

---

## Моделирование напряженно-деформированного состояния геомассива для определения положения локальных концентраторов напряжений в отработываемом угольном пласте

Л.Д. Павлова<sup>1</sup>, А.А. Черепов<sup>2</sup>, Е.С. Корнев<sup>1</sup>, А.В. Корнева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк

<sup>2</sup>Распадская угольная компания, Новокузнецк

**Аннотация:** Статья посвящена решению актуальной задачи прогнозирования опасных зон ведения горных работ посредством определения положения локальных концентраторов напряжений в отработываемом угольном пласте. Актуальность данной задачи подтверждается тем, что интенсификация процессов горного производства неизбежно ведет к увеличению риска возникновения опасных производственных ситуаций, таких как горные удары, внезапные выбросы угля и породы и др. Наиболее опасными зонами проявления горного давления являются выступы краевых участков угольного пласта, пересечения и сопряжения выработок. Противоударные мероприятия, регламентированные нормативными документами, не всегда оказываются достаточно эффективными.

Для решения поставленной задачи предложен подход, который позволяет оперативно определять положение локальных концентраторов напряжений с учетом влияния выработанного пространства. Авторами разработана интеграционная сетка, при построении которой деление всей площади на элементарные участки выполняется таким образом, чтобы влияние веса пород кровли над каждым участком было одинаковым. Для реализации такого подхода вводятся функции влияния выработанного пространства в виде уравнения эпюры опорного горного давления. На основе результатов численного моделирования напряженно-деформированного состояния геомассива получена экспоненциальная зависимость, позволяющая определять коэффициент концентрации вертикальных напряжений для точек на эпюре опорного горного давления. По величинам вертикальных напряжений, рассчитанных для каждой точки интеграционной сетки, возможно прогнозировать напряженно-деформированное состояние геомассива и обосновывать необходимость проведения противоударных мероприятий.

Применение предложенного подхода позволит оперативно осуществлять прогнозирование опасных зон и существенно сократить затраты на проведение противоударных мероприятий.

**Ключевые слова:** моделирование, геомассив, угольный пласт, интеграционная сетка, прогнозирование, вертикальные напряжения.

Подземная отработка склонных к горным ударам угольных пластов на больших глубинах, а также увеличение скорости подвигания забоев приводят к росту риска возникновения горных ударов и снижению эффективности регламентированных нормативными документами противоударных мероприятий. Кроме того, при каждом цикле подземной выемки угля, на

период проведения профилактических противоударных мероприятий, возникает необходимость остановки очистных и подготовительных забоев.

Как отмечается в работах российских ученых [1-3], а также исследованиях зарубежных авторов [4, 5], такие зоны, как пересечения и сопряжения выработок, краевые участки пласта, являются наиболее опасными для проявления горных ударов, поэтому в пределах отрабатываемого пласта следует учитывать топологию всех горных выработок при определении участков с максимальными вертикальным напряжениями и их пространственного положения.

В этой связи моделирование напряженно-деформированного состояния геомассива для оперативного определения положения локальных концентраторов напряжений в удароопасном угольном пласте с учетом влияния выработанного пространства является актуальной научной задачей.

Для учета влияния очистного выработанного пространства  $S_b$  на распределение вертикальных напряжений в окрестности горной выработки используется подход, предложенный в [6], согласно которому площадь выработанного пространства делится на элементарные участки  $S_j$ , положение которых определяется полярными координатами  $r_j$  и  $\theta_j$  (рис. 1).

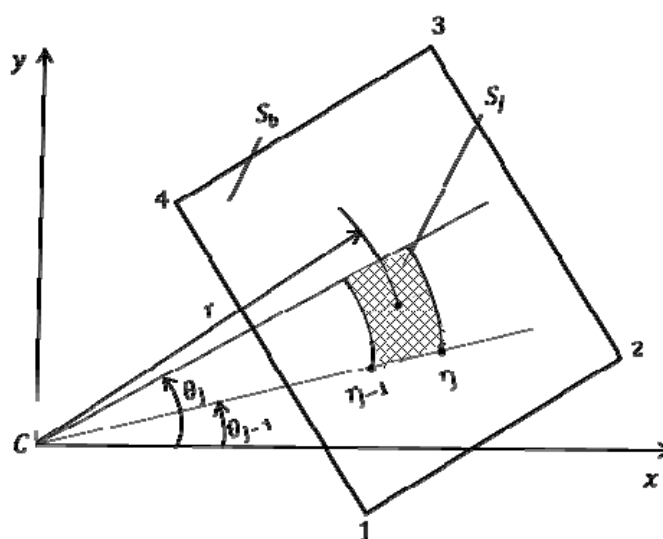
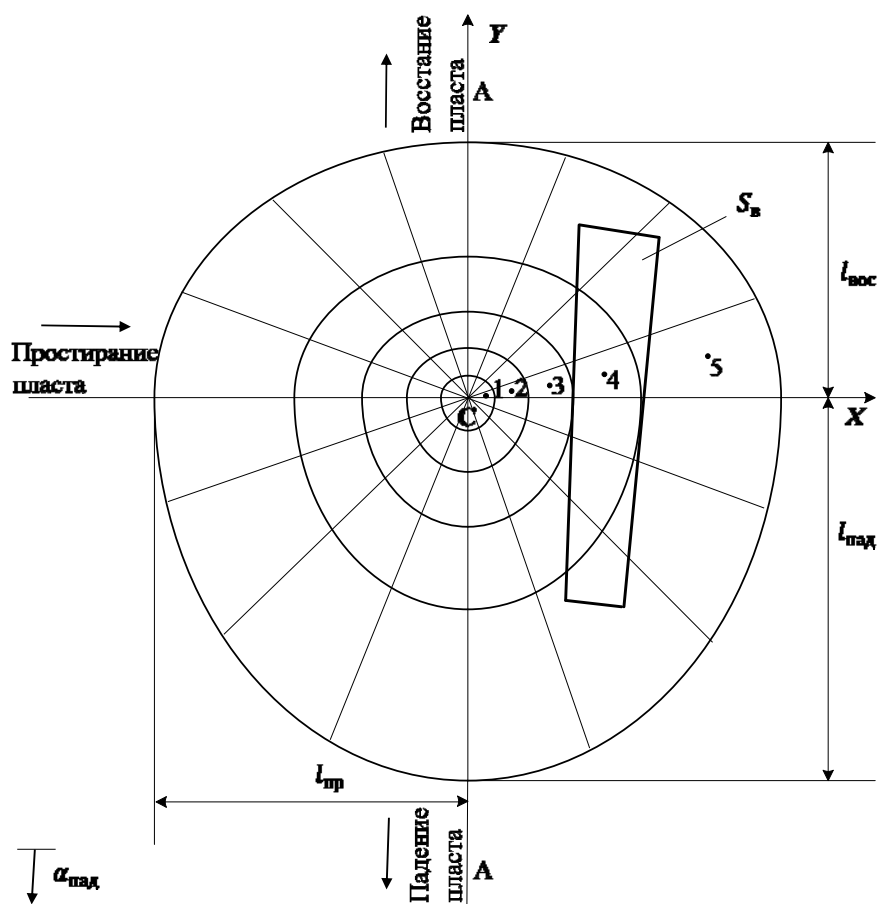


Рис. 1. – Схема деления площади выработанного пространства в окрестности точки  $C$  на элементарные участки [6]

Используя этот подход, авторами статьи разработана интеграционная сетка (рис. 2), при построении которой выполняется разбиение на площади равного влияния, ограниченные полярными радиусами и дугами полуэллипсов, таким образом, чтобы в центре (точка С) влияние веса зависящих пород кровли на вертикальные суммарные напряжения над каждым локальным элементом было одинаковым.



$l_{пр}$  – ширина зоны опорного горного давления;  $\alpha_{пад}$  – угол наклона обрабатываемого пласта;  $l_{пад}$  – ось полуэллипса по падению пласта;

$l_{вос}$  – ось полуэллипса по восстанию пласта

Рис. 2. – Схема деления интеграционной сетки на площади равного влияния

Размеры осей полуэллипса определяются по формулам:

$$l_{пад} = l_{пр} \cdot \frac{1}{\cos \alpha_{пад}} ; \quad (1)$$

$$l_{\text{вос}} = l_{\text{пр}} \cos \alpha_{\text{пад}}. \quad (2)$$

В центре интеграционной сетки дополнительные вертикальные напряжения  $\sigma_j^{\text{доп}}$  вычисляются по формуле [6]:

$$\sigma_j^{\text{доп}} = a_0 \iint r_j \psi(r_j, \theta_j, a_1, a_2) dr_j d\theta_j, \quad (3)$$

где  $\psi()$  – функция влияния площади  $S_j$  на величины вертикальных напряжений;  $a_0, a_1, a_2$  – эмпирические коэффициенты, величины которых зависят от горно-геологических и горнотехнических параметров.

За пределами интеграционной сетки  $\sigma_j^{\text{доп}} = 0$ .

Для того чтобы влияние веса пород кровли над каждой элементарной площадкой было одинаковым, функция влияния принимается в виде уравнения эпюры опорного горного давления [7].

По результатам численного моделирования напряженно-деформированного состояния геомассива, выполненного с использованием авторского комплекса программ [8, 9], были построены графики распределения вертикальных напряжений в окрестности выработанного пространства.

На основе анализа графиков получена экспоненциальная зависимость для определения коэффициента концентрации вертикальных напряжений  $k_{bj}$  в точке  $j$  на эпюре опорного горного давления:

$$k_{bj} = k_{b0} \cdot e^{-ar_j}, \quad (4)$$

где  $k_{b0}$  – максимальный коэффициент концентрации вертикальных напряжений в краевой части пласта ( $k_{b0} = 1,5-4,0$  [10]);  $r_j$  – расстояние от краевой части пласта до точки  $j$ ;  $a$  – эмпирический коэффициент.

На границе нисходящего участка эпюры опорного горного давления  $k_{bj} = 1$ , что соответствует  $r_j = l_{\text{пр}}$ .

Эмпирический коэффициент  $a$  с учетом (4) можно вычислить по формуле:

$$a = \frac{1}{l_{\text{пр}}} \ln \frac{k_{bo}}{k_{bj}} \quad (5)$$

Вес пород кровли для одного сектора  $q_j$  после обработки  $j$  – той элементарной площадки определяется путем интегрирования (4) в пределах заданного интервала:

$$q_j = \gamma H k_{bo} \theta \int_{r_{j-1}}^{r_j} e^{-ar} r dr = \gamma H k_{bo} \theta \left[ e^{-ar_j} \left( \frac{r_j}{a} - \frac{1}{a^2} \right) - e^{-ar_{j-1}} \left( \frac{r_{j-1}}{a} - \frac{1}{a^2} \right) \right], \quad (6)$$

где  $r_{j-1}$ ,  $r_j$  – координаты элементарной площадки (рис. 1);  $\gamma$  – плотность пород;  $H$  – глубина залегания пласта.

Полный вес пород кровли при  $r_{j-1} = 0$ ,  $r_j = l_{\text{пр}}$  вычисляется по формуле:

$$Q_o = \gamma H k_{bo} \theta \left[ e^{-al_{\text{пр}}} \left( \frac{l_{\text{пр}}}{a} - \frac{1}{a^2} \right) - \frac{1}{a^2} \right]. \quad (7)$$

Если в пределах отдельного сектора полный вес пород кровли  $Q_o$  разделить на заданное количество зон  $M$  ( $q_o = \frac{Q_o}{M}$ ), то, учитывая формулы (6) и (7), можно записать:

$$e^{-ar_j} \left( \frac{r_j}{a} - \frac{1}{a^2} \right) - e^{-ar_{j-1}} \left( \frac{r_{j-1}}{a} - \frac{1}{a^2} \right) = \frac{1}{M} \left[ e^{-al_{\text{пр}}} \left( \frac{l_{\text{пр}}}{a} - \frac{1}{a^2} \right) - \frac{1}{a^2} \right]. \quad (8)$$

Уравнение (8), в котором неизвестными являются полярные координаты  $r_j$  дальней границы участка  $s_j$  при известных значениях координат ближней границы  $r_{j-1}$ , решается методом итераций.

На рис. 3 приведен план горных выработок с наложением интеграционной сетки, центр которой совмещен с точкой, в окрестности которой необходимо определить вертикальные напряжения.

Вертикальные напряжения в окрестности точки  $C$  вычисляются по формуле:

$$\sigma_B^C = \gamma H k_{\text{кр}} \frac{N}{N-n}, \quad (9)$$

где  $k_{\text{кр}}$  – коэффициент, учитывающий тип основной кровли по обрушаемости (0,8 / 1,0 / 1,2 для легко-, средне- и труднообрушающейся

кровли, соответственно, согласно методическому руководству по выбору геомеханических параметров технологии разработки угольных пластов короткими забоями),  $N$  – общее количество точек интеграционной сетки;  $n$  – количество точек интеграционной сетки, оказавшихся в контуре выработок.

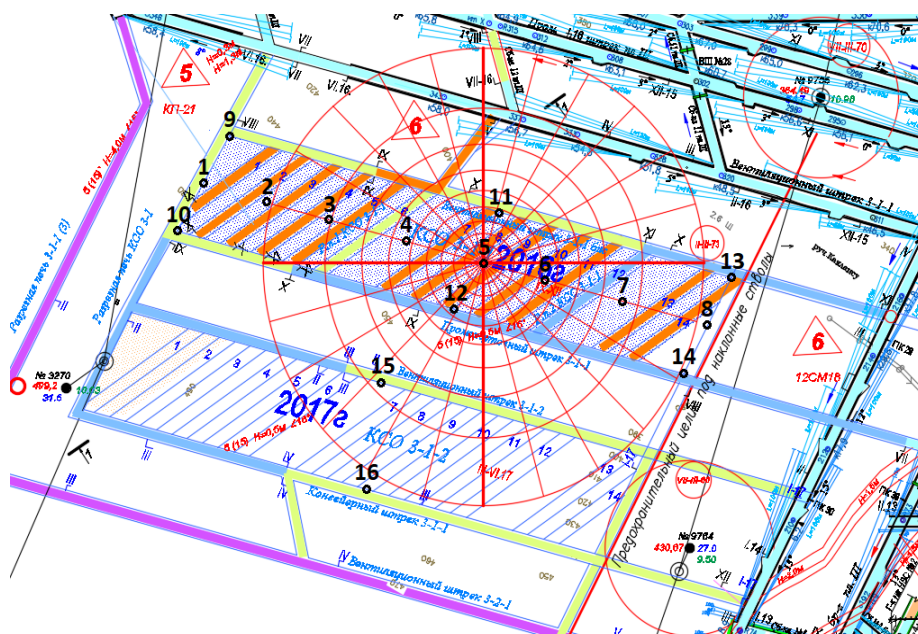


Рис. 3. – План горных выработок с наложением интеграционной сетки

Полученные величины вертикальных напряжений позволяют прогнозировать напряженно-деформированное состояние геомассива и обосновывать необходимость проведения противоударных мероприятий или упрочнения массива в краевой части пласта.

График распределения вертикальных напряжений в угольном пласте приведен на рис. 4. На графике выделены точки 3, 5, 6, в окрестности которых необходимо проводить прогноз опасных зон. В окрестности остальных точек такой прогноз не требуется.

Таким образом, использование предложенного подхода позволяет существенно сократить объём работ по прогнозу и проведению противоударных мероприятий в пределах обрабатываемого участка и снизить затраты на их проведение.

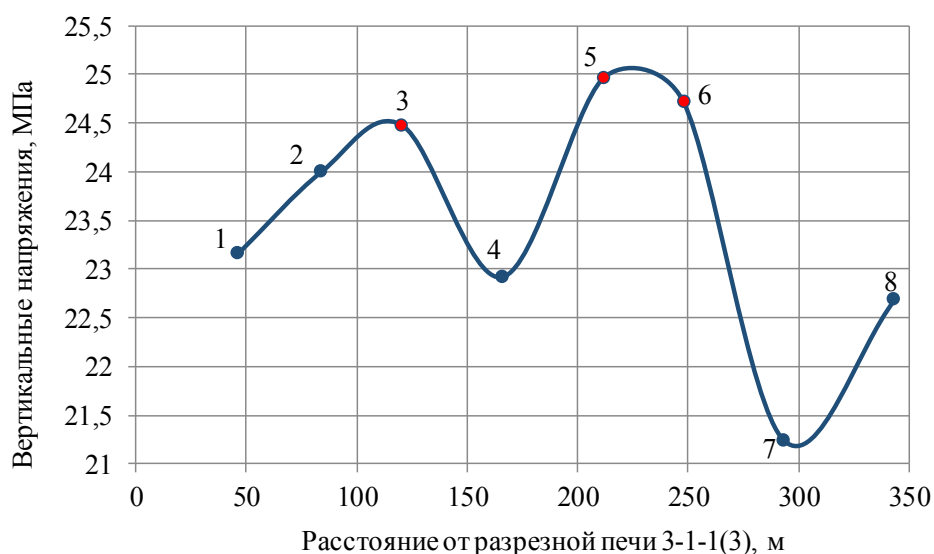


Рис. 4. – График распределения вертикальных напряжений в угольном пласте

Таким образом, возможность оперативного определения положения локальных концентраторов вертикальных напряжений в обрабатываемом короткими забоями угольном пласте при сложной форме выработанного пространства и угольных целиков позволит не только своевременно прогнозировать опасные зоны, оперативно проводить корректировку документации по ведению горных работ, но и сократить трудозатраты на проведение противоударных мероприятий в локальных зонах, а не в пределах всего выемочного участка.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-41-420004*

### Литература

1. Артемьев В.Б. Динамические формы проявлений горного давления. СПб.: Наука, 2009. 347 с.
2. Яковлев Д.В. К вопросу отработки удароопасных угольных пластов короткими забоями // Уголь. 2015. №7. С. 13-16.

3. Петухов И.М., Линьков А.М. Механика горных ударов и выбросов. М.: Недра, 1983. 280 с.
4. Chaulya S. K., Prasad G. M. Sensing and Monitoring Technologies for Mines and Hazardous Areas: Monitoring and Prediction Technologies. Amsterdam: Elsevier, 2016. 432 p.
5. Gaofeng Song, Yoginder P. Chugh, Jiachen Wang A numerical modelling study of longwall face stability in mining thick coal seams in China // International Journal of Mining and Mineral Engineering. 2017. №8. pp. 35-55.
6. Кратч Г. Сдвигение горных пород и защита подрабатываемых сооружений. М.: Недра, 1982. 494 с.
7. Tsvetkov A.B., Pavlova L.D., Fryanov V.N., Construction of the approximant of complete diagram for rock deformation // IOP Conference Series: Earth and Environmental, 2016, №45. URL: [iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/45/1/012009/pdf](http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/45/1/012009/pdf).
8. 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.
9. 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. 20-26.
10. Фисенко Г.Л. Предельное состояние горных пород вокруг выработок. М.: Недра, 1976. 272 с.

### References

1. Artem'ev V.B. Dinamicheskie formy proyavleniy gornogo davleniya [Dynamic forms of manifestations of rock pressure]. SPb.: Nauka, 2009. 347 p.
2. Yakovlev D.V. Ugol'. 2015. №7. pp. 13-16.





3. Petukhov I.M., Lin'kov A.M. Mekhanika gornykh udarov i vybrosov [Mechanics of rock strikes and emissions]. M.: Nedra, 1983. 280 p.
4. Chaulya S. K., Prasad G. M. Sensing and Monitoring Technologies for Mines and Hazardous Areas: Monitoring and Prediction Technologies. Amsterdam: Elsevier, 2016. 432 p.
5. Gaofeng Song, Yoginder P. Chugh, Jiachen Wang International Journal of Mining and Mineral Engineering. 2017. №8. pp. 35-55.
6. Kratch G. Sdvizhenie gornykh porod i zashchita podrabatyvaemykh sooruzheniy [Rock movement and protection of undermining structures]. M.: Nedra, 1982. 494 p.
7. Tsvetkov A.B., Pavlova L.D., Fryanov V.N. IOP Conference Series: Earth and Environmental, 2016, №45 URL: [iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/45/1/012009/pdf](http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/45/1/012009/pdf).
8. Kornev E.S., Pavlova L.D., Fryanov V.N. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2013. №2. pp 65-69.
9. Kornev E.S., Pavlova L.D., Fryanov V.N. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2015. №2. pp. 20-26.
10. Fisenko G.L. Predel'noe sostoyanie gornykh porod vokrug vyrabotok [The limit state of the rocks around the mine working]. M.: Nedra, 1976. 272 p.