

## Разработка модели для численного исследования напряженно-деформированного состояния геомассива при движении очистного забоя

*Л.Д. Павлова, Е.С. Корнев, А.В. Корнева*

*Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк*

**Аннотация:** Для численного исследования напряженно-деформированного состояния краевых участков угольного пласта в зоне влияния системы горных выработок разработана математическая модель процессов деформирования геомассива, которая формулируется в виде краевой задачи теории упругости.

Поставленная задача решалась методом конечных элементов в вариационной постановке, при которой выполняется минимизация функционала полной потенциальной энергии для определения перемещений в узлах элементов.

Вычислительные эксперименты проводились с использованием авторского комплекса программ. По результатам численного моделирования разработаны рекомендации по упрочнению угольного целика, определению несущей способности крепи.

Применение разработанной математической модели и комплекса программ позволяет на стадии разработки проектной документации прогнозировать напряженно-деформированное состояние геомассива в зоне влияния системы подземных горных выработок.

**Ключевые слова:** математическая модель, численное моделирование, вычислительный эксперимент, комплекс программ.

В современных рыночных условиях горнодобывающие предприятия, которые приобрели дорогостоящую горную технику, стремятся максимально ее использовать, сокращая сроки подготовки и отработки выемочных участков, для повышения прибыли. Для этого в пределах шахтного поля на площади до 10 км<sup>2</sup> располагаются 1-2 очистных и 4-6 подготовительных забоев.

Одним из негативных факторов при реализации многозабойной системы подготовки и отработки свиты угольных пластов является возникновение и неравномерное распределение зон повышенного горного давления, концентраторов высоких напряжений и динамического разрушения угля и пород, что способствует повышению риска возникновения опасных производственных ситуаций в виде горных ударов, внезапных выбросов угля и обрушений пород кровли.

В этой связи прогноз геомеханического состояния массива горных пород в зоне влияния системы подземных горных выработок на основе результатов математического и численного моделирования является актуальной научной задачей.

Целью работы является разработка математической модели процессов деформирования геомассива для численного исследования напряженно-

деформированного состояния краевых участков угольного пласта и охранных целиков в зоне влияния системы подготовительных и очистных забоев.

Математическая модель напряженно-деформированного состояния геомассива строится на основе классических уравнений теории упругости [1-3] и формулируется в виде краевой задачи: для области исследования в форме параллелепипеда найти вектор перемещений  $\vec{U} = (u_x, u_y, u_z)$ , координаты которого  $u_x, u_y, u_z$  удовлетворяют системе дифференциальных уравнений (1) и однородным граничным условиям:  $u_x = 0$  и  $u_y = 0$  на верхнем и нижнем основаниях и боковых гранях;  $u_z = 0$  на нижнем основании; на верхнем основании вертикальные напряжения  $\sigma_z = 0$ .

$$\begin{aligned}(\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \mu \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) + F_x &= 0; \\(\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \mu \left( \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) + F_y &= 0; \\(\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \mu \left( \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) + F_z &= 0,\end{aligned} \quad (1)$$

где  $\mu$  и  $\lambda$  – параметры Ламе,  $\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$ ;  $\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$ ;  $E$  – модуль упругости;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\vec{F} = (F_x, F_y, F_z)$  – вектор сил.

Численные исследования процессов деформирования и разрушения горных пород в окрестности горных выработок на основе теории упругости, пластичности и ползучести с использованием методов математического и численного моделирования описаны в работа многих отечественных и зарубежных авторов [4-8].

В данной работе краевая задача теории упругости решается в трехмерной постановке методом конечных элементов. Расчетная область разбивается на подобласти элементами в форме тетраэдров, аппроксимация решения на каждом из которых выполняется посредством линейных

функций. Для определения узловых перемещений выполняется минимизация функционала полной потенциальной энергии и строится система линейных алгебраических уравнений. Величины перемещений используются для вычисления компонентов тензоров деформаций и напряжений.

В качестве объекта исследования выбран участок шахтного поля, имеющий следующие характеристики:

- угольный пласт: глубина залегания 400 м, мощность 2,7 м, угол падения  $0^\circ$ , коэффициент крепости угля по шкале М.М. Протоdjяконова  $f=1$ ;
- ложная кровля: мощность 2,0 м, сложена слабым аргиллитом, коэффициент крепости по шкале М.М. Протоdjяконова  $f=2$ ;
- основная кровля: мощность 15 м, сложена алевролитом от мелко- до крупнозернистого, коэффициент крепости по шкале М.М. Протоdjяконова  $f=5$ ;
- охранный целик между выемочными участками: ширина 20 м.

Расчетная схема для численного моделирования напряженно-деформированного состояния геомассива включает ранее отработанный выемочный участок 01, отрабатываемый выемочный участок 02, для которого стрелкой показано направление движения комплексно-механизированного забоя (КМЗ), подготовительные выработки и охранный целик между вентиляционным и дегазационным штреками (рис. 1).

Для проведения вычислительных экспериментов используется разработанный авторами комплекс программ, основанный на численном решении методом конечных элементов задач геомеханики в трехмерной постановке [9, 10].

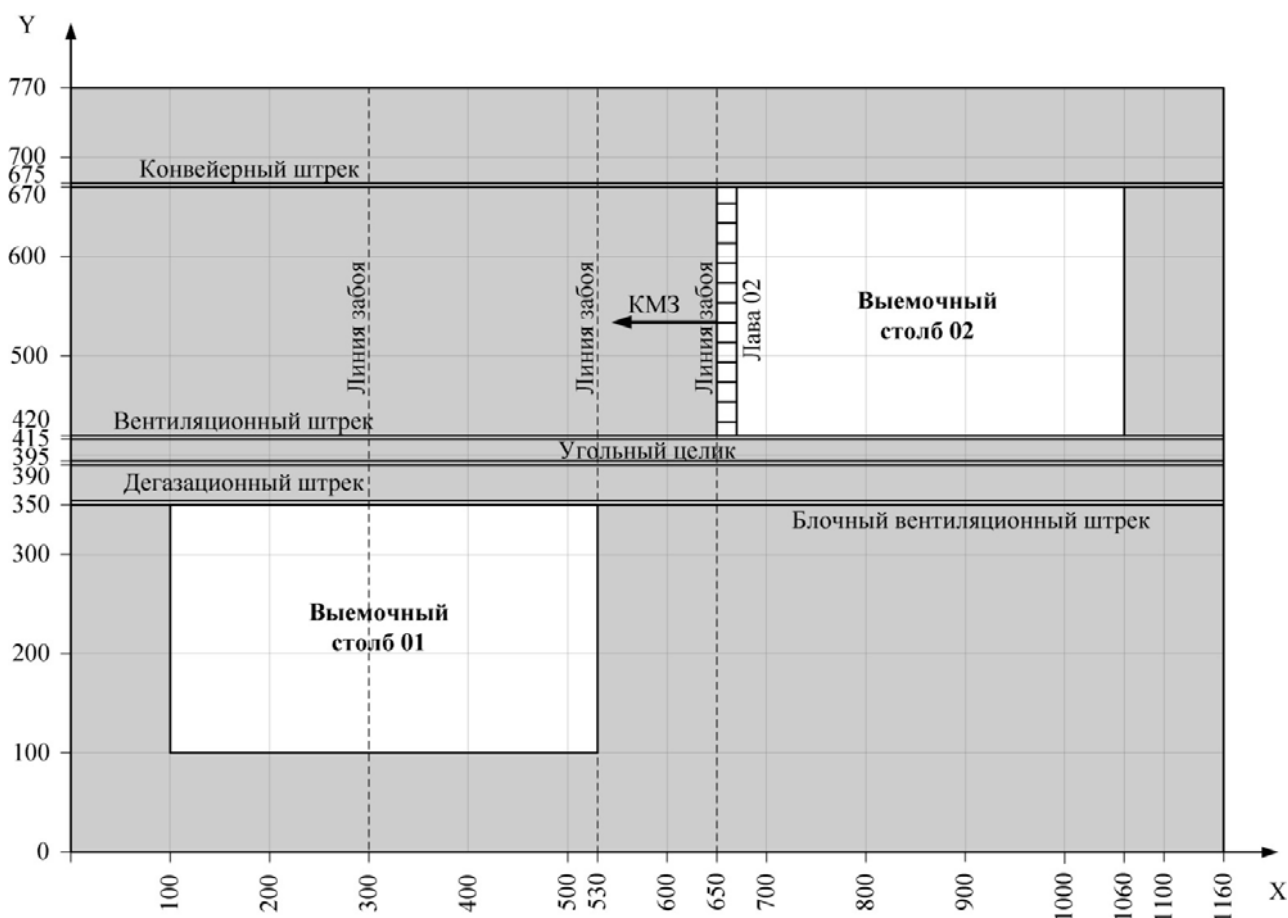


Рис. 1. – Расчетная схема модели геомассива

В процессе численного моделирования решались следующие задачи:

1. Определение характера распределения напряжений вдоль краевых участков угольного целика между вентиляционным и дегазационным штреками при движении очистного забоя 02.

2. Определение характера распределения коэффициента концентрации вертикальных напряжений в краевой части пласта вдоль лавы выемочного участка 02 с учетом положения очистного забоя относительно границ ранее отработанного участка 01.

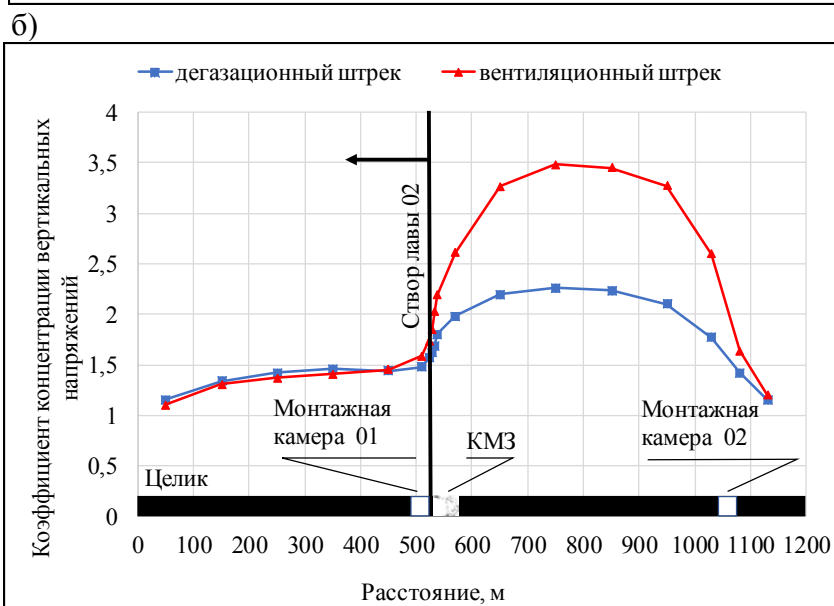
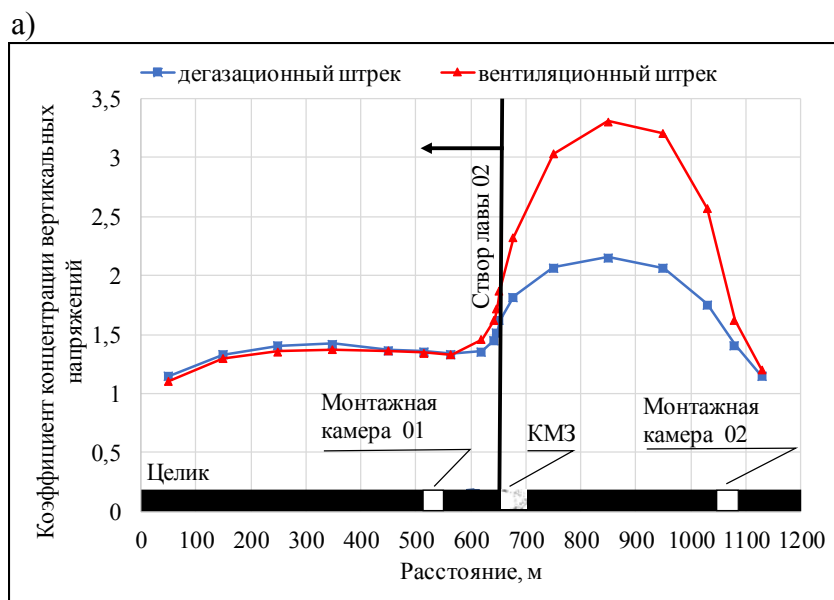
Вычислительные эксперименты проводилось при следующих положениях очистного забоя 02 (рис. 1):

– начальное ( $x=650$  м) – при отсутствии влияния ранее отработанного выемочного участка 01;

- промежуточное ( $x=530$  м) – в створе с границей ранее отработанного выемочного участка 01;
- конечное ( $x=300$  м) – в зоне полного влияния ранее отработанного выемочного участка 01.

Для решения первой задачи рассмотрено два вертикальных сечения: в зоне влияния дегазационного штрека ( $y=400$  м) и вентиляционного штрека ( $y=410$  м).

На рис. 2 приведены графики изменения коэффициента концентрации вертикальных напряжений в угольном целике при движении очистного забоя.



в)

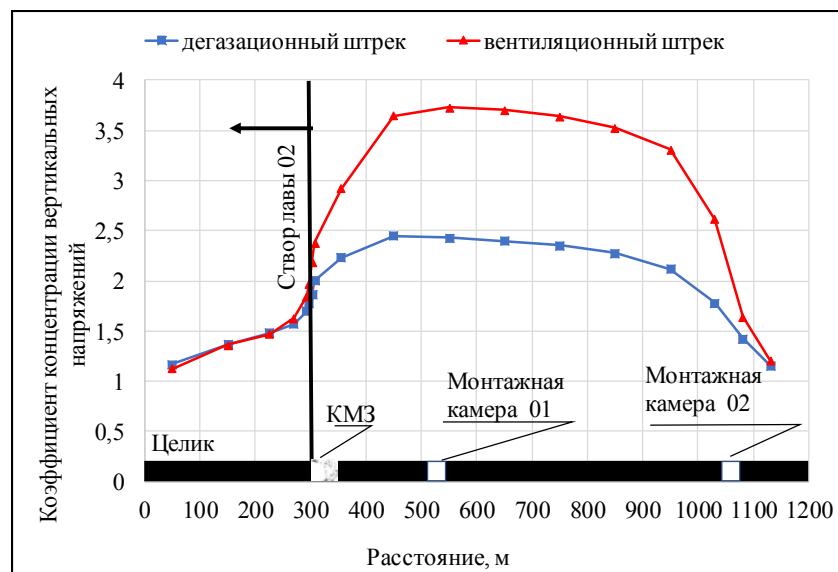


Рис. 2. – Графики изменения коэффициента концентрации вертикальных напряжений в угольном целике при движении очистного забоя:

а)  $x=650$  м; б)  $x=530$  м; в)  $x=300$  м

Из анализа графиков можно сделать вывод, что по мере приближения очистного забоя 02 к выработанному пространству выемочного участка 01 по обоим сечениям угольного целика коэффициент концентрации вертикальных напряжений постепенно увеличивается по линейной зависимости от размеров выработанного пространства. Максимальная величина коэффициента концентрации вертикальных напряжений в угольном целике составляет 3,7.

Результаты численного моделирования могут быть использованы для оценки устойчивости охранного целика между выемочными участками. Удельное давление зависящих пород кровли на угольный целик вычисляется по формуле

$$p = k_{max} \cdot \gamma \cdot H, \quad (2)$$

где  $k_{max}$  – максимальное значение коэффициента концентрации вертикальных напряжений;  $\gamma$  – плотность пород;  $H$  – глубина разработки.

При  $k_{max} = 3,7$ ,  $\gamma = 2,5$  т/м<sup>2</sup>,  $H = 400$  м  $p = 37$  МПа. Удельное сопротивление целика с прочностью угля  $\sigma_{сж}$  составит 10 МПа, то есть при условии  $p > \sigma_{сж}$  угольный целик в боках вентиляционного и газодренажного штреков будет разрушен.

Исходя из полученных результатов, для обеспечения устойчивости целика, рекомендуется упрочнение целика химическими смолами и проведение стратификации пород кровли с помощью гидроразрыва с целью снижения влияния веса зависающих пород кровли.

Для решения второй задачи рассмотрены вертикальные сечения ( $x = 650, 530, 300$  м) параллельные лаве отработываемого выемочного столба 02.

По результатам численного моделирования на рис. 3 приведены графики изменения коэффициента концентрации вертикальных напряжений в краевой части пласта вдоль лавы выемочного столба 02.

Согласно графикам рис. 2-3, наиболее неблагоприятная геомеханическая ситуация при отработке выемочного участка 02 наблюдается до подхода очистного забоя к створу с границей выработанного пространства участка 01. Максимальное значение коэффициента концентрации вертикальных напряжений 3,8 выявлено в середине лавы 02.

Согласно полученным результатам, рекомендуется при выборе типа и конструкции механизированной крепи очистного забоя определять несущую способность крепи с учетом давления зависающих пород кровли, которое вычисляется по формуле (2).

Коэффициент концентрации вертикальных напряжений в середине лавы возрастает по параболической зависимости от размера выработанного пространства. Величина коэффициента концентрации вертикальных напряжений на сопряжении лавы 02 и конвейерного штрека практически не зависит от размеров выработанного пространства и равна 1,11. На верхнем

---

сопряжении лавы 02 с вентиляционным штреком коэффициент концентрации вертикальных напряжений увеличивается в 2,3-2,6 раза пропорционально длине выработанного пространства столба 02 и расстояния до границы выемочного участка 01.

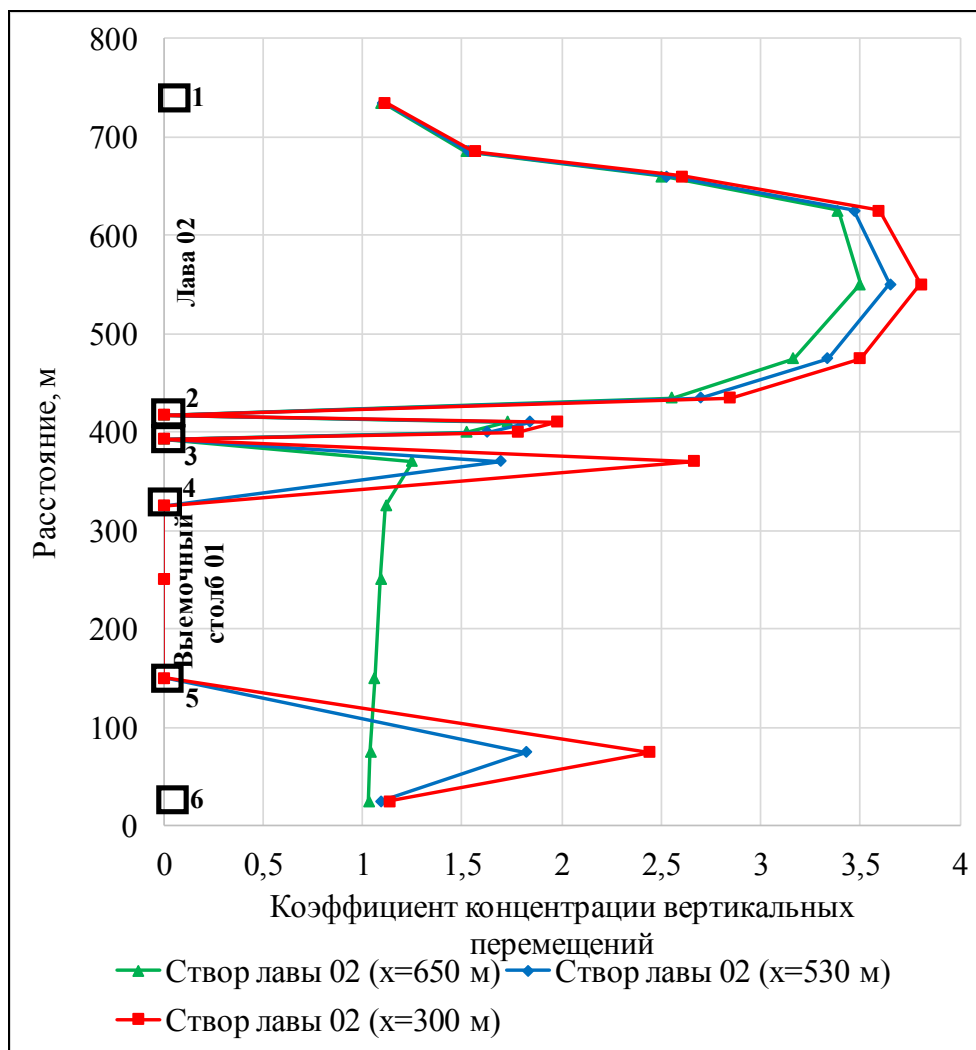


Рис. 3. – Графики изменения коэффициента концентрации вертикальных напряжений в краевой части пласта вдоль лавы 02

Исходя из полученных результатов, рекомендуется на нижнем сопряжении конвейерного штрека и лавы 02 вести горные работы без дополнительных мероприятий. На верхнем сопряжении предлагается



проводить усиление крепи, стратификацию пород кровли, подработанных в выемочном столбе 01 или упрочнение охранного угольного целика.

Таким образом, по результатам решения поставленных задач методом численного моделирования определены параметры напряженно-деформированного состояния массива горных пород в зоне влияния системы подземных горных выработок при движении очистного забоя, что позволило сформулировать рекомендации для обеспечения безопасных условий работ.

Применение разработанного метода численного исследования напряженно-деформированного состояния с учетом влияния соседних очистных и подготовительных выработок при движении очистного забоя обеспечивает возможность проводить прогноз геомеханического состояния массива горных пород на стадии разработки проектной документации.

Расширение области применения разработанной математической модели и комплекса программ позволяет прогнозировать объемы подземной угледобычи в Кузбассе на больших глубинах с учетом отработки в пределах одного шахтного поля двух и более выемочных участков.

### Литература

1. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1979. 560 с.
2. Писаренко Г.С., Можаровский Н.С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести. Киев: Наукова думка, 1981. 496 с.
3. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. 2 изд. М.: Высшая школа, 1968. 512 с.
4. Зенкевич О., Чанг И. Метод конечных элементов в теории сооружений и механике сплошных сред. М.: Недра, 1974. 173 с.
5. Yasitli N.E., Unver B. 3-D numerical modelling of stresses around a longwall panel with top coal caving // The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy. 2005. №105. P. 289-300.
6. Shen B., Stephansson O., Rinne M. Modelling Rock Fracturing Processes. A Fracture Mechanics Approach Using FRACOD. Dordrecht: Springer, 2014. 173 p.

7. Sainoki A., Mitri Hani S. Numerical investigation into pillar failure induced by time-dependent skin degradation // International Journal of Mining Science and Technology. 2017. №27. pp. 591–597.

8. Pavlova L.D. Three-dimensional computational model of block caving of undermined roof rocks of coal seam // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Gornyi Zhurnal. 2004. №5.

9. 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.

10. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №17997. Комплекс проблемно-ориентированных программ для моделирования геомеханических процессов в горном массиве при подземной разработке угольных пластов / Корнев Е.С., Павлова Л.Д., Фрянов В.Н. ФГБОУ ВПО Сиб. гос. индустр. ун-т. – Гос. акад. наук, ИНИПИ РАО, ОФЭРНиО; Дата регистр. 01.03.2012.

## References

1. Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. Teoriya uprugosti [Theory of elastic strength]. M.: Nauka, 1979. 560 p.

2. Pisarenko G.S., Mozharovskiy N.S. Uravneniya i kraevye zadachi teorii plastichnosti i polzuchesti [Equations and boundary value problems of the theory of plasticity and elasticity]. Kiev: Naukova dumka, 1981. 496 p.

3. Bezukhov N.I. Osnovy teorii uprugosti, plastichnosti i polzuchesti [Fundamentals of the theory of elastic strength, plasticity and elasticity]. 2 izd. M.: Vysshaya shkola, 1968. 512 p.

4. Zenkevich O., Chang I. Metod konechnykh elementov v teorii sooruzheniy i mekhanike sploshnykh sred [The finite element method in the structural theory and continuum mechanics]. M.: Nedra, 1974. 173 p.

5. Yasitli N.E., Unver B. The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy. 2005. №105. pp. 289-300.

6. Shen B., Stephansson O., Rinne M. Modelling Rock Fracturing Processes. A Fracture Mechanics Approach Using FRACOD. Dordrecht: Springer, 2014. 173 p.

7. Sainoki A., Mitri Hani S. International Journal of Mining Science and Technology. 2017. №27. pp. 591–597.

8. Pavlova L.D. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Gornyi Zhurnal. 2004. №5.

---



9. Kornev E.S., Pavlova L.D., Fryanov V.N. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2013. №2. pp. 65–69.

10. Svidetel'stvo o registratsii elektronnoho resursa №17997. Kompleks problemno-orientirovannykh programm dlya modelirovaniya geomekhanicheskikh protsessov v gornom massive pri podzemnoy razrabotke ugol'nykh plastov. Kornev E.S., Pavlova L.D., Fryanov V.N., FGBOU VPO Sib. gos. industr. un-t. Gos. akad. nauk, INIPI RAO, OFERNiO; Data registr. 01.03.2012.