

УДК 622.831

В.Ф. Демин, А.С. Смагулова, В.В. Демин

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ ГЛАВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ВЫРАБОТОК В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАЗРАБОТКИ

При металлическом рамном креплении выработки, пройденные параллельно направлению север-юг, находятся в более благоприятных условиях, чем перпендикулярные (конвергенция со стороны кровли-почвы меньше на 33%, со стороны боков на 36%, уменьшение проектного сечения на 30%). При смешанном креплении конвергенция практически равнозначна как для параллельных, так и для перпендикулярных выработок, расхождение составляет 6-7%. Однако уменьшение сечения выработок у параллельных на 16% больше. При анкерном креплении конвергенция со стороны боков выработки при параллельном ее расположении на 33% меньше, а конвергенция кровли-почвы на 17% больше, чем при перпендикулярном.

Ключевые слова: массив горных пород, напряжения, деформации, геомеханические закономерности, напряженно-деформированное состояние, горно-геологические и горнотехнические условия разработки, проведение горных выработок, виды крепления.

При металлическом рамном креплении выработки, пройденные параллельно направлению север-юг, находятся в более благоприятных условиях, чем перпендикулярные (конвергенция со стороны кровли-почвы меньше на 33 %, со стороны боков на 36 %, уменьшение проектного сечения на 30 %).

При смешанном креплении конвергенция практически равнозначна как для параллельных, так и для перпендикулярных выработок, расхождение составляет 6—7 %. Однако уменьшение сечения выработок у параллельных на 16 % больше.

При анкерном креплении конвергенция со стороны боков выработки при параллельном ее расположении на 33 % меньше, а конвергенция кровли-почвы на 17 % больше, чем при перпендикулярном.

Массив горных пород, напряжения, деформации, геомеханические закономерности, напряженно-деформированное состояние, горно-геологические и горнотехнические условия разработки, проведение горных выработок, виды крепления.

Постановка проблемы

Главные горизонтальные напряжения оказывают существенное влияние на устойчивость контуров выработок. Для анализа формы сечения и вида крепления взяты данные по металлоарочному креплению и анкерному креплению при прямоугольном сечении, так как на шахтах угольного департамента АО

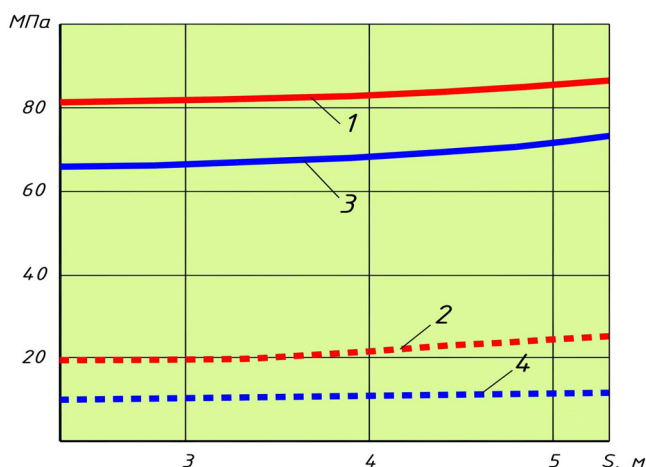


Рис. 1. Влияние мощности пласта на величину напряжений σ_1 и σ_3 , возникающих вокруг контура выработки, закрепленной металлоарочной (1 и 2) и анкерной (3 и 4) крепью

формулами 1, 2, а при анкерном креплении – 3 и 4. Зависимости приведены для Саранского участка. Коэффициенты корреляции обозначены как r .

$$\sigma_1^M(m) = 0,1 * e^{0,76 * m} + 81,1 \quad r=0,86 \quad (1)$$

$$\sigma_3^M(m) = -0,4 * m^3 + 5,2 * m^2 - 19,3 * m + 41,1, \quad r=0,92 \quad (2)$$

$$\sigma_1^a(m) = 0,21 * e^{0,69 * m} + 65,1 \quad r=0,9 \quad (3)$$

$$\sigma_3^a(m) = 1,8 * e^{0,16 * m} + 7,4, \quad r=0,87 \quad (4)$$

где σ_1^M и σ_3^M — напряжения σ_1 и σ_3 для металлоарочного крепления; σ_1^a и σ_3^a — напряжения σ_1 и σ_3 для анкерного крепления.

Значения мощности варьировались для металлоарочного — в пределах от 2,1 до 5,4м, а для анкерного – 1,5 до 5,4м. Выходные значения σ_1^M изменяются в промежутке от 81,57 до 87,1 МПа, σ_3^M — от 19,5 до 25,53 МПа. Значения σ_1^a изменяются в диапазоне от 65,7 до 74,3 МПа, σ_3^a — от 9,8 до 11,9 МПа – рис. 1.

Таким образом значение напряжения σ_1^M больше, чем σ_3^M в 3,9 раза. Значения напряжения σ_3^a при анкерном креплении почти не меняются.

«АрселорМиттал Темиртау» (Карагандинский угольный бассейн) преобладают данные формы сечения и виды крепления.

Для установления зависимостей использовался метод наименьших квадратов, программным средством корреляционного анализа являлся Mathcad 2001 Professional.

Влияние мощности пласта на напряжения в массиве

При металлоарочном креплении зависимость напряжений от мощности пласта характеризуется

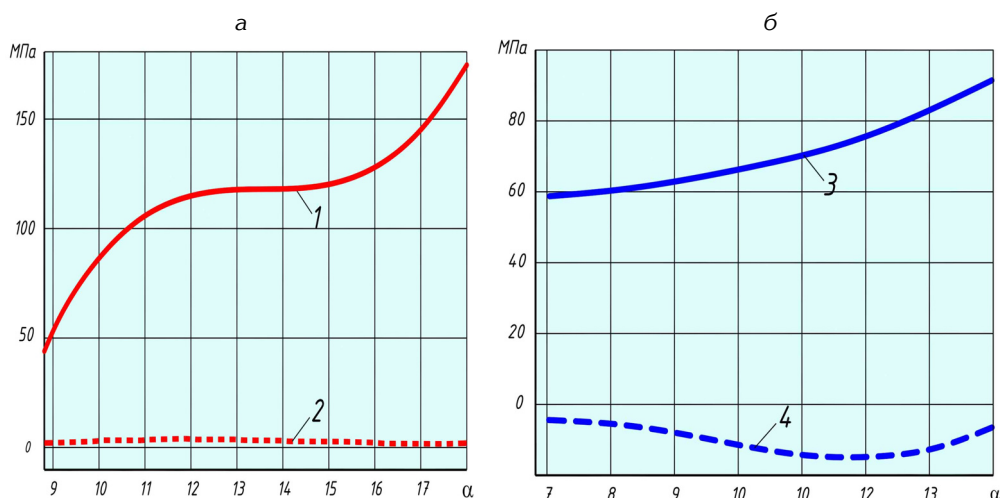


Рис. 2. Влияние угла падения пласта на величину напряжений σ_1 и σ_3 , возникающих вокруг контура выработки, закрепленной металлоарочной (а, 1 и 2) и анкерной (б, 3 и 4) крепью

Влияние угла падения пласта на напряжения в массиве

При металлоарочном креплении зависимость напряжений от угла падения пласта характеризуется формулами (5, 6) $r=0,98$, а при анкерном креплении – 7 и 8 — рис. 2.

$$\sigma_1^M(\alpha) = 0,65 * \alpha^3 - 26,5 * \alpha^2 + 360,5 * \alpha - 1518, \quad (5)$$

$$\sigma_3^M(\alpha) = 0,028 * \alpha^3 - 1,2 * \alpha^2 + 16,5 * \alpha - 69,8, \quad (6)$$

$$\sigma_1^a(\alpha) = 1,17 * e^{0,25 * \alpha} + 51,6, \quad (7)$$

$$\sigma_3^a(\alpha) = 0,19 * \alpha^3 - 5,392 * \alpha^2 + 47,4 * \alpha - 137,5, \quad (8)$$

Функции $\sigma_1^{мет}(\alpha)$, $\sigma_2^{мет}(\alpha)$, $\sigma_2^{анк}(\alpha)$ характеризуются кубическими полиномами, а функция $\sigma_1^{анк}(\alpha)$ описывается экспоненциальной функцией.

Значения угла падения пласта для металлоарочного крепления варьировались в пределах $\alpha=9,1...19,2^\circ$, а для выработок с анкерным креплением — $\alpha=7...14^\circ$. Функция $\sigma_1^{мет}(\alpha)$ — возрастающая.

Влияние глубины разработки на напряжения в массиве

При металлоарочном креплении зависимость напряжений от глубины разработки пласта характеризуется формулами (9, 10) $r=0,8$, а при анкерном креплении – 11 и 12 – рис. 3.

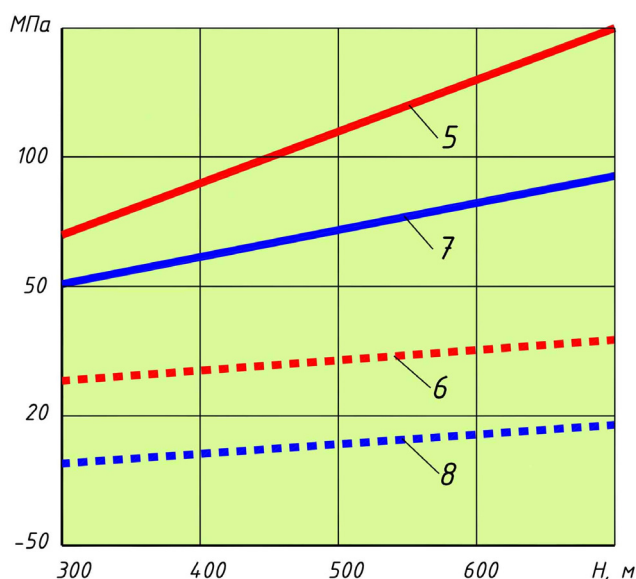


Рис. 3. Влияние глубины разработки на величину напряжений σ_1 и σ_3 , возникающих вокруг контура выработки, закрепленной металлоарочной (5 и 6) и анкерной (7 и 8) крепью

$$\sigma_1^M(H) = 9,9 + 0,2 * H, \quad (9)$$

$$\sigma_3^M(H) = 1,2 + 0,04 * H, \quad (10)$$

$$\sigma_1^a(H) = 19,9 + 0,1 * H, \quad (11)$$

$$\sigma_3^a(H) = -30,4 + 0,04 * H, \quad (12)$$

Значения глубины разработки H варьировались для металлоарочного крепления от 270 до 620 м; для анкерного крепления от 290 до 730 м.

Напряжение σ_1 при металлоарочном креплении возрастает от 64 до 134 МПа или в 2 раза, а при анкерном креплении — от 48 до 84,5 МПа или в 1,8

раза. Как видно из графика, σ_3 при металлоарочном креплении возрастает от 12 до 26,1 МПа или в 2,2 раза.

Анализ результатов наблюдений в диапазоне от 300 до 600 м показывает, что значение напряжения σ_1 при металлоарочном креплении в 1,5 раза больше, чем при анкерном креплении, что свидетельствует об устойчивости выработок [1, 2] при анкерном креплении, чем металлоарочном с ростом глубины.

Влияние размера поперечного сечения выработки на возникающие напряжения

При металлоарочном креплении зависимость напряжений от размера сечения характеризуется формулами 13, 14, а при анкерном креплении — 15 и 16 — рис. 4.

$$\sigma_1^M(s) = 9,96 * 10^{-4} * e^{0,7*s} + 65,9 \quad r=0,97 \quad (13)$$

$$\sigma_3^M(s) = -0,05 * s^3 + 1,9 * s^2 - 24,2 * s + 114,3 \quad r=0,94 \quad (14)$$

$$\sigma_1^a(s) = 0,16 * e^{0,375*s} - 61,4 \quad r=0,86 \quad (15)$$

$$\sigma_3^a(s) = 1,5 * 10^{-11} * e^{1,8*s} + 72,6 \quad r=0,82 \quad (16)$$

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что при увеличении размера сечения напряжения σ_1 вокруг контура выработок увеличиваются в случае металлоарочного и анкерного крепления.

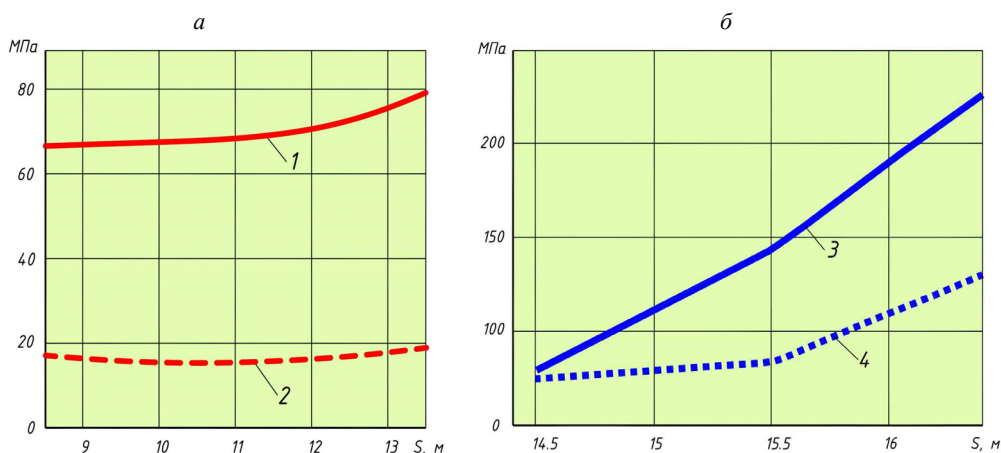


Рис. 4. Влияние размера поперечного сечения на величину напряжений σ_1 и σ_3 , возникающих вокруг контура выработки, закрепленной металлоарочной (а, 1 и 2) и анкерной (б, 3 и 4) крепью

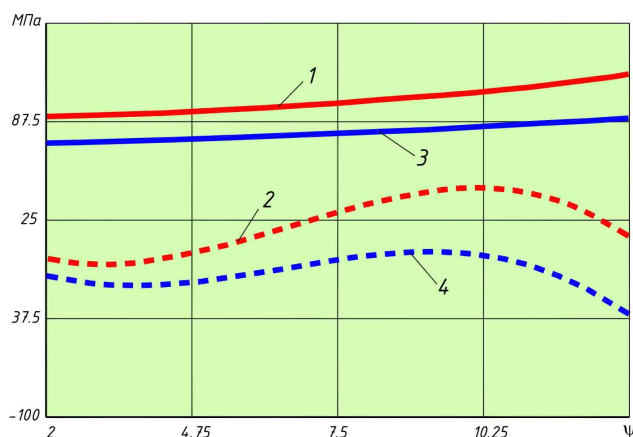


Рис. 5. Влияние угла проведения выработки на величину напряжений σ_1 и σ_3 , возникающих вокруг контура, закрепленной металлоарочной (а, 1 и 2) и анкерной (б, 3 и 4) крепью

при металлоарочном креплении (см. рис. 4, а) размер сечения в диапазоне от 8,5 до 11,5 м² оказывает незначительное влияние на значение напряжения σ_1 ($\sigma_1=66,4...70,43$ МПа). Но при увеличении размера сечения от 12,6 до 14,4 м² — напряжение σ_1 возрастает от 70 до 90 МПа или на 29 %.

Влияние угла проведения выработки на напряжения в горном массиве

При металлоарочном креплении зависимость напряжений от угла проведения выработки характеризуется формулами 17, 18, а при анкерном креплении — 19 и 20 (рис. 5), при $r=0,93$.

$$\sigma_1^M(\psi) = 7,19 \cdot e^{0,125 \cdot \psi} + 80,35 \quad (17)$$

Размер сечения при металлоарочном креплении варьировался от 8,5 м до 14,4 м², а при анкерном креплении — от 14,4 до 16,7 м². Проанализировав влияние размера сечения с общим значением ($s=14,4$ м²) при разных видах крепления установили, что значение напряжения σ_1 при металлоарочном креплении больше, чем при анкерном креплении на 16,3 МПа или на 23 %.

Анализ результатов моделирования показал, что при

$$\sigma_3^M(\psi) = -0,28 * \psi^3 + 5,4 * \psi^2 - 25,3 * \psi + 30,6 \quad (18)$$

$$\sigma_1^a(\psi) = 16,2 * e^{0.056 * \psi} + 55,4 \quad (19)$$

$$\sigma_3^a(\psi) = -0,235 * \psi^3 + 4,54 * \psi^2 - 23,55 * \psi + 19,7 \quad (20)$$

Обобщенное уравнение, учитывающее совокупное влияние факторов при анкерном креплении имеет вид ($K_{пр}$ — коэффициент пропорциональности) [3]

$$\sigma_1^a(m, H, \alpha, \psi, s) = [\sigma_1^a(m) * \sigma_1^a(H) * \sigma_1^a(\alpha) * \sigma_1^a(\psi) * \sigma_1^a(s)], \quad (21)$$

Образование полостей горных выработок неизбежно вызывает нарушение равновесия массива.

Согласно теории наибольших касательных напряжений [4], которая описывает механизм разрушения как сдвиг под действием касательных напряжений, условие прочности выглядит следующим образом:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \leq [\tau], \quad (22)$$

где σ_1 и σ_3 — максимальное и минимальное главные напряжения на площадке сдвига; $[\tau]$ — предел прочности при сдвиге.

Дальнейшее развитие эта теория получила в теории предельного равновесия, где уравнение предельного состояния представлено следующей формулой:

$$\tau \leq c + \sigma_n \operatorname{tg} \rho, \quad (23)$$

где c — сопротивление сдвигу или сцепление, МПа; ρ — угол внутреннего трения (угловой градус); σ_n — нормальное напряжение на площадке сдвига, МПа; τ — касательное напряжение на площадке сдвига, МПа.

Предельное состояние реализуется на площадках сдвига, расположенных по отношению к наибольшему напряжению σ_1 под углом $\pm \varphi$. На площадках сдвига (скольжения) имеют место соотношения:

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\varphi, \quad (24)$$

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\varphi \quad (25)$$

В общем случае для горных пород условие перехода в запредельное состояние по теории Кулона-Мора описывается выражением:

$$\tau \leq c' + \sigma_n' \operatorname{tg} \rho', \quad (26)$$

где c' — сцепление (МПа); ρ' — угол внутреннего трения материала, который в реальном массиве горных пород зависит от трещиноватости, слоистости, кливажа.

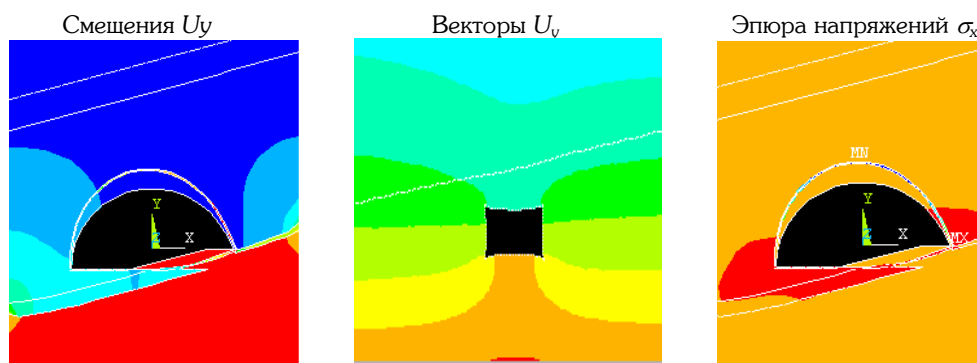


Рис. 6. Моделирование напряженно-деформированного состояния в ПМК Ansys

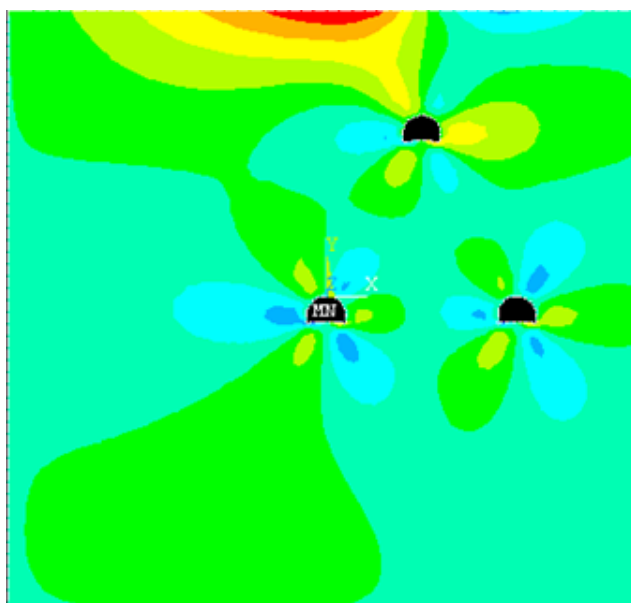


Рис. 7. Эпюры напряжения σ_x при взаимном влиянии выработок с арочной формой сечения

Если соотношения между главными напряжениями достигает величин, удовлетворяющих условиям (23) и (26), происходит разрушение массива под действием касательных напряжений в форме сдвига, причем даже в условиях объемного напряженного состояния [5].

Применительно к горным породам, большое значение имеют различного ослабления, сформировавшиеся в массиве в течение геологической истории или в результате техногенных причин (главным образом, взрывных работ и сил горного давления). Поэтому для оценки устойчи-

вости горных выработок в данной работе остановимся на теории наибольших деформаций (одно из направлений теории прочности).

Согласно теории наибольших деформаций, критическое состояние материала связывается с предельно допустимым удлинением или укорочением $[\varepsilon]$. Условие прочности для случая объемного напряженного состояния имеет вид:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)) \leq \frac{[\sigma]}{E} \quad (27)$$

или в терминах напряжений:

$$\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) \leq [\sigma], \quad (28)$$

где μ — коэффициент Пуассона; E — модуль упругости; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — главные напряжения; $[\sigma]$ — допустимые напряжения (пределы прочности) соответствующего образца при сжатии или при растяжении.

Таким образом, так как в диссертации решалась плоская задача и были найдены закономерности изменения для главных напряжений σ_1 и σ_3 формулу 26 можно переписать в следующем виде:

$$\sigma_1 - \mu \sigma_3 \leq [\sigma] \quad (29)$$

При выполнении условия (29) происходит разрушение массива. Рассчитав значения главных напряжений σ_1 и σ_3 от разных параметров используя установленные выше закономерности можно оценить контуры горной выработки на прочность и принять соответствующие меры по управлению горным давлением — рис. 6.

На рис. 7 представлено взаимное влияние горных выработок с арочной формой сечения [6].

Полученные эмпирические зависимости могут быть использованы при корректировке действующей «Инструкции по расчету параметров крепления горных выработок с анкерной крепью, Караганда, 2008. — 70 с. [7]».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Временная инструкция по расчету и применению анкерной крепи на шахтах Карагандинского бассейна. — Караганда, 1998. — С. 45–49.
2. Либерман Ю.М., Хаимова-Малькова Р.И. Упруго-пластический анализ напряженного состояния краевой части угольного пласта методом конечных элементов // Научн. труды ИГД им. А.А. Скочинского. Вып. 204. 1982. — С. 35–40.
3. Дайпал В.Ш., Брандари С., Прасат Ч.Д. Выбор техники и экономически оптимальной системы анкерного крепления кровли при проведении выработок на угольных шахтах научных подходов // Коул Интернэшнл, № 12. 2002. — С. 10–17.
4. Валкер С. Система крепления горных выработок // World Coal. № 5, 2003. — С. 17–22.
5. Фирхаус Р., Арендт А. Проходка выемочного штрека прямоугольного сечения с анкерной крепью в зонах повышенного горного давления // Глюкауф, № 11. 2001. — С. 4–12.
6. Демин В.Ф., Смагулова А.С. Исследование влияния главных максимальных горизонтальных напряжений на горные выработки // Международный научный журнал «Актуальные проблемы современности». Серия «Технические науки». — Караганды: Изд-во Болашақ-Баспа, № 6(56). 2010. — С. 43–46.
7. Инструкция по расчету параметров крепления горных выработок с анкерной крепью, Караганда, 2008. — 70 с. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Демин Владимир Федорович — доктор технических наук, профессор, академик Международной академии информационных наук,
Смагулова Асемгуль Сериковна — кандидат технических наук, старший преподаватель,
Демин Виталий Владимирович — кандидат технических наук, доцент, зам. главного инженера шахты «Саранская» АО «АрселорМиттал Темиртау»,
Карагандинский государственный технический университет, kargtu@kstu.kz.

