

УДК 622.281.4.001.24

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ АНКЕРНОГО КРЕПЛЕНИЯ
ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК УГОЛЬНЫХ ШАХТ
В УСЛОВИЯХ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ**

Е. А. Разумов¹, В. И. Клишин², Г. Ю. Опрук², П. В. Гречишкин²

¹ООО “РАНК 2”, E-mail: kom.info@rank42.ru,
Советский проспект, 7, 650000, г. Кемерово, Россия
²Институт угля СО РАН, E-mail: klishinvi@icc.kemsc.ru,
Ленинградский проспект, 10, 650065, г. Кемерово, Россия

Представлена методическая база для расчета двухуровневой анкерной крепи подземной горной выработки, проводимой в многолетнемерзлых породах. Проведен анализ результатов применения анкерной крепи в сочетании с теплоизоляцией контура выработки на экспериментальном участке в условиях шахты “Джебарики-Хая”.

Анкерная крепь, горная выработка, зона многолетней мерзлоты, ореол оттаивания, теплопроводность массива, теплоизоляционный материал

В последние годы изучению условий разработки и совершенствованию способов крепления и поддержания горных выработок на угольных шахтах в области многолетней мерзлоты уделяется большое внимание. Это объясняется повышением требований к обеспечению нормальных условий труда горнорабочих, развитием технологии, механизации, эффективности добычи угля на Севере.

При оценке природных условий разработки угольных месторождений установлено, что мерзлотное состояние породного массива может оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие на уровень безопасности, эффективность крепления и поддержание подземных горных выработок. На состояние крепления выработок влияют: отрицательная температура пород, наличие в их составе льда, заполняющего пустоты, циркуляция подземных вод в таликовых зонах, мерзлотные физико-геологические процессы.

Результаты исследования мерзлотно-гидрогеологических условий угольных месторождений показали, что для принятия решения по креплению планируемых к проведению горных выработок необходимо исходить из температурного состояния массива пород, в которых расположено полезное ископаемое. При этом исходными критериями являются прочностные свойства массива, его гидрогеологическая характеристика и газовая обстановка.

В 1970-х гг. проводились промышленные испытания металлической, деревянной и железобетонной анкерной крепи на всех шахтах Норильского комбината. Установлено, что эффективность применения анкерной крепи обеспечивается в подготовительных выработках всех работающих пластов при закреплении анкеров в угле, углистых, песчанистых, глинистых аргиллитах, песчаниках и изверженных породах [1]. Прочностные характеристики и несущая способность металлических, деревянных и железобетонных штанг обуславливает эффективность их использования в подготовительных выработках всех температурных зон.

Опыт внедрения сталеполимерных анкеров на шахтах Кузбасса сделал анкерную крепь практически безальтернативной для поддержания подземных горных выработок в различных горно-геологических условиях [2, 3]. Однако применение современной сталеполимерной анкерной крепи в шахтах, в которых идет отработка запасов угля в условиях многолетней мерзлоты, осложнено по следующим причинам:

— при температуре воздуха -10°C скорость отверждения смолы полимерных ампул примерно в 10 раз меньше, чем при положительной температуре $+20^{\circ}\text{C}$ [4];

— установку анкеров необходимо осуществлять до остывания стенок шпура, разогретых вследствие бурения;

— срок хранения полимерных ампул составляет 6 мес с момента выпуска при температуре не выше $+20^{\circ}\text{C}$;

— рекомендуемая температура применения полимерных ампул составляет $+20^{\circ}\text{C}$, однако в районах многолетней мерзлоты обеспечить такие температурные условия крайне затруднительно.

Шахтные наблюдения за изменением температуры пород вокруг горных выработок показали, что в различных температурных зонах массива пород при различной среднегодовой температуре шахтного воздуха и многообразии условий отработки процесс оттаивания пород в каждом конкретном случае имеет общую закономерность — усиленное распространение тепла вглубь массива в первый период и ослабление этого процесса во времени. Интенсивно процесс оттаивания пород протекает в первые 3–4 года, затем замедляется и с течением времени глубина оттаивания за каждый последующий год становится малой в сравнении с уже имеющимися ореолами оттаивания.

Такое положение дел позволяет оценивать распределение температуры пород вокруг выработок в тот период, когда приращение глубины оттаивания и изменение температуры пород в пределах температурного поля уже незначительны и ими можно пренебречь, т.е. фактор времени практически прекращает действовать. В достаточном для практических целей приближении задачу определения распространения зоны оттаивания пород вглубь массива вокруг горных выработок можно решать как задачу распределения температур по толщине цилиндра при условии, что радиус внешней поверхности цилиндра находится в зоне, где оттаивание пород заведомо не происходит.

Уравнение теплопроводности в этом случае записывается в виде [5]:

$$\frac{d^2 t(r)}{dr^2} + \frac{l}{r} \frac{dt(r)}{dr} = 0, \quad r_0 < r < r_n, \quad (1)$$

где $t(r)$ — функция распределения температур по радиусу r ; r_0 — радиус выработки, м; r_n — радиус внешней стенки цилиндра, м.

Краевые условия:

$$t(r_0) = t_b = \text{const}; \quad t(r_n) = t_n = \text{const},$$

здесь t_b — температура воздуха, град; t_n — естественная температура пород, град.

Решение стационарного уравнения теплопроводности хорошо известно [5], а в рассматриваемом случае можно получить приближенную формулу для ее определения:

$$t = t_b - \frac{t_b - t_n}{\ln(r_n / r_0)} \ln(r / r_0). \quad (2)$$

Рассчитанные значения температуры пород вокруг выработок по формуле (2) имеют хорошую сходимость с результатами, полученными в шахтных условиях.

Негативное влияние положительной температуры шахтной атмосферы на устойчивость кровли горных выработок, пройденных по породам, имеющим отрицательную температуру, можно снизить, применяя различного рода теплоизоляционные покрытия. В 1970-х гг. активно прорабатывались варианты поддержания горных выработок анкерной крепью при использовании полимерных теплоизоляционных материалов, в частности пенополистирола [6]. Однако из-за таких недостатков, как хрупкость, горючесть, малая гибкость, неудобство при монтаже, пенополистиролы не получили широкого применения на шахтах.

В настоящее время существует ряд теплоизоляционных материалов, свободных от указанных недостатков, которые могут обеспечить изоляцию приконтурных пород горных выработок и минимизировать их оттаивание. Применение современной теплоизоляции позволит значительно снизить параметры ореола оттаивания вмещающих пород выработок, а следовательно, нагрузку на крепь.

Величину ореола оттаивания можно определить по формуле Ф. Я. Новикова [1]:

$$\Delta R_{\text{отт}} = \frac{R_0^{0.14} t^{0.48} \lambda_{\text{п}}^{0.43} \tau_{\text{отт}}^{0.43}}{-T_0^{0.05} (0.8W_{\text{п}}\gamma)^{0.43}},$$

где R_0 — эквивалентный радиус выработки, м; $\lambda_{\text{п}}$ — теплопроводность пород, ккал/(м·град); $\tau_{\text{отт}}$ — время оттаивания, ч; T_0 — температура массива пород, град; $W_{\text{п}}$ — влажность пород, %; γ — объемный вес пород, т/м³; t — температура воздуха, град. Эквивалентный радиус выработки находится по формуле [1]: $R_0 = 0.564\sqrt{S}$, где S — сечение выработки, м².

При использовании теплоизоляционных материалов существенное влияние на уменьшение ореола оттаивания оказывает изменение эффективной теплопроводности массива. Величина ореола оттаивания с применением теплоизоляционных материалов для кровли и бортов выработки рассчитывается следующим образом:

$$\Delta R_{\text{отт}}^{\text{из}} = \Delta R_{\text{отт}} \left(\frac{\lambda_{\text{эф}}}{\lambda_{\text{п}}} \right)^{0.43}.$$

Величина эффективной теплопроводности массива сложного строения может быть определена как [1]

$$\lambda_{\text{эф}} = \frac{6\lambda_{\text{п}}\lambda_{\text{из}}}{\lambda_{\text{п}}b_{\text{из}} + \lambda_{\text{из}}(6 - b_{\text{из}})},$$

где $\lambda_{\text{из}}$ — коэффициент теплопроводности изоляции; $b_{\text{из}}$ — толщина изоляции.

В ООО “РАНК 2” предложена методика расчета анкерной крепи подземной горной выработки, пройденной в зоне многолетней мерзлоты с применением теплоизоляционного материала.

Расчет параметров анкерной крепи первого уровня. Величина возможного разрушения (отжима угля) боков выработки [7]:

$$C = h \operatorname{ctg}\left(\frac{90^\circ + \beta_6}{2}\right),$$

где β_6 — угол внутреннего трения горных пород в боках выработки, вне зоны влияния очистных работ, град; h — высота выработки, с учетом зоны оттаивания, м.

Средневзвешенный коэффициент крепости пород кровли пласта по шкале Протодяконова рассчитывается по формуле [6]:

$$f_{\text{ср.взв}} = \frac{(m_{11}f_{11} + \dots + m_{1n}f_{1n} + m_{21}f_{21} + \dots + m_{2m}f_{2m})K_c}{B},$$

здесь K_c — коэффициент снижения прочности; $m_{11} \dots m_{1n}$ — мощности слоев пород в зоне оттаивания, м; $m_{21} \dots m_{2m}$ — мощности слоев мерзлых пород, м; B — ширина выработки, м; $f_{11} \dots f_{1n}$ — коэффициенты крепости пород в зоне оттаивания; $f_{21} \dots f_{2m}$ — коэффициенты крепости пород в зоне мерзлых пород.

Высота свода естественного равновесия пород кровли вне зоны влияния очистных работ [7]:

$$b_1 = \frac{a}{f_{\text{ср.взв}}},$$

где a — полупролет выработки с учетом возможного разрушения (отжима угля) боков выработки, м.

Ожидаемая нагрузка на один погонный метр (кН/п.м) крепи горной выработки [7]:

$$P_{\text{ож}} = \frac{4}{3} ab_1 \gamma, \quad (3)$$

γ — объемный вес пород непосредственной кровли.

Удельная нагрузка на 1 м² горной выработки определяется по формуле

$$P_{\text{уд}} = \frac{P_{\text{ож}}}{B}. \quad (4)$$

Длина анкеров первого уровня для крепления кровли выработки:

$$L_{\text{а.к}} = b_1 + l_3 + l_{\text{в}},$$

где l_3 — минимальная глубина закрепления анкера в шпуре; $l_{\text{в}} = 0.1 - 0.2$ м — длина выступающей в выработку части анкера.

Шаг установки крепи по плотности установки:

$$C_{\text{к}} = \frac{n_{\text{к}}}{\Pi \cdot B},$$

где $n_{\text{к}}$ — количество анкеров в ряду (принимается согласно Инструкции [8], исходя из плотности установки (Π) не менее 1 анк./м²), шт.

Расчет параметров анкерной крепи глубокого заложения выполняется с использованием основных положений теории свода [7, 9].

Высота свода естественного равновесия пород кровли:

$$b_2 = \frac{a}{f_{\text{ср.взв}} k_c k_{\text{вл}}},$$

где k_c — коэффициент структурного ослабления [7]; $k_{\text{вл}}$ — коэффициент снижения сопротивления пород за счет воздействия влаги [10].

Ожидаемая нагрузка на один погонный метр крепи горной выработки определяется из выражения (3), удельная нагрузка на крепь выработки — по формуле (4).

Количество канатных анкеров для усиления крепи кровли горной выработки рассчитывается по формуле

$$n_{\text{к.а}} = \frac{P_{\text{ож}}}{N_{\text{а.к}}},$$

где $N_{\text{а.к}}$ — расчетная несущая способность канатного анкера АК01, МПа.

Расчетная длина канатных анкеров АК01: $l_{к.а} = K_3(b_1 + l_3 + l_B)$, где K_3 — коэффициент запаса прочности.

На основе представленной методики расчета параметров анкерной крепи разработана проектная документация для крепления штрека в горно-геологических условиях шахты “Джебарики-Хая” (рис. 1) [11]. На шахте применяется знакопеременный тепловой режим работы (зимой — отрицательный, летом — положительный). Как показали расчеты, оттаивание пород вокруг контура выработки $\Delta R_{отт}$ в летнее время, когда в шахту подается теплый воздух, может достигать 1.77 м. В зоне оттаивания происходит значительное (до 4 раз) снижение прочностных показателей.

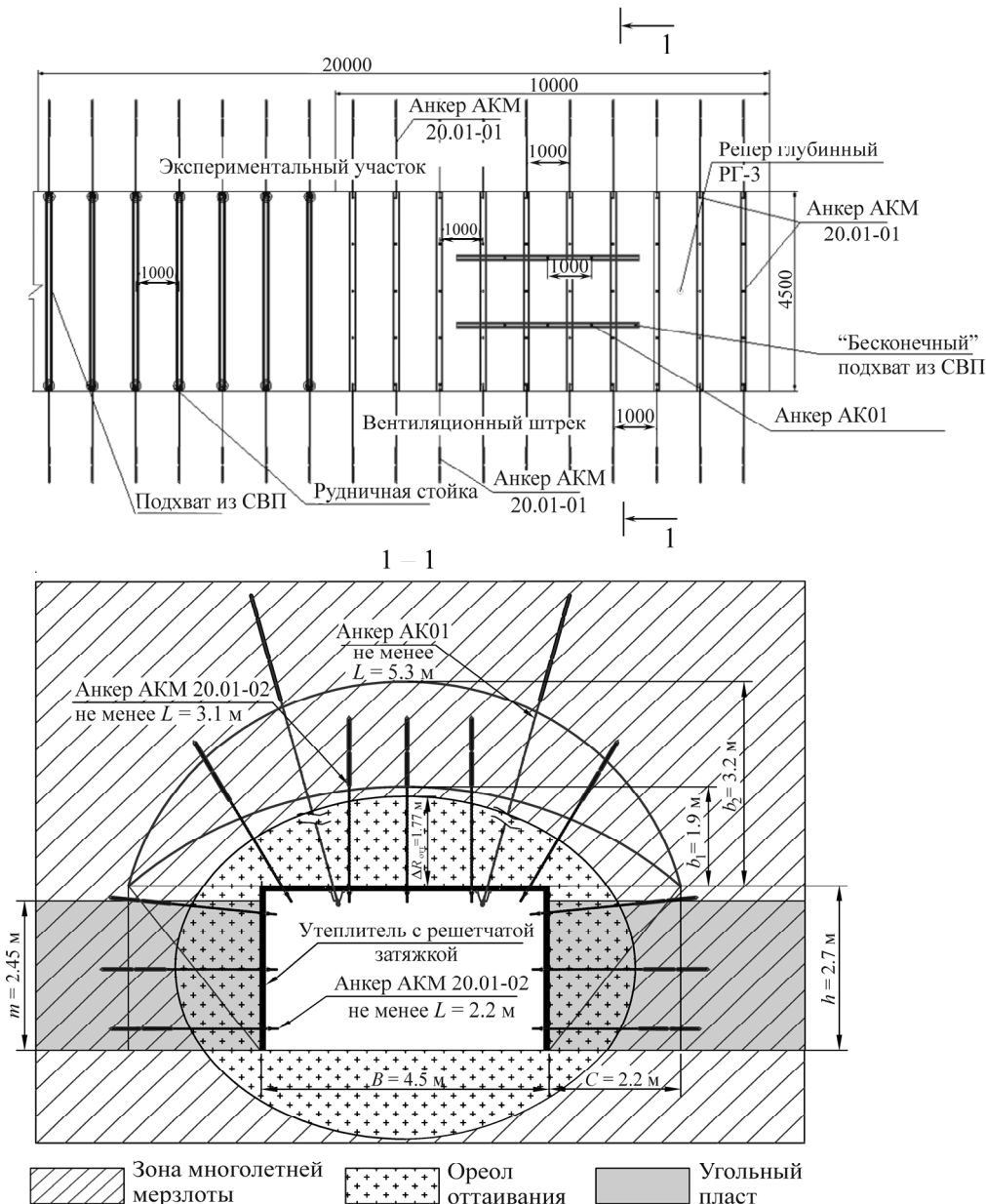


Рис. 1. Схема анкерного крепления вентиляционного штрека для условий шахты “Джебарики-Хая”

Непосредственная кровля пласта “Верхний” сложена песчаником тонкозернистым, светло-серым, трещиноватым мощностью 6 м с коэффициентом крепости по шкале Протоdjяконова в мерзлом состоянии $f = 5 - 7$. С учетом снижения прочностных свойств при оттаивании поро-

ды непосредственной кровли можно отнести по обрушаемости к III типу, а по устойчивости — к I классу [8]. Основная кровля представлена песчаником серого цвета, кварцево-попелешпатовым, цементом глинисто-кремнистым мощностью 14 м. Глубина ведения горных работ составляет 60–96,5 м.

Экспериментальный участок располагался на главном вентиляционном штреке (ПК-280). Проведены работы по установке канатных анкеров типа АК01 и комбинированных анкеров типа АКМ 20.01-01 в мерзлые породы. Анкеры устанавливались на ампулы АМК-400.

Анкер представляет собой комбинацию хвостовика из цельнолитой арматуры и грузонесущего стержня из стального прутка с особой конструкцией концевика (рис. 2). Технология установки сталеминеральной анкерной крепи представлена на рис. 3.



Рис. 2. Комбинированный анкер АКМ 20.01-01

Особенность установки сталеминеральной крепи АКМ 20.01-01 состоит в том, что первоначальное закрепление анкера происходит за счет создания предварительного натяжения (более 2,5–3 тс) при затягивании гайки. При этом за счет конструктивной особенности концевика анкера возникает клиновой эффект в забое шпура (уплотнение и распор минеральной композиции между стенками шпура и концевиком), что обеспечивает несущую способность более 3 тс сразу после установки, а также сшивку и упрочнение пород. Далее происходит отверждение закрепляющего материала и набор несущей способности крепи до паспортного значения. Ампулы типа АКМ-400 с минеральной композицией обеспечивают надежное закрепление анкеров в зоне мерзлых пород.

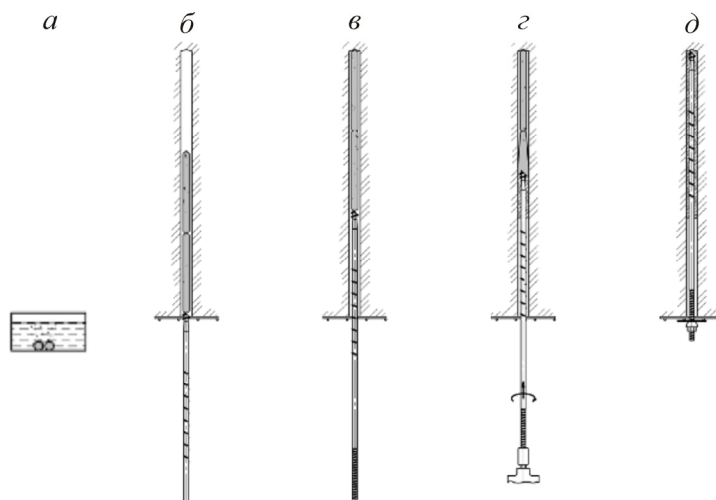


Рис. 3. Технология установки сталеминеральной анкерной крепи: *a* — предварительное замачивание ампул АМК в воде (15–20 с); *б* — установка ампул в устье шпура; *в* — досылка ампул к дну шпура; *г* — подача анкера с вращением до дна шпура; *д* — предварительное натяжение анкера

После установки крепи были проведены ее испытания на фактическую несущую способность по методике [12], которые подтвердили заявленные характеристики анкерной крепи (табл. 1) и минеральных ампул (табл. 2).

При креплении экспериментального участка в условиях шахты “Джебарики-Хая” с целью изоляции приконтурного массива горных пород от растепляющего действия вентиляционной струи использована стеклоткань. Стеклоткани химически устойчивы, не токсичны, не горючи, не

подвержены коррозии, температура их применения от -200 до $+550^{\circ}\text{C}$. Они обладают высокой стойкостью к разложению и механическому износу, поэтому материалы, произведенные на их основе, отличаются долговечностью и большим сроком службы. Благодаря хорошей теплоудерживающей способности стекла и малому коэффициенту теплопроводности стеклоткани, произошло уменьшение потока тепловой энергии в приконтурный массив на $10-15\%$.

ТАБЛИЦА 1. Технические характеристики анкеров АКМ 20.01-01, АК01

| Анкер комбинированный АКМ 20.01-01 | |
|---|----------|
| Диаметр шпура, мм | 27–45 |
| Длина стержня анкера, мм | 500–3500 |
| Длина резьбовой части, мм, не менее | 200 |
| Расчетная несущая способность, кН | 110 |
| Рекомендуемое предварительное натяжение, кН | 10 |
| Канатный анкер АК01 | |
| Расчетная несущая способность, кН | 210 |
| Относительное удлинение анкера при нагрузке 210 кН, %, не более | 1.3 |
| Прочность соединения гайки с муфтой, кН, не менее | 270 |
| Рекомендуемое предварительное натяжение анкера, кН | 10 |
| Диаметр грузонесущего стержня, мм | 15.2 |
| Длина муфты с резьбой, мм | 120 |

Гарантийный срок хранения ампул АКМ не менее 1 года при температуре от -50 до $+50^{\circ}\text{C}$. Технические характеристики ампул АКМ представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Технические характеристики ампулы АКМ

| Показатель | АМК400 | АМК600 |
|-------------|----------------|----------------|
| Длина, мм | 400 | 600 |
| Диаметр, мм | 23; 32; 36; 40 | 23; 32; 36; 40 |

По итогам мониторинга состояния опытного участка выработки в летний период, когда воздух, подаваемый в шахту, имеет плюсовую температуру, выявлено следующее:

- состояние приконтурного массива выработки (кровля, бока) удовлетворительное;
- индикаторы на реперной станции РГ-3 находятся в зеленой зоне; существенных смещений пород кровли не происходит;
- наличия трещин, проявлений горного давления в кровле и боках не наблюдается;
- вывалов пород между анкерами, отслоения приконтурных слоев кровли не зафиксировано;
- наличия пустот и трещин между подхватами и элементами анкерной крепи, уменьшение высоты и ширины выработки не обнаружено;
- провисание решетчатой металлической затяжки между подхватами отсутствует;
- деформации с изгибами или с разрывом анкерных подхватов отсутствуют;
- ослабление гаек на анкерах отсутствует.

ВЫВОДЫ

Разработана методика расчета параметров двухуровневой анкерной крепи с применением теплоизоляционных материалов в условиях многолетнемерзлых пород со знакопеременными температурами на контуре выработки.

Предложены технология установки и конструкция сталеминеральной анкерной крепи, обеспечивающие надежное закрепление анкера в многолетнемерзлых породах.

Результаты мониторинга состояния экспериментального участка на шахте “Джебарики-Хая”, использующего двухуровневую сталеминеральную анкерную крепь с изоляцией приконтурного массива, подтверждают надежность поддержания данной крепью выработки в летнее время (период оттаивания).

Эффективность работы сталеминеральной крепи открывает широкие перспективы ее применения на шахтах Севера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Скуба В. Н.** Совершенствование разработки угольных месторождений области многолетней мерзлоты. — Якутск: Кн. изд-во, 1974. — 317 с.
2. **Клишин В. И., Гречишкин П. В., Серов А. А., Разумов Е. А.** Современные технологии анкерного крепления: опыт применения и перспективы // Рудник будущего. — 2012. — Вып. № 3(11). — С. 89–96.
3. **Louchnikov V. N., Eremenko V. A., and Sandy M. P.** Ground support liners for underground mines: energy absorption capacities and costs, *Eurasian Mining (Gornyi Zhurnal)*, 2014, No. 1(21). — P. 54–62.
4. **Васильев С. Д.** Обоснование и разработка методики расчета крепления сталеполимерной анкерной крепью горных выработок для условий многолетней мерзлоты: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 2013. — 24 с.
5. **Лыков А. В.** Теория теплопроводности. — М.: Высш. шк., 1967. — 600 с.
6. **Авксентьев И. В., Скуба В. Н.** Исследование устойчивости и теплоизоляция горных выработок в условиях многолетней мерзлоты. — М.: ЦНИЭИуголь, 1975. — 45 с.
7. **Станкус В. М., Муратов В. А., Маньков В. Н., Костельцев Б. Г.** Механика горных пород и устойчивость выработок шахт Кузбасса / под ред. В. Г. Кожевина. — Кемерово: Кн. изд-во, 1973. — 345 с.
8. **Инструкция по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах России.** — СПб., 2000. — 70 с.
9. **Широков А. П., Писляков Б. Г.** Расчет и выбор крепи сопряжений горных выработок. — М.: Недра, 1978. — 304 с.
10. **Методика расчета и выбора параметров крепи на сопряжениях горных выработок при одинарной и парной подготовке выемочных столбов.** — СПб., 2004. — 84 с.
11. **Разумов Е. А., Еременко В. А., Зяятдинов Д. Ф., Матвеева А. С., Гречишкин П. В., Позолотин А. С.** Методика расчета параметров анкерной крепи подземных горных выработок в условиях вечной мерзлоты // ГИАБ. — 2013. — № 9. — С. 39–47.
12. **Методика шахтных испытаний отдельных положений “Инструкции по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах Кузбасса — Первая редакция”.** — СПб.: ВНИМИ, 2010. — 12 с.

Поступила в редакцию 8/IV 2016