© Н.В. Черданцев, 2014

УДК 622.241.54

Н.В. Черданцев

УСТОЙЧИВОСТЬ ЦЕЛИКОВ ОКОЛО СИСТЕМЫ ВЫРАБОТОК ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

В рамках модели геомеханического состояния анизотропного по прочности массива горных пород с различными его параметрами проведены исследования устойчивости целиков в окрестности системы горизонтальных выработок прямоугольного сечения, сооружаемых по геотехнологии HIGHWALL. Представлены результаты вычислительного эксперимента, проведенного в рамках разработанной трехмерной модели геомеханического состояния массива с прочностной анизотропией, в которой поле напряжений в окрестности выработок определяется методом граничных элементов, а оценка нарушения сплошности массива производится на основе описанных выше критериев прочности. Установлено, что в поле равнокомпонентных напряжений нетронутого массива наибольшие разрушения в окрестности выработки прямоугольного сечения по одной из систем поверхностей ослабления происходят в ее бортах на всем диапазоне изменения коэффициента крепости. Наибольшие разрушения в кровле выработки при малых коэффициентах крепости $f < 0,75$ происходят по основной породе, а при $f > 0,75$ – по одной из двух рассмотренных систем поверхностей ослабления.

Ключевые слова: анизотропный по прочности массив горных пород, поверхности ослабления, зона нарушения сплошности, устойчивость целиков.

Применяемые в мировой практике комбинированные (открыто-подземные) геотехнологии освоения недр исходят из того, что границы открытых горных работ определяются на основе экономических или энергетических критериев, а они не всегда могут совпадать с природными особенностями – естественными границами месторождений, пространственным распределением угленасыщенности, характером выхода угольных пластов на поверхность и т.д. В Кузбассе такие технологии были опробованы на некоторых разрезах («Сибиргинский», «Моховский», «Распадский»). Выбор варианта открыто-подземной разработки угольных месторождений определяется в ходе решения комплексной задачи, которая включает природные условия месторождения, геомеханическое состояние массива и технологии вскрытия и отработки месторождений.

Геотехнология HIGHWALL или КГРП (комплекс глубокой разработки пласта), являющаяся разновидностью комбинированной геотехнологии, позволяет отрабатывать угольные пласты в приконтурной части карьера путем применения для проведения выработок роторных агрегатов. Согласно этой технологии угольные пласты отрабатываются путем последовательного проведения роторными агрегатами выработок (квадратного, прямоугольного сечения), расположенных в непосредственной близости друг к другу разделяемых небольшими целиками. Ее эффективность и перспективы приведены, например, в [1].

Согласно комбинированной геотехнологии мощные угольные пласты могут отрабатываться по-разному. Например, отрабатывается верхний (нижний) горизонтальный слой пласта путем проведения выработки квадратного сечения с последующим ее расширением до соответствующих пролетов (двух, трех и т.д.

размеров высоты). Затем сооружают вторую, такую же выработку, расположенную рядом с первой, оставляя, при этом целик.

Другой вариант предусматривает отработку пласта вертикальными слоями. Т.е. после проведения выработки квадратного сечения приступают к выемке следующих слоев, расположенных в почве квадратной выработки, увеличивая последовательно ее высоту до двух, трех и т.д. пролетов. Затем, оставляя целик, таким же образом проводится соседняя выработка.

Какой из двух перечисленных вариантов принять и каких размеров должны быть целики зависит от свойств вмещающего массива. Следовательно, для выбора того или иного варианта должно быть выполнено геомеханическое обоснование вариантов комбинированной технологии.

Известно, что углепородный массив как массив осадочных горных пород обладает свойством прочностной анизотропии, – наличием поверхностей ослабления, обусловленных, в основном, слоистостью и кливажом. Породы по этим направлениям имеют более низкие характеристики прочности по сравнению с основной породой, расположенной между ними.

Поэтому основной проблемой широкого применения этой технологии является недостаточное обоснование устойчивости углепородного массива, расположенного между выработками и называемого междукамерным целиком. В процессе отработки пласта неустойчивые породы в целике приводят к завалам выработок, вызывая сбои угледобычи, снижая производительность труда.

Проблеме геомеханического состояния массива с поверхностями ослабления (направлениями в массиве с пониженными по сравнению с другими направлениями его характеристиками прочности), вмещающем систему протяженных выработок круглого (квадратного) сечения, посвящен ряд статей, например, [2, 3]. В этой статье приводится детальный анализ устойчивости целиков при наличии в массиве неблагоприятной с точки зрения его прочности в окрестности выработок ориентации поверхностей ослабления.

Массив горных пород под действием сформировавшегося в окрестности выработки поля напряжений в различных условиях может разрушаться как по основной породе согласно критерию разрушения Кулона-Мора [4]

$$\sigma_1 \geq \beta\sigma_3 + \sigma_c, \qquad (1)$$

так и по поверхностям ослабления при определенной их ориентации в соответствии с критерием Мора-Кузнецова [5]

$$\sigma_\nu \geq R_{p,} \quad |\tau_\nu| \geq \sigma_\nu tg\varphi + K, \qquad (2)$$

где σ_1, σ_3 – главные напряжения в исследуемой точке, $\beta = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}$ – параметр объемной прочности, σ_ν и τ_ν – нормальное и касательное напряжения на поверхности ослабления, φ и K – угол внутреннего трения и коэффициент сцепления по поверхности ослабления. Величина σ_c характеризуют предел прочности основной породы на одноосное сжатие, а R_p на растяжение в направлении перпендикулярном направлениям поверхностей ослабления. Величина σ_c связана с коэффициентом крепости пород по шкале проф. М.М. Протодьяконова f зависимостью $\sigma_c = 10 \cdot f$, МПа.

Для осадочных горных пород значение ф по основной породе и по поверхностям ослабления обычно составляет 20–25°. Поверхности ослабления в зависимости от коэффициента сцепления классифицированы проф. Г.Н. Куз-

нецовым по группам следующим образом: 1) микрослоистость $K = (0{,}6–0{,}9)\,K_0$, 2) поверхности отдельностей $K = (0{,}3–0{,}6)\,K_0$, 3) контакт слоев $K = (0–0{,}3)\,K_0$,

где $K_0 = \sigma_c \dfrac{1-\sin\varphi}{2\cos\varphi}$ – коэффициент сцепления основной породы.

Компоненты напряжений σ_ν и τ_ν по поверхности ослабления выражаются через компоненты тензора поля напряжений, рассчитываемого методами механики деформируемого твердого тела, посредством известных формул теории напряженного состояния

$$\sigma_\nu = \sigma_x l^2 + \sigma_y m^2 + \sigma_z n^2 + 2\tau_{xy} ml + 2\tau_{yz} mn + 2\tau_{zx} nl,$$

$$p_\nu^2 = (\sigma_x l + \tau_{xy} m + \tau_{xz} n)^2 + (\tau_{xy} l\sigma_y m^2 + \sigma_y m + \tau_{yz} n)^2 + (\tau_{xz} l + \tau_{yz} m + \sigma_z n)^2,$$

$$\tau_\nu = \sqrt{p_\nu^2 - \sigma_\nu^2},$$

где l, m, n – направляющие косинусы нормали к поверхности ослабления.

Ориентация поверхностей ослабления по отношению к выработке задается углом падения α (угол между нормалью ν к поверхности и вертикальной осью поперечного сечения z) и простирания β (угол между проекцией нормали на горизонтальную плоскость $x0y$ и горизонтальной осью сечения выработки y) (рис. 1). При $\beta = 0°$ выработка типа штрек пройдена по простиранию поверхности ослабления. При $\beta = 90°$ выработка типа квершлаг сооружается в крест простирания этих поверхностей. Величины l, m, n связаны с углами α и β очевидными выражениями

$$l = \cos(n, x) = \sin\alpha\cos\beta, \quad m = \cos(n, y) = \sin\alpha\sin\beta, \quad n = \cos(n, z) = \cos\alpha,$$

Совокупность точек массива, в которых произошло разрушение массива согласно какому-либо критерию прочности, приведенному выше, называется зоной нарушения сплошности (ЗНС). Породы, расположенные в ЗНС, склонны к вывалам, а потому неустойчивы.

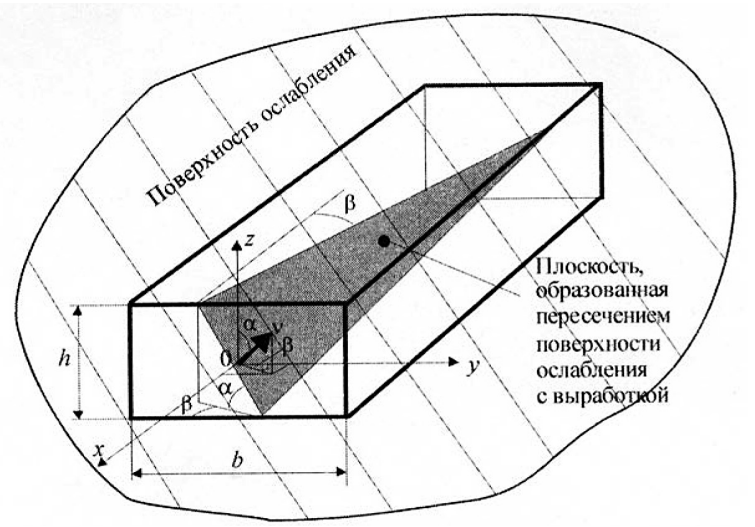

Рис. 1. Положение поверхности ослабления относительно выработки

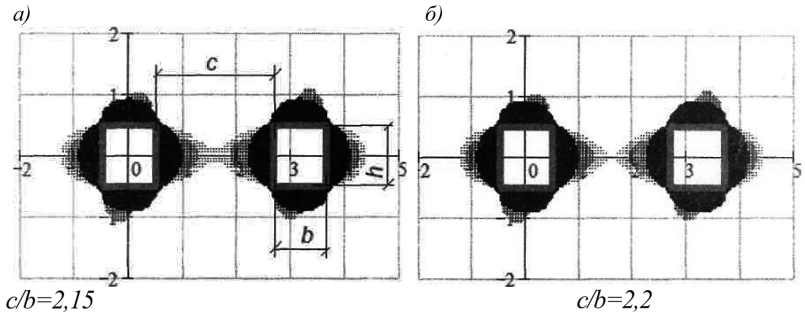

Рис. 2. Картины ЗНС около выработок с h/b = 1

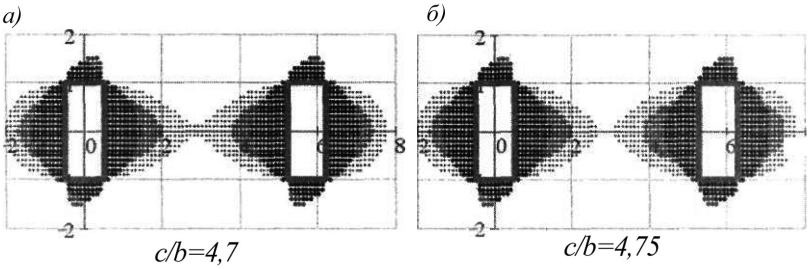

Рис. 3. Картины ЗНС около выработок с h/b = 2

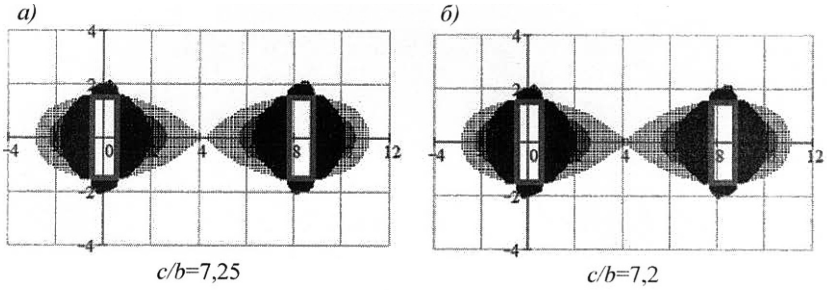

Рис. 4. Картины ЗНС около выработок с h/b = 3

Наличие зон – показатель техногенной нарушенности массива и критерий его устойчивости. Размеры и конфигурация ЗНС определяют рациональные формы выработок, параметры их крепи, а также границы направленной фильтрации газа в угольных пластах. В массиве с несколькими выработками ЗНС от каждой из них при определенных условиях объединяются, что приводит к образованию так называемых областей неустойчивости. Установление их размеров и конфигурации важно в оценке устойчивости массива при проведении системы горных выработок.

В геомеханике считается, что массив в окрестности системы выработок (а, следовательно, и целик) не устойчив, если ЗНС от каждой выработки смыкаются друг с другом в целике, образуя единую зону, которую и называют областью неустойчивости. Ее трудно крепить. В неустойчивом целике породы частично выдавливаются внутрь выработок, а его края получают значительные смещения. Он превращается в своеобразную выработку (квазивыработку),

в окрестности которой образуются новые зоны нарушения сплошности еще больших размеров. Единственным способом повышения устойчивости пород в областях неустойчивости, по-видимому, является, их цементация, применять которую в геотехнологии HIGHWALL не рационально. Поэтому с точки зрения оптимального размещения выработок, а, следовательно, и размеров целиков, при котором размеры ЗНС минимальны, задача по установлению положения областей неустойчивости, их размеров и конфигурации является важной и актуальной.

Ниже представлены результаты вычислительного эксперимента, проведенного в рамках разработанной в [6] трехмерной модели геомеханического состояния массива с прочностной анизотропией, в которой поле напряжений в окрестности выработок определяется методом граничных элементов, а оценка нарушения сплошности массива производится на основе описанных выше критериев прочности.

Исследования проводились при следующих значениях параметров: коэффициент бокового давления $\lambda = 1$, угол внутреннего трения $\varphi = 20°$, размеры выработки, представленные соотношением характерных размеров высоты к пролету h/b (b – пролет выработки, h – ее высота), принимали значения 1, 2, 3. Коэффициент крепости f в расчетах изменялся в пределах от 0,25 до 1,5. Коэффициент сцепления K принимался $0{,}25 \cdot K_0$.

Картины разрушения массива вокруг выработки построены по результатам проверки его прочности по основной породе и двум наиболее опасным с точки зрения прочности системам поверхностей ослабления согласно трем условиям:

1) Кулона-Мора по основной породе;

2) Мора-Кузнецова по первой системе поверхностей ослабления с $\alpha = 90°$, $\beta = 35°$;

3) Мора-Кузнецова по второй системе поверхностей ослабления с $\alpha = 55°$, $\beta = 0°$. Расчеты показали, что наибольшие нарушения сплошности происходят именно по этим двум приведенным системам поверхностей ослабления. Причем, по первой системе максимальные нарушения происходят в почве и кровле, а по второй – в бортах выработки.

На рис. 2–4 представлены система двух выработок с зонами нарушения сплошности массива ($f = 0{,}75$) в их окрестности в моменты смыкания и размыкания этих зон. На них черным цветом обозначены зоны нарушения сплошности по основной породе, светло-серым – по первой системе ослаблений, темно-серым – по второй. Хорошо видно, что при этом коэффициенте крепости потеря устойчивости целика происходит за счет его разрушения по первой системе поверхностей ослабления.

Полагаем, что момент смыкания ЗНС (рис. 2, *а* – 4, *а*) соответствует максимальному размеру неустойчивого целика, а момент размыкания ЗНС – его устойчивому минимальному размеру (рис. 2, *б* – 4, *б*).

На рис. 5 построен график размера устойчивого целика в зависимости от коэффициента крепости вмещающих пород. Из рисунка видно, что с увеличением крепости пород размер целика уменьшается по параболическому типу (слабая вогнутость с максимальным отклонением от линейности, лежащим в пределах 0,11–0,2 пролета).

Из анализа рисунков следует.

1. Для принятых в расчетах значений коэффициента крепости преимущественно нарушение сплошности массива в целике происходит за счет первой

Рис. 5. Графики устойчивых размеров целиков для ряда значений коэффициента крепости

системы поверхностей ослабления.

2. С увеличением коэффициента крепости нарушение сплошности массива по основной породе резко уменьшается, а нарушение сплошности по поверхностям ослабления изменяется незначительно. Размер устойчивого целика в системе двух выработок в зависимости от коэффициента крепости пород превышает суммарные бортовые разрушения массива в окрестности аналогичной одиночной выработки. Так для выработки с $h/b = 1$ он составляет от 50–91%, а для выработки с $h/b = 3$ находится в пределе 47–57%.

Выводы

1. Полученные в рамках модели геомеханического состояния массива горных пород с прочностной анизотропией картины областей нарушения сплошности имеют достаточно наглядный характер и весьма просты в проведении анализа разрушения в зависимости от прочностных свойств пород и способов их армирования.

2. Две системы поверхностей ослабления определенной ориентации в анизотропном по прочности массиве горных пород с равнокомпонентным полем напряжений в исходном состоянии (коэффициент бокового давления равен единице) обеспечивают при проведении выработок наибольшие разрушения в их окрестности (экстремальные условия). По одной из всех возможных систем образуются максимальные разрушения в кровле, а по другой – максимальные разрушения в бортах выработок.

3. Для рассмотренных вариантов горизонтального и вертикального вариантов расположения прямоугольных выработок (определяется по соотношению пролета к высоте – больше или меньше единицы) следует, что с уменьшением коэффициента крепости пород по шкале проф. М.М. Протодьяконова области разрушения массива по основной породе растут более значимо, чем области разрушения по поверхностям ослабления.

4. Установлено, что в поле равнокомпонентных напряжений нетронутого массива наибольшие разрушения в окрестности выработки прямоугольного сечения по одной из систем поверхностей ослабления происходят в ее бортах на всем диапазоне изменения коэффициента крепости. Наибольшие разрушения в кровле выработки при малых коэффициентах крепости $f<0,75$ происходят по основной породе, а при $f>0,75$ – по одной из двух рассмотренных систем поверхностей ослабления.

5. Размер устойчивого целика в системе двух выработок прямоугольного сечения с вертикальным расположением большей стороны превышает суммарные бортовые разрушения массива в окрестности аналогичной одиночной выработки в полтора раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Нецветаев А.Г., Репин Л.К, Соколовский А.В., Кучеренко А.В.* Обоснование геомеханических параметров выемки угля с применением комплексов глубокой разработки пластов (КГРП) // Уголь. – 2005. – № 5. – С. 66–68.

2. *Черданцев К.В., Федорин В.А.* Геомеханическое состояние массива горных пород с поверхностями ослабления в окрестности комплекса протяженных горизонтальных выработок // Вестник КузГТУ. – 2006. – № 1. – С. 17–19.

3. *Черданцев К.В., Преслер В.Т., Федорин В.А., Ануфриев В.Е.* Устойчивость целиков с учетов вывалообразования в геотехнологии HIGHWALL // Вестник КузГТУ. – 2010. – № 6. – С. 6–9.

4. *Булычев Н.С.* Механика подземных сооружений. – М.: Недра, 1994. – 382 с.

5. *Кузнецов Г.К.* Графические методы оценки предельных состояний трещиноватого массива вокруг горных выработок / Современные проблемы механики горных пород. – Л.: Наука, 1972. – С. 30–44.

6. *Черданцев К.В., Изаксон В.Ю.* Некоторые трехмерные и плоские задачи геомеханики. – Кемерово: КузГТУ, 2004. – 190 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Черданцев Николай Васильевич – доктор технических наук, зав. лабораторией,
e-mail: cherdantsevnv@kemsc.ru,
Институт угля Сибирского отделения РАН.

UDC 622.241.54

STABILITY OF PILLARS NEAR RECTANGULAR CROSS-SECTION ROADWAYS

Cherdantsev N.V., Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory,
e-mail: cherdantsevnv@kemsc.ru,
Institute of Coal of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

In the framework of geomechanical state model of a rock mass with anisotropic strength and various parameters, stability of pillars in the vicinity of rectangular cross-section roadways constructed by HIGHWALL technology is analyzed.

The article presents computation experiment carried out within the developed 3D model of geomechanical state of a rock mass with strength anisotropy where stresses around roadways are assessed by the boundary element methods and the rock mass discontinuity is estimated based on the strength criteria.

It has been found that in the equicomponent stress field of the intact rock mass, the maximum failure in the vicinity of a rectangular cross-section roadway takes place in the roadway walls, over one of the systems of weakening surfaces within the entire range of hardness factor. The maximum failure in the roadway roof at the low hardness factor f<0.75 occurs in basic rocks and at f>0.75—over one of the two considered systems of weakening surfaces.

Key words: rock mass with strength anisotropy, weakening surfaces, zone of discontinuity, pillar stability.

REFERENCES

1. Netsvetaev A.G., Repin L.K, Sokolovskii A.V., Kucherenko A.V. *Ugol'*, 2005, no 5, pp. 66–68.

2. Cherdantsev K.V., Fedorin V.A. *Vestnik KuzGTU*, 2006, no 1, pp. 17–19.

3. Cherdantsev K.V., Presler V.T., Fedorin V.A., Anufriev V.E. *Vestnik KuzGTU*, 2010, no 6, pp. 6–9.

4. Bulychev N.S. *Mekhanika podzemnykh sooruzhenii* (Mechanics of underground structures), Moscow, Nedra, 1994, 382 p.

5. Kuznetsov G.K. *Sovremennye problemy mekhaniki gornykh porod* (Contemporary problems of rock mechanics), Leningrad, Nauka, 1972, pp. 30–44.

6. Cherdantsev K.V., Izakson V.Yu. *Nekotorye trekhmernye i ploskie zadachi geomekhaniki* (Some three-dimensional and plane problems of geomechanics), Kemerovo: KuzGTU, 2004, 190 p.