирующим действием замерзшей воды в порах и трещинах, которая соединяет трещиноватые породы в монолитный массив, обеспечивая повышенную прочность мерзлых пород. При оттаивании льда нарушается связность, ослабевает сцепление отдельных кусков, блоков мерзлых пород. Вследствие этого изменяются

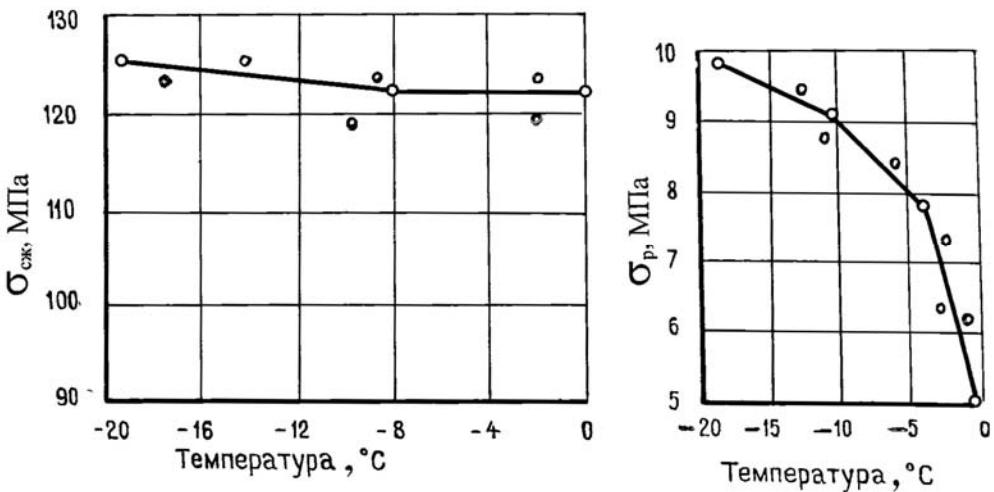


Рис. 1. Изменение предела прочности многолетнемерзлых песчаников на сжатие (а) и растяжение (б) в зависимости от температуры

прочностные и деформационные свойства горных пород в массиве [1].

Для выявления физической зависимости влияния температурного фактора на процессы разрушения многолетнемерзлых пород и пылеобразования проведены исследования физико-механических свойств в условиях отрицательной температуры: предел прочности на сжатие и растяжение, коэффициенты хрупкости, абразивности и динамической проч-

ности. Результаты исследований приведены на рис. 1, 2.

Анализ полученных данных (рис. 1) показывает, что физико-механические свойства многолетнемерзлых горных пород существенно зависят от их температуры. Так, если предел прочности песчаников при сжатии $\sigma_{cск}$ мало зависит от температуры пород, то предел прочности на растяжение σ_p значительно возрастает с понижением температуры. Поскольку $\sigma_{cск}$ при этом остается практически неизменным, коэффициент хрупкости пород $\sigma_p/\sigma_{cск}$ также значительно увеличивается.

При понижении температуры многолетнемерзлых пород от 0 до -8°C на 40-50 % возрастает их хрупкость, динамическая прочность и абразивность (рис. 2). Изменения прочности кварцитовых песчаников от температуры объясняется изменением содержания в них незамерзшей влаги и образованием

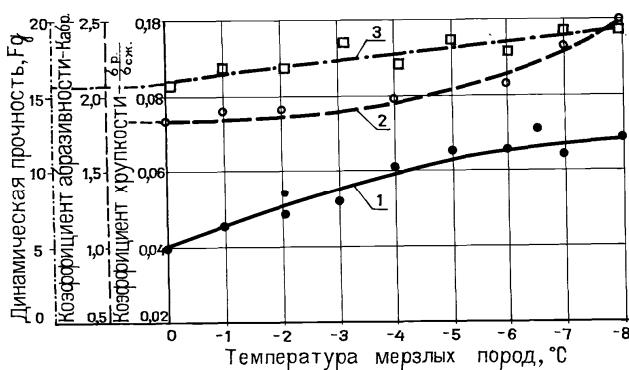


Рис. 2. Влияние отрицательной температуры на хрупкость (1), абразивность (2), динамическую прочность (3) кварцевых песчаников

напряжений, возникающих при замерзании гравитационной воды при понижении температуры. Анализ условий ведения подземных горных работ в криолитозоне показывает, что запыленность воздуха в горных выработках прямо или косвенно связана с температурным режимом окружающего мерзлого горного массива. Многолетняя мерзлота существенно изменяет динамику процесса и влияет на интенсивность пылевыделения и дисперсный состав продуктов разрушения. На основании математической обработки результатов экспериментальных исследований получена эмпирическая зависимость интенсивности пылеобразования при различных процессах горного производства в зависимости от температуры многолетнемерзлых пород [1].

В традиционных упруго-пластичных моделях зону пластичных деформаций принимают равной размеру зоны протаивания вокруг горной выработки. Это справедливо при небольшой глубине протаивания многолетнемерзлых пород, характерной для выработки с естественным (нерегулируемым) тепловым режимом. При положительном тепловом режиме глубина протаивания вокруг выработки значительно превышает размеры зоны пластичных деформаций.

Теплоизоляционные материалы и их характеристика

Поддержание горных выработок с помощью теплоизоляционных материалов является эффективным способом при условии работы теплоизоляции в горных выработках и выборе соответствующих материалов для данных условий: отрицательная температура горных пород, высокая влажность движущегося по выработке воздуха, неустойчивость оттаявших пород и пород с температурами, близкими нулю и длительный срок

эксплуатации выработок. Второстепенное влияние на выбор теплоизоляционных материалов оказывают неровности теплоизолируемой поверхности, пространственная стесненность при нанесении или укреплении теплоизоляции, а также пожароопасность некоторых угольных шахт.

Отрицательная температура горных пород и высокая влажность воздуха при его положительной температуре способствует конденсации влаги на поверхности изоляции, особенно при длительной эксплуатации выработок. Наличие даже незначительных следов влаги в материале (до 3-5 %) ухудшают его теплофизические свойства, так как теплопроводность воды в 25 раз больше теплопроводности воздуха. При эксплуатации выработок в течение 20 лет сохранение постоянных свойств теплопроводности затрудняется.

Опыт применения в холодильной промышленности теплоизоляционных материалов на основе органических вяжущих веществ показывает, что теплофизические свойства большинства теплоизоляционных материалов сохраняются в течение 25-28 лет. Поэтому при теплоизоляции горных выработок следует ориентироваться на современные полимерные теплоизоляционные материалы, сочетающие в себе высокие теплоизоляционные свойства с хорошими эксплуатационными характеристиками. Использование водостойких, не гигроскопичных и паронепроницаемых теплоизоляционных материалов позволяет упростить и удешевить конструкции.

Для достижения низкой гигроскопичности и надежной паронепроницаемости традиционных теплоизоляционных материалов (стеклянная и минеральная вата, древесноволокнистые плиты, цементный фибролит, ячеистые бетоны и др.), необходимо устраивать дополнительные пароизо-

Таблица 1
Характеристика пенопластов

Наименование	Марка пенопласта ПСБ и ПСБ-С (с антипиреном)		
Марка	15	25	35
Плотность, кг/м ³	до 15	от 15 до 25	от 25,1 до 35
Теплопроводность в сухом состоянии, Вт/мК	0,042	0,039	0,037
Водопоглощение в течение суток относительно объема не более, %	3,0	2,0	2,0
Прочность на сжатие при 10% линейной деформации, МПа	0,05	0,1	0,16
Само затухающий материал	Время горения не более 3 секунд		
Предел прочности на изгиб, МПа	0,07	0,18	0,25
Пенопласт ПСБ-С белый, достаточно жесткий, состоящий из сплавившихся гранул, биологически безопасен, устойчив к воздействию влаги, старению, не подвержен воздействию вредных микроорганизмов, цена 2300 руб/м ² (2013 г.).			

Таблица 2
Характеристика базальтового утеплителя

Параметры	Значение
Теплопроводность	$\lambda_{10} = 0,036 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ $\lambda_{25} = 0,037 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$
Группа горючести	НГ
Класс пожарной опасности	КМ0
Водопоглощение при частичном погружении	не более 1,0 кг/м ²
Модуль кислотности	не менее 2,0
Изготовленный на основе базальтовых пород по уникальной технологии базальтовый утеплитель отличается рядом положительных свойств: высокие теплозащитные свойства; негорючесть (класс пожарной опасности КМ0); способность не впитывать влагу; устойчивость к деформациям; паропроницаемость; экологичность; не разрушается при действии теплосмен "нагрев-охлаждение", при повышении температуры и циклическом действии температуры сохраняет свои характеристики и геометрические формы; срок службы материалов из базальтового волокна в несколько раз выше, чем изделий из минеральной ваты и достигает 30-40 лет; цена 2500 руб/м ² (2013 г.).	

ляционные слои, подвергать специальной обработке поверхности, обертывать теплоизоляцию водонепроницаемыми пленками из синтетических материалов. При этом дополнительные сложные и дорогостоящие мероприятия полностью исключаются при использовании для теплоизоляции материалов на полимерной основе.

Вышеперечисленные способы теплоизоляции в условиях многолетней мерзлоты успешно применяются с материалами с закрытой пористостью. Исключается появление при низких температурах конвекции в теплоизо-

ляционном слое и создается сопротивление диффузии водяного пара из окружающего воздуха [2].

При повышении температуры многолетнемерзлых пород, устойчивость выработок снижается, и в кровле возникают значительные нагрузки на крепь. Технические характеристики пенопластов представлены в табл. 1 и базальтового утеплителя в табл. 2.

Применение теплоизоляции значительно снижает затраты на поддержание и ремонт горных выработок, пройденных в многолетнемерзлых породах и подвергающихся, сезонному или постоянному воздействию воздуха с положительной температурой. Подтверждением этого факта служит аналитическое определение глубины ореола оттаивания пород вокруг выработки пройденной в песчаниках без изоляции и с изоляцией ее поверхности.

Аналитический расчет глубины ореола оттаивания пород вокруг выработки проводится по формуле Ф.Я. Новикова [3]

$$\Delta R_{OTT} = \frac{R_0^{0.14} \cdot t^{0.48} \cdot \lambda_{\Pi}^{0.43} \cdot \tau_{OTT}^{0.43}}{-T_0^{0.05} \cdot (0.8 \cdot W_{\Pi} \cdot \gamma)^{0.43}}, \text{ м} \quad (1)$$

где R_0 – эквивалентный радиус выработки, м; λ_{Π} – теплопроводность пород, ккал/м·град; τ_{OTT} – время оттаивания, час; T_0 – температура массива пород, град; W_{Π} – влажность пород, %; γ – объемный вес пород, т/м³; t – температура воздуха, град.

При применении теплоизоляционных материалов значительное влияние на уменьшение ореола оттаивания оказывает изменение эффективной теплопроводности массива, так как возможное изменение эквивалентного радиуса выработки R_0 из-за уменьшения поперечного сечения S не превышает 2 – 3 %.

Эквивалентный радиус выработки определяется по формуле

$$R_0 = 0.564 \cdot \sqrt{S}, \text{ м} \quad (2)$$

где S – сечение выработки, м².

Величина ореола оттаивания вокруг выработки с применением теплоизоляционных материалов определяется по формуле

$$\Delta R_{OTT}^{uz} = \Delta R_{OTT} \left(\frac{\lambda_{\phi}}{\lambda_{\Pi}} \right)^{0.43}, \text{ м.} \quad (3)$$

Величина эффективной теплопроводности массива сложного строения рассчитывается по формуле

$$\lambda_{\phi} = \frac{6\lambda_{\Pi}\lambda_{uz}}{\lambda_{\Pi}b_{uz} + \lambda_{uz}(6 - b_{uz})}, \text{ ккал/м·град} \quad (4)$$

где λ_{uz} – коэффициент теплопроводности изоляции, ккал/м·град; b_{uz} – толщина изоляции, см.

Технико-экономические результаты исследований подтверждают эффективность применения базальтового утеплителя для теплоизоляции горных выработок в шахтах.

Опыт поддержания подготовительных выработок в многолетнемерзлых породах

Как показывает многолетний опыт поддержания подготовительных выработок в шахте «Джебарики – Хая» в Якутии, оттаивание пород вокруг контура выработки в летнее время при подаче теплого воздуха, достигает 0,5 м. В массиве между зоной оттаивания и зоной многолетнемерзлых пород происходит значительное снижение прочностных показателей массива горных пород, более чем в 4 раза. Расчетная схема выбора параметров анкерной крепи опытного участка показана на рис. 3.

Прочностные характеристики горных пород основной кровли (мелко-зернистый песчаник, алевролиты слоистые) определенные в шахте, составляют: $\sigma_{сж} = 35–40$ МПа, $\sigma_p = 2,8–5$ МПа. Полученные характеристики свидетельствуют о том, что для рассматриваемых условий прочность вмещающих горных пород соответствует регламентируемой для области применения анкерной крепи.

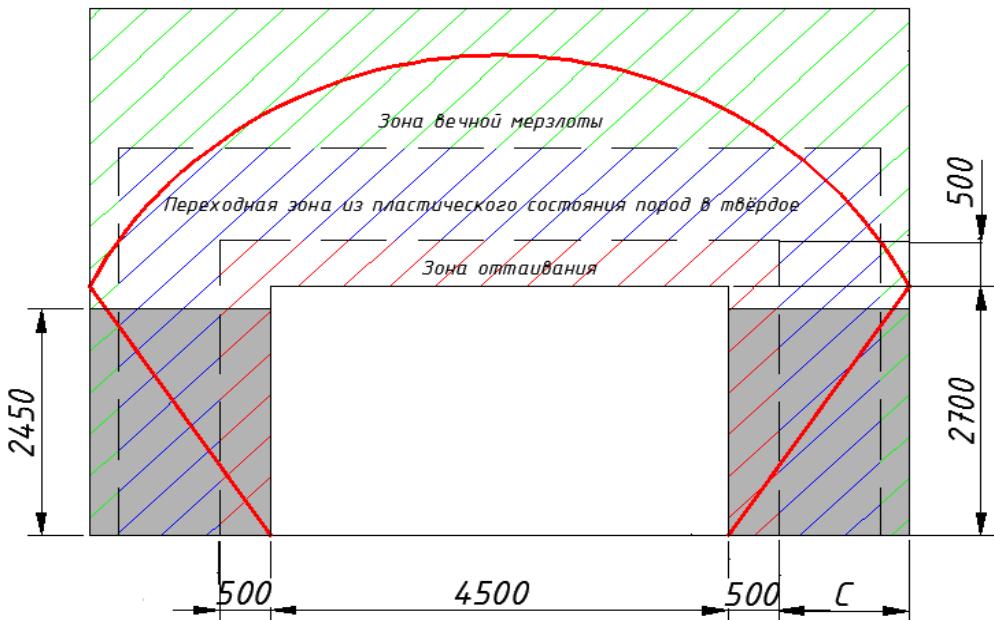


Рис. 3. Расчетная схема для определения параметров анкерной крепи выработки:
C – глубина возможного отжима из боков выработки; B – высота свода естественного равновесия

Расчетный метод для определения анкерной крепи

Прогнозная ширина отжима угля в боках сбойки определяется из выражения [4, 5]

$$C = h \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{90^\circ + \beta_\delta}{2} \right), \text{ м} \quad (5)$$

где β_δ - угол внутреннего трения горных пород в боках выработки, вне зоны влияния очистных работ ($\beta_\delta = 38^\circ$), град.; h - высота выработки, с учетом зоны оттаивания, м.

Средневзвешенный коэффициент крепости пород кровли на ширину выработки определяется по формуле

$$f_{cp.636} = \frac{(m_1 f_1 + m_2 f_2 + m_n f_n \dots) K_c}{B}, \quad (6)$$

где K_c - коэффициент снижения прочности [6]; m_1 - зона оттаивания,

$m_2 \dots m_n$ - мощность зоны мерзлых пород, м; B - ширина выработки, м; f_1 - коэффициент крепости пород по шкале проф. М.М. Протодьяконова в зоне оттаивания; $f_2 \dots f_n$ - коэффициент крепости пород по шкале проф. М.М. Протодьяконова в зоне мерзлых пород.

Высота возможного вывала пород непосредственной кровли определяется из выражения

$$b = \frac{a}{f_{cp.636}}, \text{ м} \quad (7)$$

где: a - полупролет выработки с учетом отжима угля с боков, м

$$a = \frac{B}{2} + C, \text{ м.} \quad (8)$$

Ожидаемая нагрузка на 1 погонный метр крепи горной выработки определяется из выражения

$$P_{ож} = \frac{4}{3} \cdot a \cdot b \cdot \gamma, \text{ кН/м} \quad (9)$$

где γ – объемный вес пород непосредственной кровли kH/m^3 .

Удельная нагрузка на 1 м^2 сопряжения определяется по формуле

$$P_{y\delta} = \frac{P_{ож}}{B}, \text{ кН/м}^2. \quad (10)$$

Длина анкеров первого уровня для крепления кровли выработки рассчитывается по формуле

$$l_{к.а} = b + l_3 + l_e, \text{ м} \quad (11)$$

где $l_3 = 1,1 \text{ м}$ – минимальная глубина закрепления анкера в шпуре, за сводом ожидаемого вывала пород непосредственной кровли; $l_e = 0,1 - 0,2 \text{ м}$ – длина выступающей в выработку части анкера.

Шаг установки крепи по плотности установки определяется по формуле

$$C_k = \frac{n_k}{\Pi \cdot B}, \text{ м} \quad (12)$$

где n_k – количество анкеров в ряду (принимается согласно «Инструкции ...» [5], исходя из плотности установки не менее 1 анк/м), шт.; B – ширина выработки в проходке, м.

Выбор параметров канатных анкеров глубокого заложения

Выбор параметров канатных анкеров глубокого заложения выполняется на основании расчета с использованием основных положений теории свода давления.

Прогнозируемая глубина отжима угля из боков выработки в зоне опорного давления от выемочного участка определяется по формуле [4, 5].

$$l^1 = h \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{90^\circ + \beta_o}{2}\right), \text{ м} \quad (13)$$

где h – высота выработки, м; β_o – угол внутреннего трения угля в боках

выработки, в зоне опорного давления ($\beta_o = 32^\circ$), град.

Высота возможного свода обрушения пород непосредственной кровли, в зоне опорного давления, определяется из выражения [5, 6]

$$b^1 = \frac{a^1}{f_{cp.63} \cdot K_{c.o.3}}, \text{ м} \quad (14)$$

где a^1 – полупролет выработки с учетом отжима угля с боков, м; $K_{c.o.3}$ – коэффициент снижения прочности в зоне опорного давления от лавы [7]

$$a^1 = \frac{B}{2} + (C^1 + 0,5), \text{ м.} \quad (15)$$

Ожидаемая нагрузка на один погонный метр крепи горной выработки определяется из выражения [5]

$$P_{ож.}^1 = \frac{4}{3} \cdot a^1 \cdot b^1 \cdot \gamma, \text{ кН/м.} \quad (16)$$

Удельная нагрузка на крепь выработки определяется по формуле

$$P_{y\delta}^1 = \frac{P_{ож.}^1}{B}, \text{ кН/м}^2. \quad (17)$$

Количество канатных анкеров, для усиления крепи кровли сбойки рассчитывается по формуле [8]

$$n_{к.а} = \frac{P_{ож.}^1}{N_{a.k}}, \text{ шт.} \quad (18)$$

где $N_{a.k}$ – расчетная несущая способность канатного анкера, МПа.

Расчетная длина канатных анкеров определяется по формуле [3]

$$l_{к.а.} = K_3 (b^1 + l_3 + l_e), \text{ м} \quad (19)$$

где K_3 – коэффициент запаса прочности; l_3 – минимальная глубина закрепления анкера в шпуре, м; l_e – длина выступающей в выработку части анкера, м.

Анкеры первого уровня АКМ и второго уровня АК01 устанавливаются

Таблица 3

Техническая характеристика анкеров АКМ и АК01

Анкер комбинированный АКМ 20.01-02		
Наименование	Значение	
Диаметр шпура, мм	27 – 45	
Длина стержня анкера, мм	550 – 350	
Длина резьбовой части не менее, мм	170	
Расчётная несущая способность, тс	13	
Разрывное усилие, кН (тс).	160 (16)	
Рекомендуемая величина предварительного натяжения, тс	1	
Достоинства: качественное разрушение ампул опорной спиралью и высокоэффективное перемешивание закрепляющего материала за счёт ребристой структуры груzonесущего стержня; повышенная несущая способность; длинная резьбовая часть повышает удобство при установке и эксплуатации анкерной крепи.		
Канатный анкер АК01		
Длина закрепляющей втулки, не менее, мм	110	
Расчетная несущая способность, кН	210	
Относительное удлинение анкера при нагрузке 210 кН, не более, %	1,3	
Прочность соединения гайки с муфтой, не менее, кН	270	
Рекомендуемая величина предварительного натяжения анкера, кН	10	
Диаметр груzonесущего стержня, мм	15,2	
Длина муфты с резьбой, мм	120	
Шаг резьбы, мм	11	
Область применения: крепление капитальных и подготовительных подземных горных выработок, сопряжений, монтажных и демонтажных камер, сопряжений лавы с подготовительными выработками без использования механизированной крепи сопряжения, сохраняемых выработок и т.д.		
Является эффективным для крепления выработок в сложных горно-геологических условиях: высокие тектонические напряжения; в зонах проявления горного давления под целиками и краевыми частями на сближенных пластиах; горные выработки, ранее закрепленные анкерной или рамной крепью.		

Таблица 4

Технические характеристики ампулы АМК

Наименование	АМК 400	АМК 630
Длина, мм	400	630
Диаметр, мм	23; 32; 36; 40	23; 32; 36; 40
Время замачивания, с	12 – 60	12 – 60

на ампулы с минеральной композицией (АМК), для исключения оттаивания пород вокруг стержня анкера [9 - 14]. Технические характеристики анкеров АКМ и АК01 представлены в табл. 3 и ампулы (АМК) в табл. 4.

Выводы

Применение эффективных теплоизоляционных материалов в сочета-

нии с анкерами первого и второго уровня, закрепляемых на ампулы с минеральной композицией для крепления подземных горных выработок в условиях многолетнемерзлых пород обеспечивает безаварийный режим их поддержания и эксплуатации, безопасность и повышает производительность горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондарь И.А. Повышение эффективности и безопасности технологии подземной разработки // Автореф. на соиск. уч. степ. кан. техн. наук. Чита: Читинский государственный университет, 2006. – 23 с.
2. Авксентьев И.В., Скуба В.Н. Исследование устойчивости и теплоизоляция горных выработок в условиях многолетней мерзлоты. - ЦНИЭИуголь, 1975. – 44 с.
3. Скуба В.Н. Совершенствование разработки угольных месторождений области многолетней мерзлоты. – Якутск: Якутское книжное издательство, 1974. – 317 с.
4. Штумпф Г.Г., Рыжков Ю.А., Шаламанов В.А., Петров А.И. Физико-механические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна. – М.: Недра, 1994. – 447 с.
5. Инструкция по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах России.- СПб., 2000. – 70 с.
6. Механика горных пород (Под ред. проф. П.М. Цимбаревич). – Москва: 1943, УГЛЕТЕХИЗДАН. – 184 с.
7. Методика расчета и выбора параметров крепи на сопряжениях горных выработок при одинарной и парной подготовке выемочных столбов (М-во пром-сти и энергетики РФ. РАН. ФГУП «Гос. Науч-исслед. ин-т горн. геомех. и маркшейд. дела – Межотраслевой научный центр ВНИМИ). – СПб., 2004. – 84с.
8. Еременко В.А., Разумов Е.А., Заятдинов Д.Ф., Позолотин А.С., Прохватилов С.А., Красилов С.Ю. Совершенствование двухуровневой технологии анкерного крепления широких сопряжений горных выработок // ГИАБ. — 2013. — № 5. — С. 20-29.
9. Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах СССР. – Ленинград, ВНИМИ, 1986. – 120 с.
10. ТУ 3142-001-00974883-2007. Анкер канатный АК01 и АК02. – г. Кемерово. Изготовитель ООО «РАНК 2».
11. Калинин С.И., Лютенко А.Ф., Егоров П.В., Дьяконов С.Г. Управление горным давлением при разработке пологих пластов с труднообрушаемой кровлей на шахтах Кузбасса. – Кемерово: Кемеровское книжное издательство, 1991. – 248 с.
12. Широков А.П., Писляков Б.Г. Расчет и выбор крепи сопряжений горных выработок. – М.: Недра, 1978. – 304 с.
13. Еременко В.А., Разумов Е.А., Заятдинов Д.Ф. Современные технологии анкерного крепления // ГИАБ. — 2012. — № 12.— С. 38-45.
14. Инструкция по безопасному ведению горных работ на шахтах, разрабатывающих угольные пласти, склонные к горным ударам (РД 05-328-99-69) /1999 г.– 120 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Разумов Евгений Анатольевич – технический директор ООО «РАНК 2», razum29@yandex.ru, 8-906-920-43-67;

Еременко Виталий Андреевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ИПКОН РАН, eremenko@ngs.ru, 8-926-279-39-08;

Заятдинов Дамир Фанисович – заместитель технического директора ООО «РАНК 2», rank2009@yandex.ru, 8-905-907-19-31;

Матвеев Андрей Сергеевич – специалист по анкерному креплению ООО «РАНК 2», rank2009@yandex.ru, 8-951-165-23-24;

Гречишkin Павел Владимирович – кандидат технических наук, директор по научной работе ООО «РАНК 2», исполнительный секретарь экспертного совета «КУЗБАССКИЙ ТЕХНОПАРК», rv_grechishkin@mail.ru, 8-923-508-98-56;

Позолотин Александр Сергеевич – кандидат технических наук, директор по перспективному развитию ООО «РАНК 2», pozalex@mail.ru, 8-903071-18-81.

