DOI: 10.26730/1999-4125-2017-5-30-36
УДК 622.831

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНОГО СОСТОЯНИЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ ЦЕЛИКОВ НА ШАХТАХ АО «СУЭК-КУЗБАСС»

EVALUATION OF PROTECTIVE PILLAR STRENGTH IN COAL UNDERGROUND MINES OF SUEK-KUZBASS JSC

Пириева Наталья Николаевна,[1]
начальник отдела перспективного развития, e-mail: PirievaNN@suek.ru
Pirieva Natalya N.[1]**,** Head of Department on perspective development
Ермакова Инна Алексеевна[2]**,**
доктор техн. наук, профессор, e-mail: eia.pm@kuzstu.ru
Ermakova Inna A.[2]**,** D. Sc., Professor

[1]АО «СУЭК-Кузбасс», 652507, Россия, г. Ленинск-Кузнецкий, ул. Васильева, 1.
[1]JSC "SUEK-Kuzbass", 652507, Russia, Leninsk-Kuznetsky, Vasilyeva St., 1.
[2]Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
[2]T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

Аннотация. *Для обоснования эффективного способа выемки предохранительных целиков, предназначение которых потеряло актуальность, требуется оценка их прочностного состояния. Эта задача решалась методом конечных элементов с использованием разработанной методики. Полученные результаты позволили оценить размеры зон разрушения в целиках с учетом их взаимного местоположения, глубины залегания, структуры строения, деформационных и прочностных свойств пород.*

Abstract. *To justify an effective method of protective pillar extraction, the destination of which has lost relevance, it is required to assess their strength condition. This problem was solved by the finite element method using the developed procedure. The obtained results made it possible to estimate the dimensions of the destruction zones in the pillars taking into account their mutual disposition, depth of occurrence, structure, deformation, and strength properties of the rock strata.*

Ключевые слова: *метод конечных элементов, предохранительные целики, зоны разрушения в целиках.*

Keywords: finite element method, protective pillar, zones of destruction in the pillars.

Увеличение эффективности подземной отработки угольных месторождений возможно за счет извлечения предохранительных целиков, предназначение которых потеряло актуальность. Обоснование способа выемки целиков возможно только после оценки их напряженно-деформированного и прочностного состояния.

Расчет целиков является классической задачей геомеханики, решению которой посвящены многие работы [1]. По своим постановкам и методам решения эти работы можно разделить на два класса: инженерные методы решения, основанные на гипотезах перераспределения горного давления и методы механики деформированного твердого тела. Являясь наиболее физически строгими, методы механики деформированного твердого тела включают в себя метод конечных элементов, метод граничных элементов и аналитические методы [2-11]. В данной работе используется метод конечных элементов [12], учитывающий деформационные и прочностные характеристики полной диаграммы сжатия угля [13].

Анализ прочностного состояния предохранительных целиков показан на примере целиков под путевые и конвейерные уклоны на шахте им. А. Д. Рубана АО «СУЭК-Кузбасс». Указанная шахта отрабатывает три пласта пологого падения (рис. 1):

1) пласт Полысаевский-II с глубиной залегания 80 – 124 м, углом падения 6 – 8^0 и мощностью от 4,40 до 5,4 м (рис. 1a);

2) пласт Надбайкаимский с глубиной залегания 210 – 290 м, углом падения 3 – 7^0 и мощностью от 2,20 до 2,70 м (рис. 1b);

3) пласт Байкаимский с глубиной залегания 245 – 285 м м, углом падения 5 – 12^0 и мощностью от 2,20 до 2,85 м (рис.1c).

С увеличением глубины разработки длина предохранительного целика увеличивается. В частности, целик под фланговый конвейерный и путевой уклоны по пласту Байкаимский имеет общий размер 225 х 950 м с оценочными запасами

900 тыс. т.

При рассмотрении взаимного положения предохранительных целиков по всем трем пластам можно выделить три характерных сечения.

Сечение 1 – вблизи со скважиной 11724. Целик по пласту Байкаимский с обеих сторон граничит с выработанным пространством, в нем пройдены два уклона. По пластам Надбайкаимский и Полысаевский-II очистные работы не предусмотрены.

Сечение 2 – вблизи со скважиной 21567. Два целика по пластам Надбайкаимский и Байкаимский располагаются друг над другом и с обеих сторон граничат с выработанным пространством. В целике по пласту Надбайкаимский пройдены три уклона, а в целике по пласту Байкаимский – два уклона. По пласту Полысаевский-II – нет очистных работ.

Сечение 3 – вблизи со скважиной 21577. Три предохранительных целика по пластам Полысаевский-II, Надбайкаимский и Байкаимский располагаются друг над другом. В каждом из них пройдены три уклона. Целики по пластам Полысаевский-II и Байкаимский с обеих сторон граничат с выработанным пространством. Целик по пласту Надбайкаимский граничит с выработанным пространством с одной стороны (слева).

Схема взаимного расположения рассматриваемых целиков с учетом планируемой отработки запасов по всем трем пластам показана на рис. 2.

В реальных условиях угольный пласт находится во вмещающих породах сложной слоистой структуры.

Описание слоев, их глубину залегания, мощность, угол падения можно установить с помощью геологического журнала, в которые записываются данные по кернам для скважин.

Метод конечных элементов позволяет учесть структуру вмещающих пород и свойства каждого слоя.

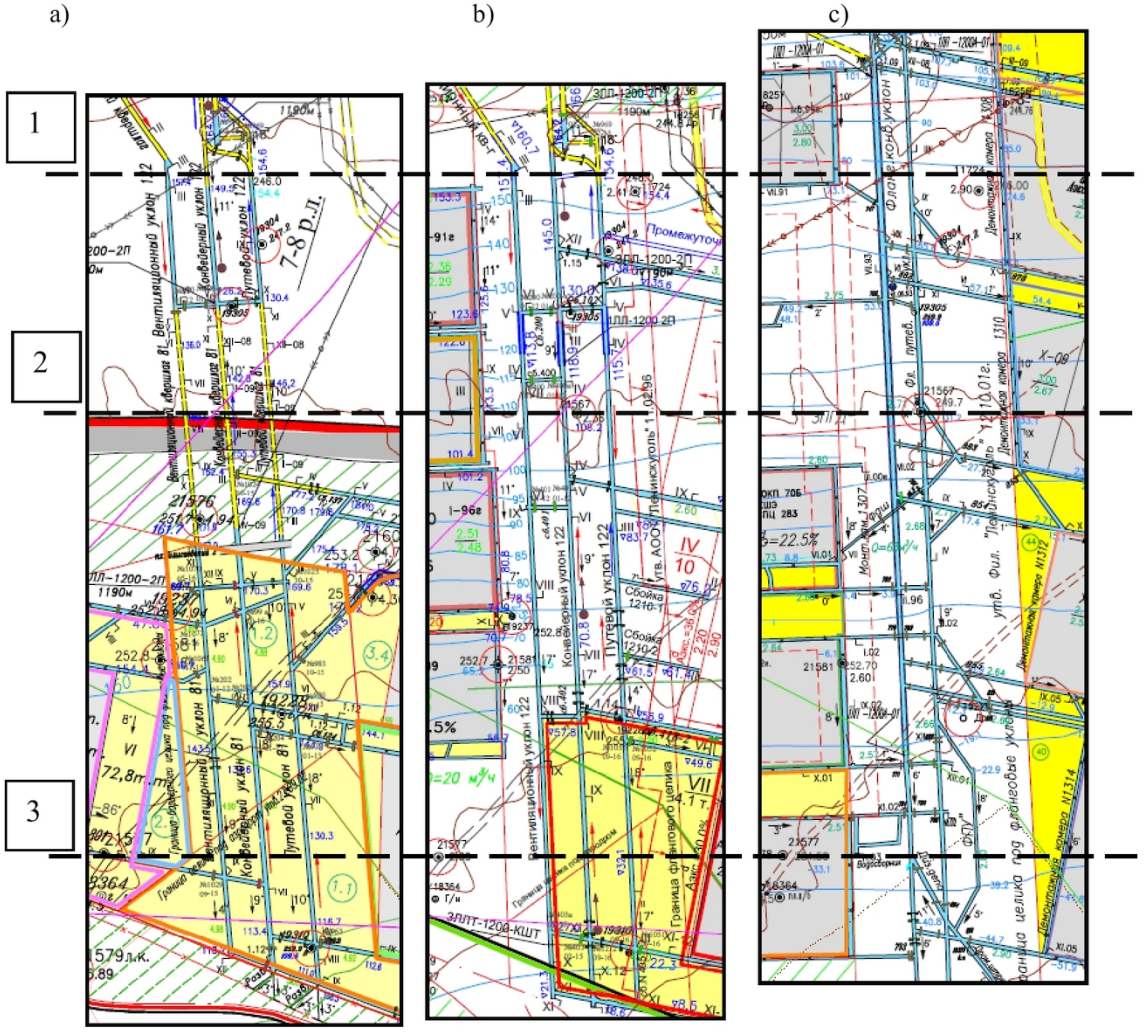

Рис. 1. Планы горных работ в окрестности предохранительных целиков для уклонов по пластам: Полысаевский-II (a), Надбайкаимский (b), Байкаимский (c); 1, 2, 3 – плоскости сечений вблизи со скважинами 11724, 21567, 21577 соответственно

Fig. 1. Mine working plans in the vicinity of protective pillars at an incline by coal seam: Polysaevskij-II (a), Nadbajkaimskij (b), Bajkaimskij (c); 1, 2, 3 – cross sections near wells 11724, 21567, 21577 respectively

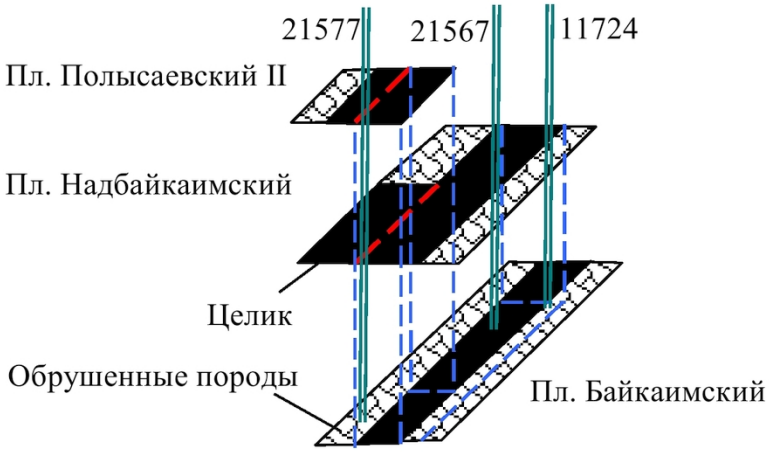

Рис. 2. Схема расположения предохранительных целиков под уклоны по пластам с указанием скважин
– граница предохранительного целика под уклоны
Fig. 2. Scheme of location of protective pillars at an incline by coal seams with the indication of wells
– border of the protective pillar at an incline

Таблица 1. Строение пород по скважине №21577 (нижнее сечение)

	№	Описание пород по слоям	Глубина слоя, м от	Мощность слоя, м
1	1	Почвенно-растительный слой +наносы	0	60,0
2	2	Алевролит	60,0	25,6
3	3	Песчаник	85,6	14,4
4	4	Алевролит	100,0	24,9
5	5	Пл. Полысаевский-II	124,9	5,3
6	6	Алевролит +пл. Спутник	130,15	82,15
7	7	Пл. Надбайкаимский	213,3	2,7
8	8	Алевролит	215,0	2,5
9	9	Песчаник	217,5	67,3
10	10	Пл. Байкаимский	284,8	2,8
11	11	Алевролит	287,6	17,4

В качества примера в таблице приведены обобщенные данные строения пород по скважине 21577, где близкие по свойствам слои сгруппированы в один для уменьшения их числа. Аналогичные данные были получены для скважин 11724 и 21567.

Расчетная область задачи была задана с учетом глубины и мощности имеющихся слоев. Свойства пород были заданы следующим образом.

Для почвенно-растительного слоя с наносами модуль деформации $E = 4 \cdot 10^9$ Н/м^2; коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}3$; объемный вес $\gamma = 18000$ Н/м^3.

Для алевролита: $E = 1 \cdot 10^{10}$ Н/м^2; $\nu = 0{,}25$; $\gamma = 25000$ Н/м^3.

Для песчаника: $E = 2 \cdot 10^{10}$ Н/м^2; $\nu = 0{,}2$; $\gamma = 27000$ Н/м^3.

Для угольных пластов: $E = 1 \cdot 10^9$ Н/м^2; $\nu = 0{,}25$; $\gamma = 138000$ Н/м^3.

На рис. 3 приведены вертикальные сечения и расчетные схемы прочностного состояния предохранительных целиков под уклоны по скважинам 11724 (a), 21567 (b), 21577 (c) соответственно.

Таким образом, в работе рассматривалось поперечное сечение целика, в котором реализуется плоскодеформированное состояние горных пород. В этом сечении выделялась расчетная область прямоугольной формы, которая включала в себя угольный целик (целики); обрушенное пространство; вмещающие породы. На дневной поверхности, верхней границе расчетной области *AB* нагрузки отсутствуют. На нижней границе *CD*, удаленной от целика, отсутствуют нормальные смещения (граница закреплена). По вертикальным границам *BC* и *AD* действуют нормальные напряжения бокового распора, линейно возрастающие с глубиной.

Поставленная задача решались методом конечных элементов (МКЭ) по лицензионной программе «ELCUT». Число и размеры элементов сетки выбирались таким образом, чтобы граничные условия удовлетворялись с достаточной точностью: по перемещениям до 0,001м, по напряжениям до 1 Н/м^2.

Моделирование состояния целиков производилось по разработанной методике численного расчета состояния целиков с учетом запредельного деформирования [14].

Для оценки прочности целиков использовался критерий, полученный Гоголиным В. А. в работе [13]. Предельная прочность пологого пласта, находящегося в состоянии плоской деформации вычисляется следующим образом:

$$\sigma_{сж}^{пл} = \gamma H + \frac{\sigma_{сж}}{1+\nu}, \quad (1)$$

где ν – коэффициент поперечной деформации; λ – коэффициент бокового распора; H – глубина залегания, м; γ – удельный вес пород, Н/м^3; $\sigma_{сж}$ – предел прочности породы на одноосное сжатие, МПа.

a)

b)

c)

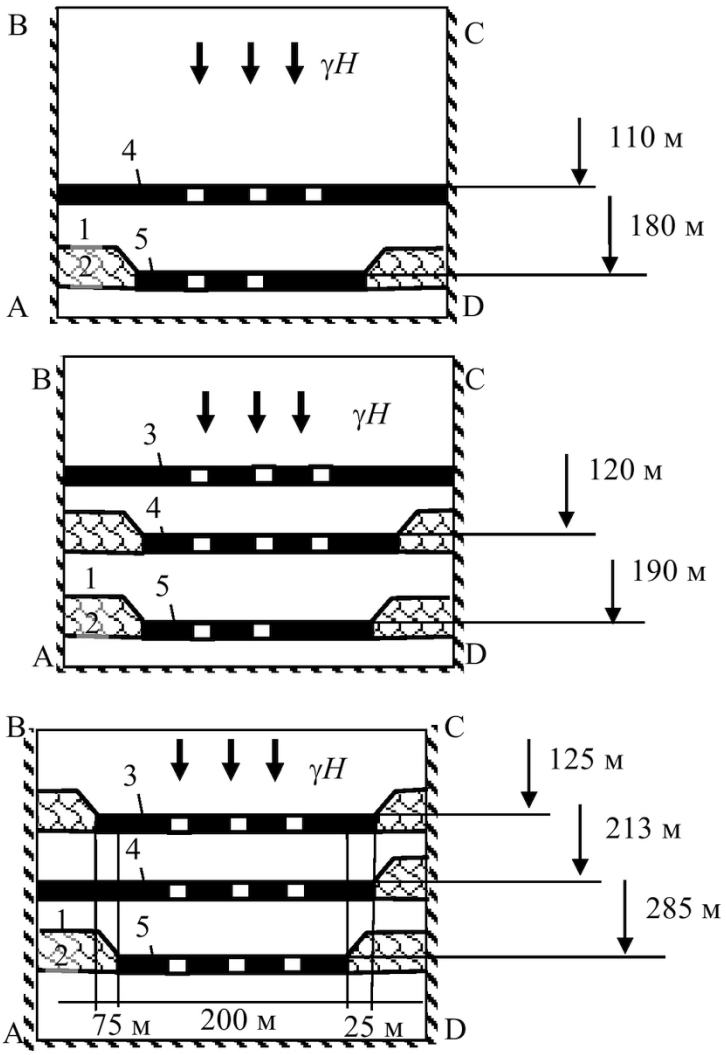

Рис. 3. Вертикальные сечения и расчетные схемы прочностного состояния предохранительных целиков под уклоны по скважинам 11724 (a), 21567 (b), 21577 (c) соответственно: 1 – вмещающие породы; 2 – обрушенное пространство; 3 – пласт Полысаевский-II; 4 – пласт Надбайкаимский; 5 – пласт Байкаимский

Fig. 3. Vertical profiles and schemes for calculating the strength of protective pillars through wells 11724 (a), 21567 (b), 21577 (c) respectively: 1 – host rock; 2 – mined-out space; 3 – Polysaevskij-II coal seam; 4 – Nadbajkaimskij coal seam; 5 – Bajkaimskij coal seam

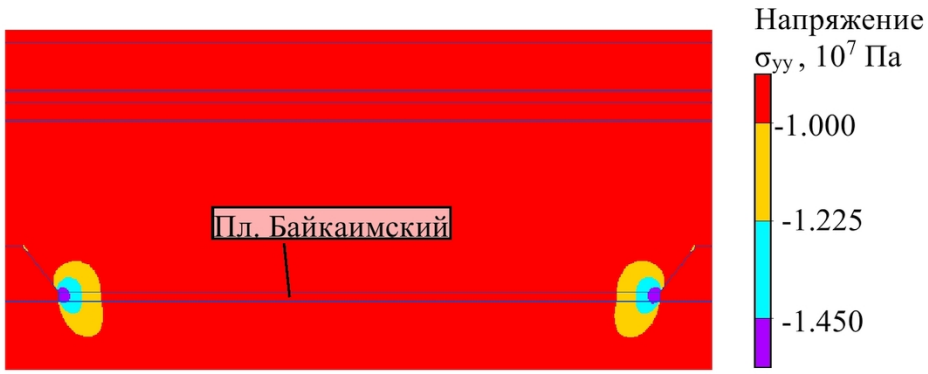

Рис. 4. Распределение вертикальных напряжений σ_{yy} в сечении скважины 11724
Fig. 4. Distribution of vertical stresses σ_{yy} in section of well 11724

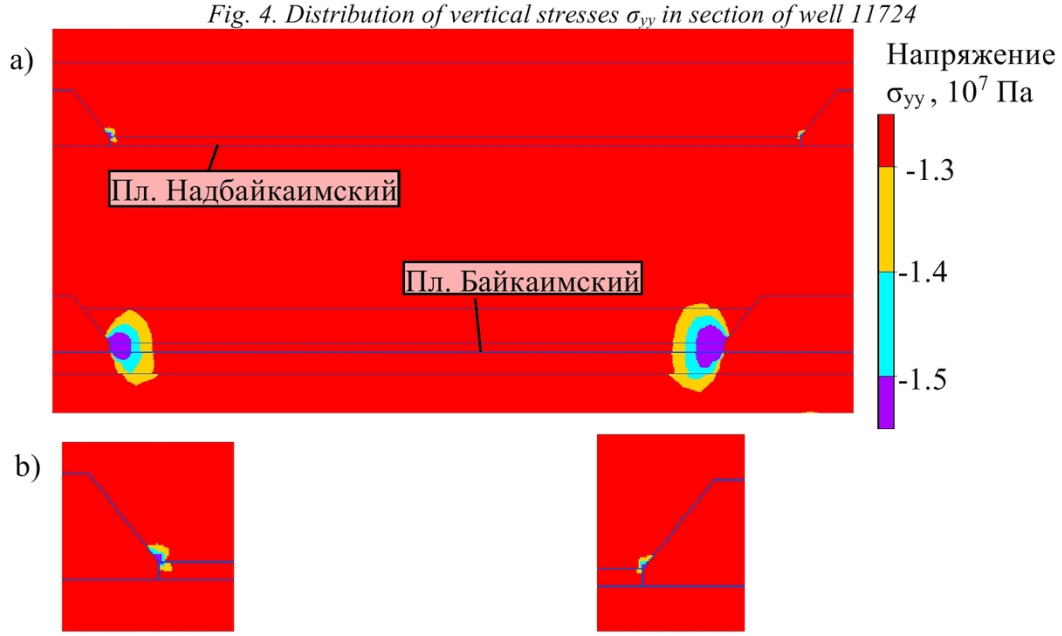

Рис. 5. Распределение вертикальных напряжений σ_{yy} в сечении скважины 21567 (а) и зоны разрушения в предохранительном целике по пласту Надбайкаимский (б)
Fig. 5. The distribution of vertical stresses σ_{yy} in the section of well 21567 (a) and zones of destruction in the protective pillar in Nadbajkaimskij coal seam (b)

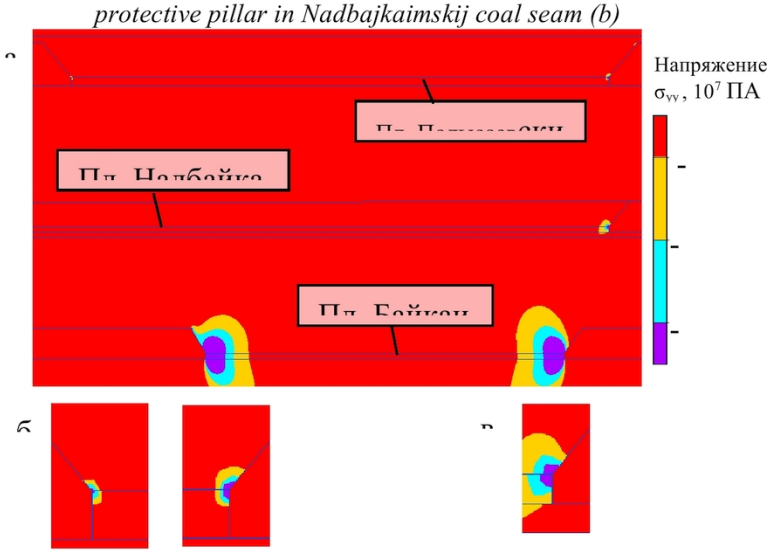

Рис. 6. Распределение вертикальных напряжений σ_{yy} в сечении скважины 21577 (а) и зоны разрушения в предохранительных целиках по пласту Полысаевский-II (б) и Надбайкаимский (в)
Fig. 6. The distribution of vertical stresses σ_{yy} in the section of well 21577 (a) and zones of destruction in the protective pillars for Polysaevskij-II coal seam (b) and Nadbajkaimskij coal seam (c)

Таким образом, часть пласта, в которой выполняется условие: $\sigma_{yy} > \sigma_{сж}^{пл}$, теряет свою прочность, частично разрушается, то есть переходит в запредельное состояние.

Для расчетов принимались следующие значения: ν = 0,25; $\sigma_{сж}$ = 10 МПа.

На рис. 4 показано распределение вертикальных напряжений по сечению скважины 11724 (верхнему). В этом сечении рассматривается предохранительный целик по пласту Байкаимский (см. рис. 3а). Максимальные сжимающие напряжения, при которых пласт угля сохраняет прочность, находились по (1): $\sigma_{сж}^{пл} = -1{,}45 \cdot 10^7$ Па. Участки пласта, в которых $\sigma_{сж}^{пл} < -1{,}45$ МПа, и происходит потеря прочности, показаны фиолетовым цветом. Длина зоны разрушения с обеих сторон целика составляет 3,7 м.

На рис. 5 показано распределение вертикальных напряжений по сечению 21567 (среднему). В это сечение попадает два предохранительных целика.

Для пласта Байкаимский предельная прочность $\sigma_{сж}^{пл} = -1{,}5 \cdot 10^7$ Па. Зоны разрушения по этому пласту показаны фиолетовым цветом, и составляют 2,2 м слева и 2,7 м справа.

Для пласта Надбайкаимский $\sigma_{сж}^{пл} = -1{,}4 \cdot 10^7$ Па. Зона разрушения показана фиолетовым и голубым цветом, составляет 0,8 м слева и 0,6 м справа.

На рис. 6 показано распределение вертикальных напряжений в сечении скважины 21577 (см. рис. 3б). В это сечение попадают три предохранительных целика.

Для пласта Байкаимский предельная прочность $\sigma_{сж}^{пл} = -1{,}7 \cdot 10^7$ Па. Зоны разрушения по этому пласту показаны фиолетовым цветом, и составляют 8,2 м слева и 8,8 м справа.

Для пласта Надбайкаимский $\sigma_{сж}^{пл} = -1{,}5 \cdot 10^7$ Па. Зона разрушения показана фиолетовым и голубым цветом, составляет 2 м.

Для пласта Полысаевский-II предельная прочность $\sigma_{сж}^{пл} = -1{,}3$ МПа. Зона разрушения пласта Полысаевский-II показана фиолетовым, голубым и желтым цветом. Ее размеры – 1,1 м слева и 2,6 м справа.

Полученные размеры зон разрушения краевых частей предохранительных целиков под уклоны следует учитывать при проектировании технологии выемки этих целиков. В частности, объемы угля, находящихся в этих зонах, войдут в эксплуатационные потери. В целиках по пластам Надбайкаимский и Полысаевский-II эти потери составя 1-1,5%. По целику пласта Байкаимский потери составят 3,7%; 2,5% и 8,5% в верхней, средней и нижней частях целика соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lin'kov A. M. On the Theory of Pillar Design (2001) Journal of Mining Science. Vol. 37. No 1. pp.10-28.

2. Господариков А.П., Зацепин М.А. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород при разработке пологих месторождений //Записки Горного института. – 2010. – Т. 187. – С. 47-54.

3. Исаченко А. А., Риб С. В., Волошин В. А., Фрянов В. Н. Оценка геомеханического состояния углепородного массива в окрестности уклонов сближенных угольных пластов с использованием численного моделирования методом конечных элементов. //ГИАБ, 2016, №1. – С.297-302.

4. Курленя М. В., Серяков В. М., Еременко А. А. Техногенные геомеханические поля напряжений. – Новосибирск: Наука, 2005. – 264 с.

5. Дягилева А. В., Гоголин В. А., Ермакова И. А. Напряженное состояние угольных пластов сложной структуры при очистной выемке //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2011, № 6. – С. 13-17.

6. Корнев Е. С., Павлова Л. Д., Фрянов В. Н. Численное моделирование геомеханического состояния геомассива при двусторонней выемке коротких угольных столбов. // Вестник КузГТУ. 2015, №2. - С. 20-25.

7. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. М.: Недра, 1985 – 271 с.

8. Черданцев Н. В. Устойчивость целиков в окрестности системы выработок, сооружаемых в анизотропном по прочности массиве горных пород. // Вестник КузГТУ. 2012. №1. - С. 15-19.

9. Комиссаров С.Н. Управление массивом горных пород вокруг очистных выработок. М.:, Недра, 1983. – 237 с.

10. Корнев Е. С., Павлова Л. Д., Фрянов В. Н. Разработка комплекса проблемно-ориентированных программ для моделирования геомеханических процессов методом конечных элементов. //Вестник КузГТУ. 2013. № 2. - С. 65-69.

11. Kurlenya M.V., Mirenkov V.E., Shutov V.A. Rock deformation around stopes at deep lewels (2014). Journal of Mining Science. Vol. 50. No. 6. pp. 1001-1007.

12. Zienkiewicz, O.C.; Taylor, R.L.; Zhu, J.Z. (2013). The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals (7th Edition). Butterworth-Heinemann. – 756 p.

13. Гоголин В. А. Деформационные и прочностные характеристики хрупких горных пород при сжатии / В. А. Гоголин // Вестник КузГТУ. – 2016. – №3. – С. 3–7.

14. Ермакова И. А., Пириева Н. Н. Методика численного расчета состояния целиков с учетом запредельного деформирования / И. А. Ермакова, Н. Н. Пириева // Вестник КузГТУ. – 2016. – №4. – С. 3–8.

REFERENCES

1. *Lin'kov A. M.* On the Theory of Pillar Design (2001) Journal of Mining Science. Vol. 37. No 1. pp.10-28.

2. *Gospodarikov A.P., Zacepin M.A.* Matematicheskoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya massiva gornyh porod pri razrabotke pologih mestorozhdenij //Zapiski Gornogo instituta. – 2010. – T. 187. – pp. 47-54.

3. *Isachenko A. A., Rib S. V., Voloshin V. A., Frjanov V. N.* Ocenka geomehanicheskogo sostojanija ugleporodnogo massiva v okrestnosti uklonov sblizhennyh ugol'nyh plastov s ispol'zovaniem chislennogo modelirovanija metodom konechnyh jelementov [Assessment of a geomechanical condition of the massif in the vicinity of permanent workings near contiguous coal layers with use of numerical modeling by method of finite elements]. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal), 2016, vol. 1, pp: 297-302. (Rus).

4. *Kurlenja M. V., Serjakov V. M., Eremenko A. A.,* 2005. Tehnogennye geomehanicheskie polja naprjazhenij [Technogenic geochemical stress field]. – Novosibirsk: Nauka, p. 264 (Rus).

5. *Dyagileva A.V., Gogolin V.A., Ermakova I.A.,* 2011. Napryazhennoe sostoyanie ugol'nykh plastov slozhnoy struktury pri ochistnoy vyemke [The stress state of coal seams of complex structure with the producting works]. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal), vol. 6, pp: 13-17.

6. *Kornev E.S., Pavlova L.D., Fryanov V.N.,* 2015. Chislennoe modelirovanie geomekhanicheskogo sostoyaniya geomassiva pri dvustoronney vyemke korotkikh ugol'nykh stolbov. [Numerical modeling of rock massif geomechanical condition with bilateral notch short of coal pillars]. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta, vol. 2, pp. 20-25.

7. *Stavrogin A.N., Protosenya A.G.* Prochnost' gornyh porod i ustojchivost' vyrabotok na bol'shih glubinah. M.: Nedra, 1985 – p. 271.

8. *Cherdancev N. V.*, 2012. Ustojchivost' celikov v okrestnosti sistemy vyrabotok, sooruzhaemyh v anizotropnom po prochnosti massive gornyh porod [Stability of pillars in the vicinity of mine workings located in the rock with anisotropic strength]. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta, vol. 1, pp. 15-19.

9. *Komissarov S.N.* Upravlenie massivom gornyh porod vokrug ochistnyh vyrabotok. M.:, Nedra, 1983. – p. 237.

10. *Kornev E.S., Pavlova L.D., Fryanov V.N.,* 2013. Razrabotka kompleksa problemno-orientirovannykh programm dlya modelirovaniya geomekhanicheskikh protsessov metodom konechnykh elementov [Development of the problem-oriented programs complex for modeling of geomechanical processes by finite element method]. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta, vol. 2, pp: 65-69.

11. *Kurlenya M.V., Mirenkov V.E., Shutov V.A.,* 2014. Rock deformation around stopes at deep levels. Journal of Mining Science, 50(6), pp. 1001-1007.

12. *Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z.* (2013). The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals (7th Edition). Butterworth-Heinemann, p. 756.

13. *Gogolin V. A.*, 2016. Deformacionnye i prochnostnye harakteristiki hrupkih gornyh porod pri szhatii [Deformation and strength characteristics of brittle rocks under compression]. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta, vol. 3, pp. 3-7.

14. *Ermakova I. A., Pirieva N. N.* Metodika chislennogo rascheta sostoyaniya celikov s uchetom zapredel'nogo deformirovaniya // Vestnik KuzGTU. – 2016. – №4. – p. 3–8.

Поступило в редакцию 14.09.2017
Received 14.09.2017