НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 622.831

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА СОСТОЯНИЯ ЦЕЛИКОВ С УЧЕТОМ ЗАПРЕДЕЛЬНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

THE METHOD OF NUMERICAL CALCULATION OF PILLAR STATE WITH ALLOWANCE FOR BEHIND LIMIT DEFORMATION

Ермакова Инна Алексеевна[1],
д.т.н., профессор, e-mail: inna-e@inbox.ru
Ermakova Inna A.[1],
Dr. Sc. (Engineering), Professor

Пириева Наталья Николаевна[2] ,
главный специалист, e-mail: PirievaNN@suek.ru
Pirieva Natalya N.[2],
main specialist

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

Аннотация

Приводится постановка задачи расчета напряженно-деформированного состояния угольных целиков методом конечных элементов. Расчетная область включает следующие блоки: породы кровли и почвы, угольный целик, обрушенные породы выработанного пространства и область полных сдвижений кровли. Все блоки принимаются линейно-деформируемыми с натурными деформационными характеристиками. Разработанная методика численного расчета состояния целиков с учетом запредельного деформирования включает в себя два этапа. На первом этапе находится распределение нормального напряжения на целик, а также длина и максимальная глубина зоны, в которой наблюдаются запредельные деформации. На втором этапе моделирования в краевую часть целика дополнительно вводится зона ослабленного угля с размерами, найденными на первом этапе расчета. Предложенная методика расчета позволяет оценить напряженно-деформированное состояние целика, найти максимум опорного давления и расстояние до него.

Abstract

The paper describes of calculation stress and deformed state of coal pillars by a finite element method. The computational area contains the following blocks: host rock, coal pillar, broken-down rock in mined-out space and area full displacement of roof. All the blocks were considered linearly-deformable. New method of numerical calculation of pillar state with allowance for behind limit deformation includes two stages. Distribution of rock pressure on coal pillar was obtained at first stage. These results were used for to find the length and deep area with straining after attainment ultimate compressive strength – with behind limit deformation. In the second stage additional zone with behind limit deformation was introduced in the edge of the coal pillar. The proposed method of calculation allows us to estimate the stress-strain state of pillar, find the maximum of bearing pressure and the distance to it.

Ключевые слова: *метод конечных элементов, предохранительные целики, запредельное деформирование, максимум опорного давления.*

Keywords*: finite element method, protective pillar, behind limit deformation, maximum of bearing pressure.*

Расчет минимальной устойчивой ширины ленточных целиков является одной из основных задач геомеханики при подземной разработке полезных ископаемых. Решению этой задачи посвящены многие работы, достаточно полный обзор которых приведен в работе [1].

Результаты этих работ основаны на приближенных решениях упругих и упруго-пластических задач взаимодействия вмещающих пород с целиками. В данной работе развивается численный подход, основанный на методе конечных элементов [2]. В отличие от работ [3-12] напряженное состояние целиков описывается с использованием характеристик полной диаграммы сжатия угля [13].

Объектом исследований являлись угольные предохранительные целики различного предназначения. Для решения вопроса о возможности выемки целиков необходимо было провести анализ их геомеханического состояния и установить размеры нарушенных зон. Переход краевых частей целика из прочного состояния в разрушенное учитывался рассмотрением запредельного деформирования угля. Для расчета запредельного состояния краевых частей целиков использовался метод конечных элементов.

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 деформационных и прочностных характеристик полной диаграммы сжатия угля [13].

На рис. 1 приведена расчетная схема в сечении по простиранию предохранительного целика. Расчетная область включала в себя угольный целик; обрушенное пространство; вмещающие породы; область полных сдвижений. 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.

Целик угля, блок обрушенных пород, блок вмещающих пород и область полных сдвижений нагружены объемными силами γ с деформационными параметрами E, ν, значения которых приведены в таблице :

	γ, Н/м^3	E, Н/м^2	ν
Целик угля	14000	10^9	0,25
Блок обрушенных пород	20000	10^8	0,35
Блок вмещающих пород	25000	10^{10}	0,25
Область полных сдвижений	25000	$5\cdot10^9$	0,25

На первой стадии расчетов напряженно-деформированное состояние всех блоков расчетной области описывалось как линейно деформируемое. Задачи 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.

Изолинии вертикальных напряжений в целике, породах кровли и почвы, а также в обрушенных породах выработанного пространства приведены на рис. 2а). На этом рисунке, в силу симметрии задачи, показана левая часть целика, которая граничит с выработанным пространством. Здесь сжимающие напряжения считаются отрицатель-

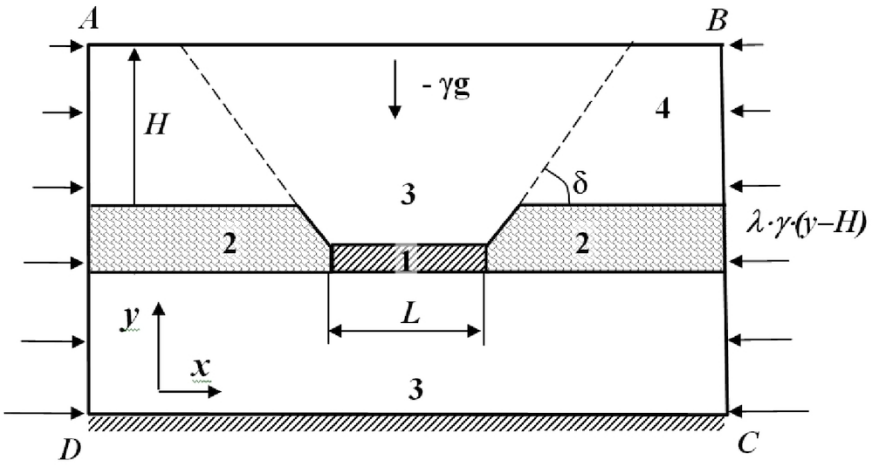

Рис. 1. Расчетная схема: 1 – угольный целик; 2 – обрушенные породы; 3 – вмещающие породы; 4 – область полных сдвижений

Fig. 1. Calculation scheme: 1 – the coal pillar; 2 – caving of the rock; 3 – host rock; the area of full shifts

ными, а растягивающие – положительными.

Распределение вертикальных напряжений σ_{yy} (опорного давления) на краевую часть целика имеет монотонно убывающий характер (Рис. 2b). Такое же монотонное убывание наблюдается и у вертикальных деформаций целика – ε_y. На некотором расстоянии x_m от краевой части целика нормальные напряжения σ_{yy} достигают своего предельного значения на сжатие σ_m. Эта величина, согласно [13], определяется по следующей формуле:

$$\sigma_m = \frac{1-\nu}{\nu}\lambda\gamma H + \frac{\sigma_s}{1+\nu}, \qquad (1)$$

где H – глубина разработки, λ – коэффициент бокового распора, σ_s – предел прочности угля на одноосное сжатие.

На этом же расстоянии x_m деформации сжатия целика также достигают своего предельного значения ε_m. Таким образом, на интервале $[0; x_m]$ целик находится в запредельном состоянии, сопровождающимся появлением продольных трещин, снижающих несущую способность целика. Поэтому вертикальные напряжения на интер-

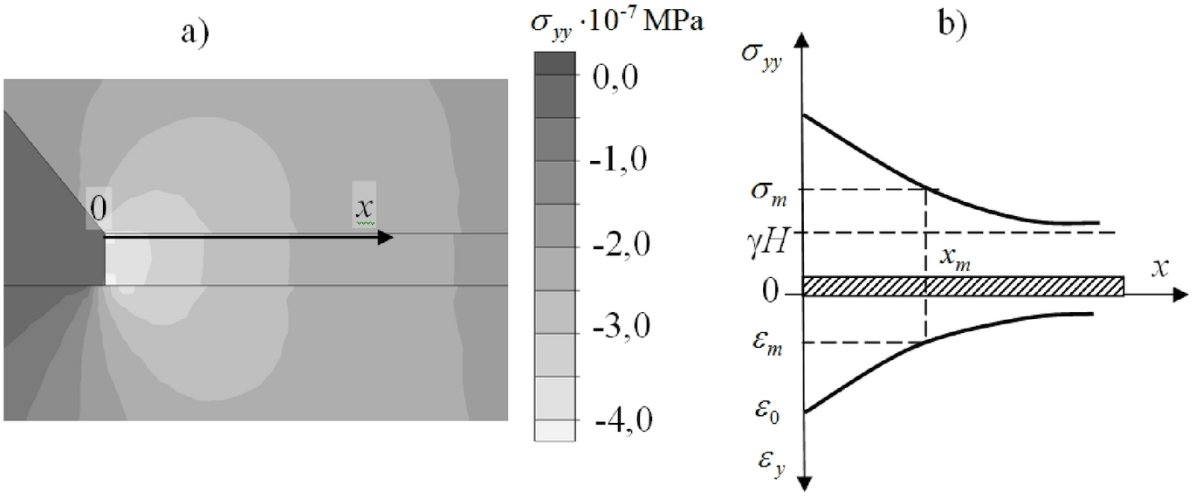

Рис. 2. Результаты расчета линейно деформируемой области: распределение вертикальных напряжений в массиве (a); значения вертикальных напряжений σ_{yy} и вертикальных деформаций ε_y на кровле целика (b)

Fig. 2. The results of the calculation of array with linear deformations (a); the values of vertical stresses σ_{yy} and vertical deformations ε_y on the top of a pillar (b)

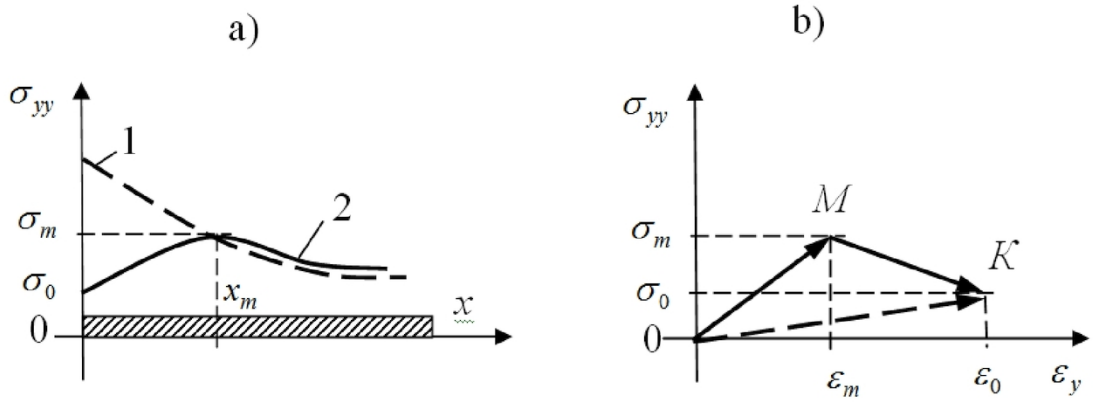

Рис.3. a) Напряженное состояние целика: 1 – для однородного линейно-деформированного целика; 2 – с учетом запредельных деформаций; b) диаграмма его деформирования при $x = 0$

Fig. 3. a) Stress state of the pillar: 1 – for homogeneous pillar with linear deformation; 2 – with allowance for behind limit deformation; b) the diagram of pillar's deformation with $x = 0$

вале $[0;\ x_m]$ меньше предельного значения на сжатие σ_m. При $x = 0$ эти напряжения достигают своего наименьшего значения $\sigma(0) = \sigma_0$ в краевой части (Рис. 3а). В граничной точке целика при $x = 0$ деформации сжатия достигают своего наибольшего значения: $\varepsilon(0) = \varepsilon_0$ (см. рис.2б).

Процесс сжатия краевой части целика описывается полной диаграммой объемного сжатия угля (Рис. 3b). Участок диаграммы *OM* описывает линейное деформирование угля до предела прочности σ_m в режиме заданных нагрузок. Участок диаграммы *MK* также описывает линейное деформирование угля, но за пределом прочности в режиме заданных деформаций.

Согласно линейной модели полной диаграммы сжатия угля, [13] зависимость, связывающая деформации и напряжения за пределом прочности, имеет следующий вид:

$$\sigma_0 = \sigma_m - (\varepsilon_0 - \varepsilon_m) \cdot M, \qquad (2)$$

где M - модуль запредельных деформаций, равный для хрупких горных пород модулю линейных деформаций E, то есть $M = E$.

Полагаем, что напряженно-деформированное состояние целика с характеристиками ε_0 и σ_0 может быть достигнуто при деформировании краевой части целика с меньшим модулем линейных деформаций E_1. Этому предположению соответствует линейное деформирование целика по пути *OK*.

На второй стадии расчетов краевая часть целика до максимума опорного давления, определяемого по (1) моделировалась двумя областями (Рис.4): целиком, с прежними деформационными

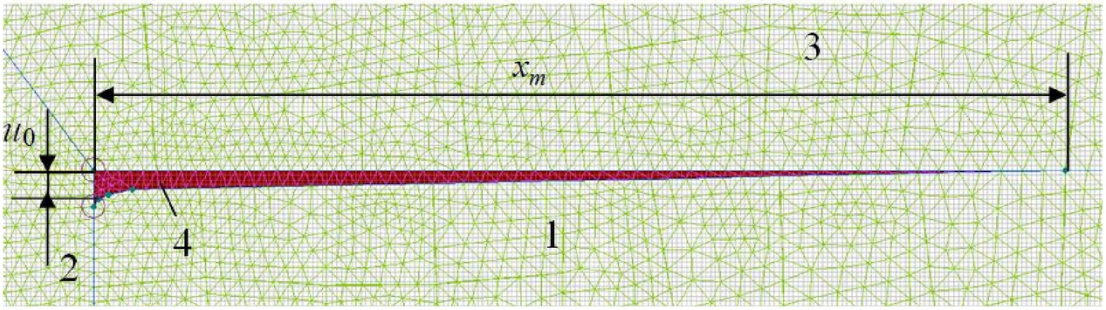

Рис.4. Часть расчетной области, включающей краевую часть целика:
1 – угольный целик; 2 – обрушенное пространство; 3 – вмещающие породы; 4 – зона ослабленного угля
Fig. 4. The part of calculation area including the edge segment of a pillar:
1 - coal pillar; 2 – caved space; 3 – host rock; 4 – zone of coal with reduced modulus of linear deformation

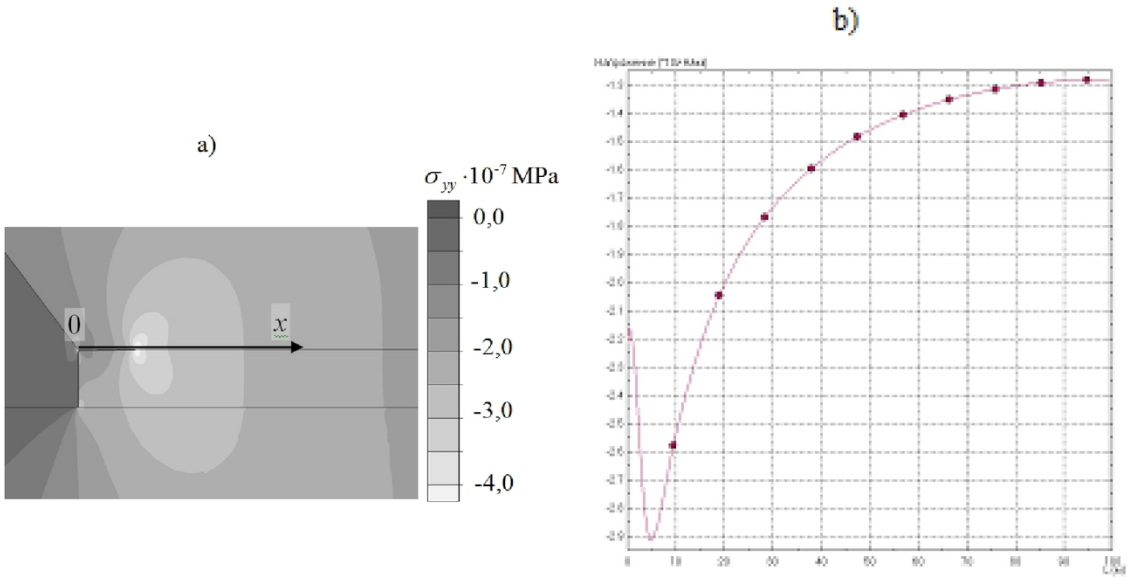

Рис.5. Распределение вертикальных напряжений в целике с учетом его запредельных деформаций: в массиве (а) и на кровле целика (b)
Fig. 5. The distribution of vertical stresses in the pillar with allowance for behind limit deformation: a) in the array; b) on the top of a pillar

характеристиками и ослабленной зоной угля с пониженным модулем линейных деформаций.

Модуль линейных деформаций ослабленного участка краевой части целика в соответствии с (2) определялся из следующего выражения:

$$E_1 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} = \frac{-(\varepsilon_0 - \varepsilon_m)\cdot E\cdot(\nu+\nu^2)[(1-\nu^2)\cdot\gamma H + \nu\cdot\sigma_s -}{(\nu+\nu^2)\cdot\varepsilon_0}. \quad (3)$$

Величина смещений кровли целика $u(0) = u_0$ в его граничной точке $x = 0$ при мощности пласта *m* определяется как:

$$u_0 = \varepsilon_0 \cdot m = \frac{\sigma_0}{E_1}\cdot m \quad (4)$$

Таким образом, для моделирования запредельного деформирования целика принималось, что в краевой части целика образуется зона ослабленного угля с модулем деформаций, определяемым по (3). Длина этой зоны равна расстоянию до максимума опорного давления x_m, а вертикальный размер – величине сжатия u_0 краевой части целика, который рассчитывался по (4). То есть, параметры этой зоны находились из результатов первого этапа расчета.

Изолинии вертикальных напряжений в целике и прилегающих породах с учетом его запредельных деформаций показаны на рис. 5a).

Зона наибольших напряжений сдвигается в сторону нетронутого угольного массива, что видно из сравнения рис. 2a) и рис. 5a). Распределение опорного давления на краевую часть целика (рис. 5b) наглядно показывает расположение и значение максимума опорного давления.

Выводы

1. Разработана двухэтапная методика расчета напряженно-деформированного состояния целика с учетом запредельного деформирования его краевой части с использованием метода конечных элементов.

2. Предложенная методика расчета позволяет оценить напряженно-деформированное состояние целика, найти максимум опорного давления и расстояние до него.

3. Предлагается использовать предложенную методику для оценки возможности выемки предохранительных целиков под капитальными горными выработками на шахтах ОАО «СУЭК-Кузбасс».

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. **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.

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

4. **Seryakov V.M.** Calculation of stress-strain state for an over-goaf rock mass (2009). Journal of Mining Science. Vol. 45. No. 5. pp. 420-426.

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 Кузбасского государственного технического университета. 2015, №2. - С. 20-25.

7. **Неверов С. А., Неверов А. А., Тапсиев А. П., Фрейдин А. М.** Геомеханическое моделирование развития горных работ в гравитационном поле земли с учетом системы геологических нарушений. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2013. №6. - С. 56-62.

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

9. **Хомченко В. Н., Карасев В. А., Масаев Ю. А.** Зависимость расчётных размеров целиков от глубины разработки в системах с короткими очистными забоями. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2015. №1. - С. 45-49.

10. **Корнев Е. С., Павлова Л. Д., Фрянов В. Н.** Разработка комплекса проблемно-ориентированных программ для моделирования геомеханических процессов методом конечных элементов. //Вестник Кузбасского государственного технического университета. 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// Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. №3. - С. 3-8.

REFERENCES

1. *Lin'kov A.M.,* 2001. On the Theory of Pillar Design. Journal of Mining Science, 37(1), pp: 10-28.

2. *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).

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

4. *Seryakov V.M.,* 2009. Calculation of stress-strain state for an over-goaf rock mass. Journal of Mining Science, 45(5), pp: 420-426.

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. *Neverov S. A., Neverov A. A., Tapsiev A. P., Frejdin A. M*., 2013. Geomehanicheskoe modelirovanie razvitija gornyh rabot v gravitacionnom pole zemli s uchetom sistemy geologicheskih narushenij [Geomechanical modeling of mining operations in the gravitational field of the earth, taking into account the system of geological faults].Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta, vol. 6, pp: 56-62.

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. *Homchenko V. N., Karasev V. A., Masaev Ju. A*., 2015. Zavisimost' raschjotnyh razmerov celikov ot glubiny razrabotki v sistemah s korotkimi ochistnymi zabojami [The dependence of the calculated size of the pillars of the depth of the development of systems with short clearing faces]. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta, vol. 1, pp: 45-49.

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, 756 p.

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: 3-8.

Поступило в редакцию 24.07.2016
Received 24 July 2016