

# Влияние скорости подвигания очистного забоя при отработке выемочного участка 48-8 филиала «Шахта «Ерунаковская–VIII» АО «ОУК «Южкузбассуголь» на изменение состояния приконтурного геомассива, влияющего на развитие аварийных ситуаций

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-4-37-41>

В статье приводятся результаты моделирования напряженно-деформированного состояния углепородного массива в лаве № 48–8 филиала «Шахты «Ерунаковская–VIII» и влияния скорости подвигания очистного забоя на развитие аварийных ситуаций в лаве, обрабатывающей пласт 48. Задача решалась методом конечных элементов с учетом физико-механических свойств угля и вмещающих пород кровли и почвы пласта. На основе результатов моделирования и опыта очистных работ по пласту 48 найдена минимальная скорость подвигания лавы, при которой не образуются куполов в очистном пространстве и не возникает аварийных ситуаций.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, очистные работы, куполообразование, аварийные ситуации, оптимальные скорости подвигания.

**Для цитирования:** Влияние скорости подвигания очистного забоя при отработке выемочного участка 48-8 филиала «Шахта «Ерунаковская–VIII» АО «ОУК «Южкузбассуголь» на изменение состояния приконтурного геомассива, влияющего на развитие аварийных ситуаций / В.В. Семенцов, В.А. Гоголин, И.А. Ермакова и др. // Уголь. 2023. № 4. С. 37-41. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-4-37-41.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА

Для решения задач моделирования геомеханического состояния углепородного массива при ведении очистных работ широко применяется метод конечных элементов. Применению этого метода в решении различных задач посвящено много работ отечественных и зарубежных ученых [1, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25].

Для оценки влияния скорости подвигания очистных работ на геомеханическое состояние углепородного массива при отработке лавы № 48-8 сначала решалась задача определения напряженно-деформированного состояния (НДС) для статического положения горных работ. Задача решалась численным методом конечных элементов (МКЭ) [1] по лицензионной программе «ELCUT». Данная программа была успешно использова-

### СЕМЕНЦОВ В.В.

Канд. Техн. наук,  
заведующий лабораторией  
горной геомеханики  
АО «НЦ ВостНИИ»,  
650002, г. Кемерово, Россия,  
e-mail: v.sementsov@nc-vostnii.ru

### ГОГОЛИН В.А.

Доктор техн. наук, профессор,  
профессор кафедры математики  
ФГБОУ ВО «Кузбасский  
государственный технический  
университет имени Т.Ф. Горбачева»,  
650000, г. Кемерово, Россия

### ЕРМАКОВА И.А.

Доктор техн. наук, профессор,  
профессор кафедры математики  
ФГБОУ ВО «Кузбасский  
государственный технический  
университет имени Т.Ф. Горбачева»,  
650000, г. Кемерово, Россия

### ИСАЧЕНКО А.А.

Канд. техн. наук,  
заместитель главного  
инженера по технологии  
Филиал шахты «Ерунаковская –VIII»  
АО «ОУК ЮЖКУЗБАССУГОЛЬ»  
654000, Новокузнецк, Россия

на для оценки прочностного состояния предохранительных целиков на шахте им. А.Д. Рубана АО «СУЭК-Кузбасс» на основе разработанной авторами методики [2].

Рассматривается вертикальное сечение по простирающую пласта в средней части лавы 48-8. В этом сечении продольные смещения пород вдоль лавы отсутствуют, поэтому вмещающие породы и пласт находятся в состоянии плоской деформации. В этом сечении выделяется расчетная область со следующими размерами: по 100 м влево и вправо от линии очистных работ; вверх – 665 м от кровли пласта 48; вниз – 200 м от почвы пласта. Площадь выделенной расчетной области составляла 177000 м<sup>2</sup>. Фрагмент расчетной области показан на *рис. 1*.

### РАСЧЕТНАЯ ОБЛАСТЬ

В расчетную область включены основные структурные блоки углепородного массива:

- 1 – пласт 48 мощностью 2,2 м;
- 2 – непосредственная кровля мощностью 10 м;
- 3 – основная кровля мощностью 20 м;
- 4 – вмещающие породы кровли мощностью 635 м;
- 5 – непосредственная почва мощностью 1,4 м;
- 6 – породы междупластья мощностью 3,0 м;
- 7 – нижележащий пласт 45 мощностью 1,6 м;
- 8 – вмещающие породы почвы мощностью 194 м;
- 9 – блок обрушенных пород в выработанном пространстве.

Его мощность определялась в соответствии с [3] с учетом мощности пласта 48 и коэффициента разрыхления обрушенных пород кровли (принят равным 1,2) и составила 13,2 м. Угол наклона массива обрушенных пород равен углу естественного откоса и составлял 38°;

10 – призабойное пространство лавы 48-8 с механизированной крепью BUCYRUS 1300/2800.

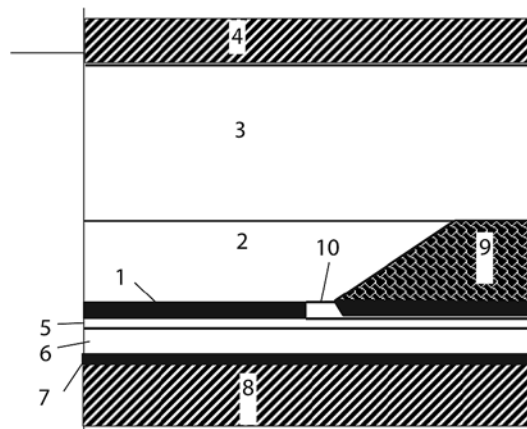
### ДЕФОРМАЦИОННЫЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Деформационные и прочностные характеристики структурных блоков, по данным НЦ «ВостНИИ», приведены в *табл. 1*.

**Деформационные и прочностные характеристики структурных блоков**

Deformation and strength characteristics of the structural blocks

Структурный блок	Мощность, м	Модуль деформаций, МПа·10 <sup>-3</sup>	Коэффициент поперечных деформаций	Предел прочности на сжатие, МПа
Породы кровли	635	36	0,23	43
Основная кровля	20	39	0,22	60
Непосредственная кровля	10	33	0,26	39
Пласт 48	2,2	9	0,25	10
Обрушенные породы	13,2	20	0,30	35
Непосредственная почва	1,4	33	0,28	39
Породы междупластья	3,0	36	0,26	43
Пласт 45	1,5	9	0,25	10
Породы почвы	194	36	0,26	43



*Рис. 1. Фрагмент расчетной области: 1 – пласт 48; 2 – непосредственная кровля; 3 – основная кровля; 4 – вмещающие породы кровли; 5 – непосредственная почва; 6 – породы междупластья; 7 – пласт 45; 8 – вмещающие породы почвы; 9 – блок обрушенных пород в выработанном пространстве; 10 – призабойное пространство с механизированной крепью*

*Fig. 1. A fragment of the calculation area: 1 – Layer 48; 2 – immediate roof; 3 – main roof; 4 – roof surrounding rocks; 5 – immediate floor; 6 – parting rocks; 7 – Layer 45; 8 – floor surrounding rocks; 9 – block of the rocks caved into the mined-out space; 10 – face area with powered roof support*

### НАГРУЗКИ И ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

Структурные блоки нагружены объемным весом следующим образом:

- вмещающие породы (блоки 4 и 8) – 2540 Н/м<sup>3</sup>;
- пласты 48 и 45 (блоки 1 и 7) – 1350 Н/м<sup>3</sup>;
- обрушенные породы выработанного пространства (блок 9) – 2200Н/м<sup>3</sup>.

Граничные условия:

- верхняя граница (дневная поверхность) свободна от напряжений;
- на левой, правой и нижней границах, достаточно удаленных от лавы, нормальные смещения и касательные напряжения отсутствуют;

*Таблица 1*

- верхнее перекрытие механизированной крепи взаимодействует с кровлей, создавая отпор, равный сопротивлению крепи 1 МПа [3];
- давление крепи на почву – 2 МПа.

### СЕТКА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Сетка конечных элементов задавалась автоматически. Число узлов сетки выбиралось таким образом, чтобы дальнейшее увеличение числа узлов давало бы незначительное уточнение значений напряжений и смещений. Число узлов в проведенных расчетах находилось в пределах (2-5) · 10<sup>5</sup>, так что на 1 м<sup>2</sup> приходилось два узла сетки в среднем. На *рис. 2* представлена сетка конечных элементов во всей расчетной области; в центральной части расчетной области; в окрестности лавы.

При приближении к призабойному пространству узлы сетки сгущались (см. рис. 2, в), достигая длины ребра конечного элемента, равной 0,01 м.

Время счета одного варианта задачи находилось в пределах 2-8 мин.

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ПОДВИГАНИЯ ОЧИСТНЫХ РАБОТ НА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА ПРИ ОТРАБОТКЕ ЛАВЫ № 48-8**

1. Последующий шаг обрушения основной кровли  $r_1^0$  рассчитывался в соответствии с [3] по формуле:

$$r_1^0 = 10,5\sqrt{V}(1 + \sin \alpha)e^{-0,7\frac{h_p}{F_{кр}^0}} \quad (1)$$

где  $V$  – скорость подвигания очистного забоя; м/сут;  $\alpha$  – угол залегания пласта,  $\alpha = 11^\circ$ ;  $h_p$  – высота зоны активного расслоения пород кровли,  $h_p = 1,76$ ;  $F_{кр}^0$  – средневзвешенный коэффициент крепости основной кровли,  $F_{кр}^0 = 4,62$ .

В табл. 2 приведены расчетные значения шага обрушения основной кровли  $r_1^0$  для различной скорости подвигания очистных работ  $V$ , время добычных работ  $T_{доб}$ , время ремонтной смены  $T_{рем}$ , время отработки пласта  $T$  до последующей посадки кровли. При этом  $T = T_{доб} + T_{рем}$ . Учитывалось, что время ремонтной смены составляет 1/6 сут.

2. После очередного обрушения основной кровли напряженное состояние углепородного массива обновляется, то есть носит циклический характер. За время отработки лавы на длину шага обрушения основной кровли происходит релаксация предела прочности угля на сжатие [4, 5, 6]. Предел прочности угля через промежуток времени  $t$  (суток) определяется по формуле:

$$\sigma_{сж}(t) = \sigma_{сж} \cdot e^{-\frac{t}{t_0}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{сж} = 10$  МПа,  $t_0 = 3,75$ .

3. Прочностное состояние угольного пласта определяется распределением в пласте критических значений его предела прочности на сжатие. Так как разрушение краевой части пласта происходит за счет сжатия, то для оцен-

Таблица 2

**Расчетные значения шага обрушения основной кровли при различной скорости подвигания очистных работ и время отработки пласта до последующей посадки кровли**

Calculated values of the main roof caving step at various face advance rates and the time of seam extraction before the subsequent roof caving

$V, \text{ м/сут}$	$r_1^0, \text{ м}$	$T_{доб}, \text{ сут.}$	$T_{рем}, \text{ сут.}$	$T, \text{ сут.}$
3	10,4	3,45	0,51	3,96
4	12,0	3,0	0,51	3,51
5	13,4	2,68	0,34	3,02
6	14,6	2,43	0,34	2,77
7	15,8	2,25	0,34	2,59

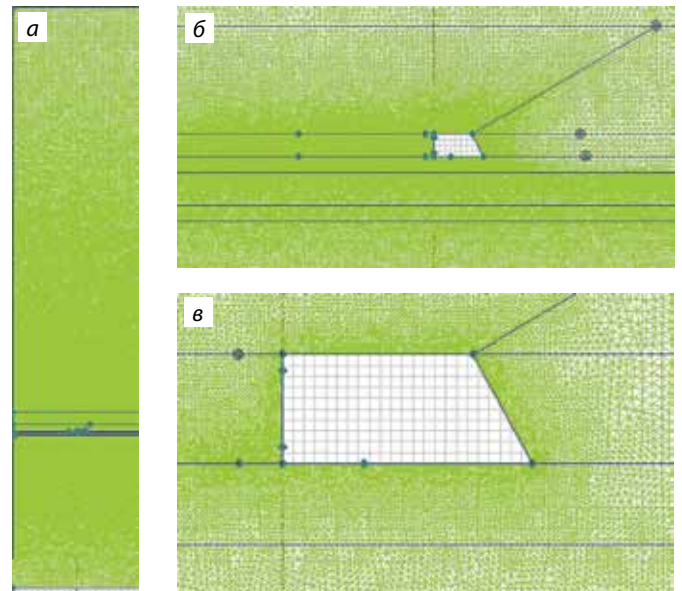


Рис. 2. Сетка конечных элементов: а – всей расчетной области; б – центральной части расчетной области; в – углепородного массива в окрестности лавы

Fig. 2. Finite element grid: а – the whole calculation area; б – the central part of the calculation area; в – the carbonaceous mass in the longwall vicinity

ки прочностного состояния пласта используется критерий прочности [7] в следующем виде:

$$\sigma_{сж}^{пл} = \gamma H + \frac{\sigma_{сж}}{1 + \nu}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности угля на одноосное сжатие;  $\nu$  – коэффициент поперечных деформаций угля;  $\gamma$  – средневзвешенный объемный вес пород кровли;  $H$  – глубина залегания пласта.

При заданных значениях этих характеристик:  $\sigma_{сж} = 10$  МПа;  $\nu = 0,25$ ;  $\gamma = 2540$  Н/м<sup>2</sup>;  $H = 665$  м найдена величина  $\sigma_{сж}^{пл} = 24,625$  Мпа.

В области пласта, где значения вертикальных напряжений превышают предел прочности пласта, пласт теряет свои прочностные свойства.

4. Потеря прочности краевой части пласта определяется переходом в разупрочненное состояние всей краевой части пласта, что приводит к вывалам угля и куполообразованию в кровле.

**ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

Для установления влияния скорости подвигания очистных работ на прочностное состояние краевой части пласта 48 была проведена серия численных экспериментов.

Прочностное состояние краевой части угольного пласта при подвигании лавы со скоростью 3 м/сут. приведено на рис. 3.

На рис. 3 фиолетовым цветом представлена зона разупрочнения краевой части пласта. Размер этой зоны увеличивается с подвиганием очистных работ, и через трое суток наблюдается полное разупрочнение краевой части пласта. При этом длина очистной выемки составила 9 м. Значение шага обрушения основной кровли для указан-



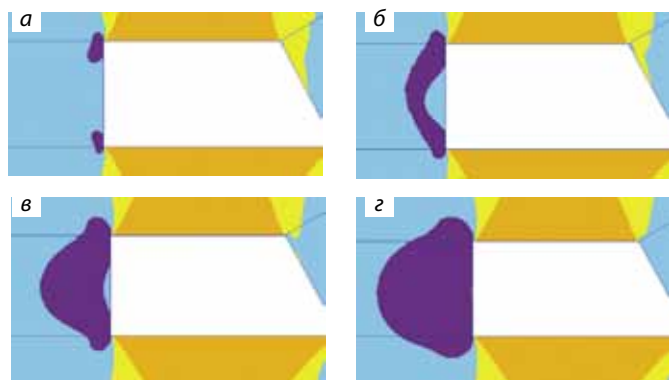


Рис. 3. Прочностное состояние краевой части пласта 48 при скорости подвигания лавы 3 м/сут.: а – после посадки основной кровли; б – через одни сутки подвигания лавы; в – через двое суток; г – через трое суток

Fig. 3. The strength state of the near edge part of Layer 48 at face advance speed of 3 m/day: а – upon the main roof caving; б – in one day upon the face advance; в – in two days; г – in three days

Таблица 3

**Предельные значения подвигания лавы  $L_{пред}$**

Limit values of face advance  $L_{limit}$

$V, \text{ м/сут.}$	3	4	5	6	7
$L_{пред}, \text{ м}$	7,5	11,0	13,75	16,5	19,25
$r_1^0, \text{ м}$	10,4	12,0	13,4	14,6	15,8

ной скорости составляет 10,4 м. Таким образом, невозможно достигнуть подвигания лавы на 10,4 м без полного разупрочнения краевой части пласта.

Рассчитано, что при скорости подвигания лавы, равной 3 м/сут., безопасное подвигание лавы возможно только на 7,5 м. Эта величина названа предельной длиной подвигания лавы  $L_{пред}$ . Дальнейшая отработка пласта будет связана с устранением последствий обрушения его краевой части.

Аналогично были проведены расчеты для скоростей подвигания лавы через каждые шесть часов работы лавы для  $V = 4, 5, 6, 7$  м/сут. В табл. 3 приведены предельные значения подвигания лавы  $L_{пред}$  для рассматриваемого диапазона скоростей.

В табл. 3 розовым цветом выделены скорости подвигания лавы, при которых отработка лавы сопряжена с разупрочнением угля и вывалообразованием кровли. Желтым цветом выделена скорость, при которой достигается сохранение прочностного состояния краевой части пласта, при этом предельное значение подвигания лавы ненамного меньше шага последующего обрушения кровли. Голубой цвет соответствует скоростям подвигания лавы, обеспечивающим сохранение устойчивости краевой части пласта.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ**

Таким образом, на основе проведенного моделирования НДС углепородного массива и опыта отработки пласта 48 можно сделать следующие выводы.

1. Изменение геомеханического состояния массива угля и пород в очистном забое при скорости подвигания 1-2 м/сут. создает предпосылки к формированию куполов кровли, вывалов угля пласта 48 и пород кровли.

2. При скорости подвигания очистного забоя менее 1 м/сут. прогнозируются повышенная трещиноватость, высокие риски формирования куполов и отслоения угля и пород.

3. Из опыта работы шахты «Ерунаковская» следует, что минимальная безопасная скорость подвигания очистного забоя 2,4 м/сут. (3 стружки по 0,8 м), при которой обеспечивается устойчивое геомеханическое состояние без повышенной трещиноватости массива пород очистного забоя, и при соблюдении технологии ведения горных работ имеются незначительные риски формирования куполов и вывалов, что близко к результатам математического моделирования геомеханической ситуации в лаве № 48-8.

**Список литературы**

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975.
2. Пириева Н.Н. Установление размеров зон разрушения в предохранительных целиках при разработке пологих угольных пластов: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 25.00.20 / Пириева Наталья Николаевна; [Место защиты: Кузбас. гос. техн. ун-т]. Кемерово, 2017. 22 с.
3. Документация по выемке угля, креплению и управлению кровлей в выемочном участке 48-8. Новокузнецк, 2021. 143 с.
4. Литвинский Г.Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов. Донецк: Норд-пресс, 2008. 207 с.
5. Литвинский Г.Г. Закономерности длительной прочности горных пород // Проблемы горного давления. 2015. № 1. С. 94-106.
6. Глушко В.Т., Виноградов В.В. Разрушение горных пород и прогнозирование проявлений горного давления. М.: Недра, 1982. 192 с.
7. Гоголин В.А. Деформационные и прочностные характеристики хрупких горных пород при сжатии // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 3. С. 3-8.
8. Gass N., Tabarrok B. Large deformation analysis of plates cylindrical shells by a mixed finite element method // Int. J. Numer. Meth. Eng. 1976. Vol. 10. No 4. P. 731-746.
9. Gellert M., Laursen M.E. A new high-precision stress finite element for analysis of shell structures // Int. J. Solids and Struct. 1977. Vol. 13. No 7. P. 683-697.
10. Gran C.S., Yang T.J. Doubly curved membrane shell finite element // J. Eng. Mech. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng. 1979. Vol. 105. No 4. P. 567-584.
11. Han K.J., Gould P.L. Shells of revolution with local deviations // Int. J. Numer. Meth. Eng. 1984. Vol. 20. No 2. P. 305-313.
12. Haugeneder E. A new penalty function element for thin shell analysis // Numerical Meth. in Eng. 1982. Vol. 18. No 6. P. 845-861.
13. Herpai B., Paczely I. Analysis of axisymmetrically deformed shells by the finite element displacement method // Acta techn. Acad. Sci. hung. 1977. Vol. 85. No 1-2. P. 93-122.
14. Hindenlang U. The TRUMP family of shell elements // ISD. Rept. Vol. 1978. No 239. P. 11-17.
15. Hsiao Kuo-Mo, Hung Hung Chan. Large deflection analysis of shell structure by using corotational toallagrangian formulation // Comput. Meth. Appl. Mech. and Eng. 1989. Vol. 73. No 2. P. 209-225.
16. Jones Rembert F.Jr. A curved finite element for general thin shell structures // Nucl. Eng. And Des. 1978. Vol. 48. No 2-3. P. 415-425.
17. Jones D.P., Holliday J.E., Larson L.D. Elastic plastic dailure analysis of pressure burst tests toroidal shells // Trans. ASME. J. Pressure Vessel Technol. Vol. 1999. Vol. 121, No 2. P. 149-153.
18. Kemp B.L., Chahngmin Cho, Sung W.L. A foirnode solid shell element formulation with assumed strain // Jut. J. Numer. Meth. Eng. 1998. Vol. 43. No 5. P. 909-924.

19. Kikuchi F., Ohya H., Yoshi 'O. Application of finite element method to axisymmetric buckling of shallow spherical shells under external pressure // *J. Nucl. Sci. and Technol.* 1973. Vol. 10. No 6. P. 339-347.
20. Kikuchi F. On the validity of an approximation available in the finite element shell analysis // *Comput. and Struct.* 1975. Vol. 5. No 1. P. 1-8.
21. Khan A.Q., Mufti A.A., Harris P.J. Postbuckling of thin plates and shells / *Var. Meth. Eng. Vol. 2. Proc. Int. Conf, Univ Southampton.* 1972. Southampton. 1973. 7/54-7/65. Discuss. 7/124.
22. Lakshmiarayanga H.V. Finite element analysis of laminated composite shells functions // *Comput. and Struct.* 1976. Vol. 8. No 1. P. 11-15.
23. Lannoy F.G. Triangular finite elements and numerical integration // *Comput. Struct.* 1977. Vol. 7. P. 613-625.
24. Lindberg G.M., Olson M.D. A high-precision triangular cylindrical shell finite element // *AIAA. J.* 1971. Vol. 9. P. 530-542.
25. Lo S.H. 3D mesh refinement in compliance with a specified node spacing function // *Mechanics.* 1998. No 21. P. 11-19.

## UNDERGROUND MINING

## Original Paper

UDC 622.831.322 © V.V. Sementsov, V.A. Gogolin, I.A. Ermakova, A.A. Isachenko, 2023  
 ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2023, № 4, pp. 37-41  
 DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-4-37-41>

## Title

**INFLUENCE OF THE RATE OF MOVEMENT OF THE TREATMENT FACE DURING THE DEVELOPMENT OF THE EXCAVATION SITE AT 48-8 OF THE YERUNAKOVSKAYA –VIII MINE BRANCH OF YUZHKUZBASSUGOL JSC ON THE CHANGE IN THE STATE OF THE NEAR-CONTOUR GEOMASS AFFECTING THE DEVELOPMENT OF EMERGENCY SITUATIONS**

## Authors

Sementsov V.V.<sup>1</sup>, Gogolin V.A.<sup>2</sup>, Ermakova I.A.<sup>2</sup>, Isachenko A.A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> JSC "NC VostNII", Kemerovo, 650002, Russian Federation

<sup>2</sup> T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU), Kemerovo, 650000, Russian Federation

<sup>3</sup> "Yerunakovskaya-VIII" Mine branch "Yuzhkuzbassugol" JSC, Novokuznetsk, 654000, Russian Federation

## Authors Information

**Sementsov V.V.**, PhD (Engineering), Head of the Laboratory of Mining Geomechanics, e-mail: [v.sementsov@nc-vostnii.ru](mailto:v.sementsov@nc-vostnii.ru)

**Gogolin V.A.**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of the Department of Mathematics

**Ermakova I.A.**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of the Department of Mathematics

**Isachenko A.A.**, PhD (Engineering), Deputy Chief Technology Engineer

## Abstract

The article presents the results of modeling the stress-strain state of the carboniferous mass in the lava 48-8 of the Yerunakovskaya-VIII mine branch and the effect of the speed of movement of the treatment face on the development of emergency situations in the lava working out the formation 48. The problem was solved by the finite element method taking into account the physico-mechanical properties of coal and the host rocks of the roof and soil of the formation. Based on the results of modeling and experience of cleaning operations on reservoir 48, the minimum speed of lava movement was found, at which no domes are formed in the cleaning space and no emergency situations occur.

## Keywords

Stress-strain state, Cleaning works, Dome formation, Emergency situations, Optimal moving speeds.

## References

1. Zenkevich O. The finite element method in engineering. Moscow, Mir Publ., 1975. (In Russ.).
2. Pirieva N.N. Determination of fracture zones in safety pillars during mining of flat coal seams. Abstract of thesis for Cand. eng. sci. diss. 25.00.20 / Pirieva Natalia Nikolaevna; [Place of viva examination: Gorbachev Kuzbass State Technical University], Kemerovo, 2017, 22 p. (In Russ.).
3. Documentation on coal extraction, roof support and control at mining site 48-8. Novokuznetsk, 2021, 143 p. (In Russ.).
4. Litvinsky G.G. Analytical theory of rock and rock mass strength. Donetsk: Nord-Press Publ., 2008, 207 p. (In Russ.).
5. Litvinsky G.G. Long-term strength patterns of rocks. *Problemy gornogo daveniya*, 2015, (1), pp. 94-106. (In Russ.).
6. Glushko V.T. & Vinogradov V.V. Failure of rocks and prediction of rock pressure manifestations. Moscow, Nedra Publ., 1982, 192 p. (In Russ.).
7. Gogolin V.A. Deformation and strength characteristics of very brittle rocks under compression. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, (3), pp. 3-8. (In Russ.).
8. Gass N. & Tabarrok B. Large deformation analysis of plates cylindrical shells by a mixed finite element method. *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 1976, Vol. 10, (4), pp. 731-746.
9. Gellert M. & Laursen M.E. A new high-precision stress finite element for analysis of shell structures. *Int. J. Solids and Struct.*, 1977, Vol. 13. (7), pp. 683-697.
10. Gran C.S. & Yang T.J. Doubly curved membrane shell finite element. *J. Eng. Mech. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng.*, 1979. Vol. 105, (4), pp. 567-584.

11. Han K.J. & Gould P.L. Shells of revolution with local deviations. *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 1984, Vol. 20, (2), pp. 305-313.

12. Haugeneder E. A new penalty function element for thin shell analysis. *Numerical Meth. in Eng.*, 1982, Vol. 18, (6), pp. 845-861.

13. Herpai B. & Paczef I. Analysis of axisymmetrically deformed shells by the finite element displacement method. *Acta techn. Acad. Sci. hung.*, 1977, Vol. 85, (1-2), pp. 93-122.

14. Hindenlang U. The TRUMP family of shell elements. *ISD. Rept.* 1978, (239), pp. 11-17.

15. Hsiao Kuo-Mo & Hung Hung Chan. Large deflection analysis of shell structure by using corotational toallagrangian formulation. *Comput. Meth. Appl. Mech. and Eng.*, 1989, Vol. 73, (2), pp. 209-225.

16. Jones Rembert F.Jr. A curved finite element for general thin shell structures. *Nucl. Eng. And Des.*, 1978, Vol. 48, (2-3), pp. 415-425.

17. Jones D.P., Holliday J.E. & Larson L.D. Elastic plastic daillure analysis of pressure burst tests toroidal shells. *Trans. ASME. J. Pressure Vessel Technol.*, 1999, Vol. 121, (2), pp. 149-153.

18. Kemp B.L., Chahngmin Cho & Sung W.L. A foirnode solid shell element formulation with assumed strain. *Jut. J. Numer. Meth. Eng.*, 1998, Vol. 43, (5), pp. 909-924.

19. Kikuchi F., Ohya H. & Yoshi 'O. Application of finite element method to axisymmetric buckling of shallow spherical shells under external pressure. *J. Nucl. Sci. and Technol.*, 1973, Vol. 10, (6), pp. 339-347.

20. Kikuchi F. On the validity of an approximation available in the finite element shell analysis. *Comput. and Struct.*, 1975, Vol. 5, (1), pp. 1-8.

21. Khan A.Q., Mufti A.A. & Harris P.J. Postbuckling of thin plates and shells. *Var. Meth. Eng. Vol. 2. Proc. Int. Conf, Univ Southampton*, 1972. Southampton, 1973, 7/54-7/65, Discuss. 7/124.

22. Lakshmiarayanga H.V. Finite element analysis of laminated composite shells functions. *Comput. and Struct.*, 1976, Vol. 8, (1), pp. 11-15.

23. Lannoy F.G. Triangular finite elements and numerical integration. *Comput. Struct.*, 1977, (7), pp. 613-625.

24. Lindberg G.M. & Olson M.D. A high-precision triangular cylindrical shell finite element. *AIAA. J.*, 1971, (9), pp. 530-542.

25. Lo S.H. 3D mesh refinement in compliance with a specified node spacing function. *Mechanics*, 1998, (21), pp. 11-19.

## For citation

Sementsov V.V., Gogolin V.A., Ermakova I.A. & Isachenko A.A. Influence of the rate of movement of the treatment face during the development of the excavation site at 48-8 of the Yerunakovskaya-VIII mine branch of Yuzhkuzbassugol JSC on the change in the state of the near-contour geomass affecting the development of emergency situations. *Ugol'*, 2023, (4), pp. 37-41. (In Russ.). DOI: [10.18796/0041-5790-2023-4-37-41](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-4-37-41).

## Paper info

Received February 22, 2023

Reviewed February 25, 2023

Accepted March 27, 2023