УДК 642.042

В.В.КАРПЕНКО, *канд. техн. наук, доцент, agapita @ inbox.ru*
Ю.Н.ОГОРОДНИКОВ, *д-р техн. наук, профессор, (812) 328 86 25*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

V.V.KARPENKO, *PhD in eng. sc., associate professor, agapita @ inbox.ru*
Y.N.OGORODNIKOV, *Dr. in eng. sc., professor, (812) 328 86 25*
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

ПРОГНОЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОД В СИСТЕМЕ «ЦЕЛИК-ВЫРАБОТКА» ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ ГОРНОГО УДАРА И ГЕОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Рассматривается трансформация напряженного состояния пород слоистого приконтурного массива системы «целик-выработка» при совместном действии геостатического давления, продольной и поперечной волны напряжений, генерируемой горным ударом. Предполагается, что фронты волн напряжений параллельны границам раздела сред непосредственной кровли. При таком условии исследуется влияние уровней критических напряжений и глубины расположения выработки на изменение напряженного состояния пород приконтурного массива.

Ключевые слова: системы выработок, целик, горный удар, волны напряжения.

THE FORECASTING OF STRESS CONDITION IN THE «PILLAR-WORKING» SYSTEM IN COMBINED ACTION OF ROCK BUMP AND GEOSTATIC PRESSURE

The transformation of the stress condition of embedded border diastrophic bloc rock of the «pillar-working» system is considered, in combined action of geostatic tension, lateral and transversal tension wave, generated by rock bump. It is supposed that the tension wave front are parallel to the adjacent strata media discontinuity. Under this condition, in the article the influence of the critical tension levels on the roof and pillar rocks stress condition.

Key words: working system, pillar, rock bump, stress waves.

Область применения камерно-столбовой системы разработки бокситов на шахтах СУБРа определяется устойчивостью опорных целиков и слоистой непосредственной кровли камер. Актуальна задача оценки параметров напряженного состояния приконтурного массива при совместном действии геостатических и динамических напряжений от продольных и поперечных волн, инициируемых горным ударом. Модель рудной залежи и непосредственной кровли с системой выработок и разделительных целиков была предложена ранее* Моделировались выра-

* *Карпенко В.В.* Прогноз напряженного состояния слоистой кровли и разделительного целика в системе выработок при совместном действии горного давления и взрывных волн напряжений / В.В.Карпенко, Ю.Н.Огородников // Труды 7-й межрегиональной научно-практической конференции «Освоение минеральных ресурсов Севера: проблемы и решения». Воркута, 2009.

Karpenko V.V., Ogorodnikov Y.N. The stress condition forecasting of embedded roof and dividing pillar in working system with combined action of underground pressure and stress shock waves // Acta of 7 inter-regional scientific conference. Development of North mineral resources: problems and decisions. Vorkuta, 2009.

ботки высотой 4 м и шириной 5 м, разделенные целиком шириной 6 м на глубинах 250-750 м. Для оценки напряженного состояния пород слоистого приконтурного массива и целика рассмотрим совместное действие горного давления, продольных и поперечных волн, генерируемых горным ударом, с выделившейся энергией $E = 10$ кДж, на систему «целик-выработка». Параметры эпюры сейсмических волн определены предложенным ранее методом*

При построении математической модели статического $\sigma_{ij}^{(h)}$ и динамического $\sigma_{ij}^{(\partial)}$ (от геостатических сил и волн напряжений, генерируемых горными ударами) воздействий на горную выработку принято, что горная порода вокруг выработки является идеально упругой или хрупкой средой. Боковая поверхность выработки аппроксимирована цилиндрической поверхностью произвольного поперечного сечения.

Для описания характерных особенностей напряженного состояния породы вокруг выработки, находящейся под действием статических и динамических воздействий, использована модель плоского деформированного состояния массива.

Для выбранного слоистого приконтурного массива расчеты суммарных напряжений $\sigma_{xx} = \sigma_{xx}^{(\partial)} + \sigma_{xx}^{(h)}$, где $\sigma_{xx}^{(\partial)} = \sigma_{xx}^{(p)} + \sigma_{xx}^{(s)}$, выполнены для точек, расположенных на различных расстояниях от контура кровли выработки вдоль ее вертикальной оси симметрии. Максимальные суммарные растягивающие напряжения около 2-4 МПа достигаются в наименее прочных слоях кровли на расстояниях 1,6-3,5 м от потолочины. В поперечном направлении область растягивающих напряжений простирается примерно на 1,0-4,0 м в обе стороны от вертикальной оси выработки. По этой причине эти участки являются потенциально опасными по накоплению повреждений и разрушений в слоях непосредственной кровли от совместного действия сейсмических волн напряжений и горного давления. При воздействии сейсмических волн горного удара слои непосредственной кровли над целиком практически не будут разгружаться только в непосредственной близости от вертикальной оси целика. Эта зона отрицательной стабильности расположена в слое непосредственной кровли мощностью 2,3 м и простирается по ширине примерно на 1,5 м в обе стороны от вертикальной оси целика и на 1,6-3,5 м по вертикали от потолочин выработок.

Суммарные горизонтальные напряжения $\sigma_{yy} = \sigma_{yy}^{(\partial)} + \sigma_{yy}^{(h)}$, где $\sigma_{yy}^{(\partial)} = \sigma_{yy}^{(p)} + \sigma_{yy}^{(s)}$, знакопеременные как над выработками, так и над целиком. Их максимальные растягивающие значения достигают 4,5-6,5 МПа в слоистой кровле выработки и над целиком.

Суммарные касательные (сдвиговые) напряжения $\sigma_{xy} = \sigma_{xy}^{(\partial)} + \sigma_{xy}^{(h)}$, где $\sigma_{xy}^{(\partial)} = \sigma_{xy}^{(p)} + \sigma_{xy}^{(s)}$, знакопеременные, имеют более значительный размах изменений, чем тангенциальные напряжения $\sigma_{yy} = \sigma_{yy}^{(\partial)} + \sigma_{yy}^{(h)}$ В слоях непосредственной кровли над целиком максимальные значения σ_{xy} примерно в два раза больше, чем σ_{yy}.

В слоистой кровле над целиком максимальные значения массовых скоростей U_x^* составляют 0,4-0,5 м/с. Максимальные значения массовых скоростей U_x^*, равные 2,0-2,1 м/с, достигаются в слоях кровли над выработкой в непосредственной близости от обнажения на расстоянии 1-2 м от вертикальной оси выработки. Такое увеличение максимальных значений скоростей связано с эффектом «квазирезонанса». На вертикальной оси симметрии выработки максимальные значения массовых скоростей несколько меньше.

Массовые скорости U_y^* достигают своих наибольших значений 4,5-5,5 м/с в тонком слое кровли мощностью 1,2 м вблизи его контакта с породами целика или кровли выработок.

---

* *Карпенко В.В.* Параметры прямых продольных и поперечных сейсмических волн при горных ударах в скальных породах / В.В.Карпенко, Ю.Н.Огородников // Записки Горного института. Т.172. СПб, 2007.

Karpenko V.V., Ogorodnikov Y.N. Parameters of straight lateral and equivoluminal seismic waves under rock bumps in hard-rock // The Acta of Mining Institute. Vol.172. Saint Petersburg, 2007.

В целике суммарные напряжения $\sigma_{xx} = \sigma_{xx}^{(\partial)} + \sigma_{xx}^{(h)}$ знакопеременные как по ширине, так и по высоте.

Вдоль вертикальной оси целика на удалении примерно 1 м от нее суммарные вертикальные напряжения $\sigma_{xx} = \sigma_{xx}^{(\partial)} + \sigma_{xx}^{(h)}$ сжимающие. Наибольших значений как сжимающие, так и растягивающие напряжения $\sigma_{xx} = \sigma_{xx}^{(\partial)} + \sigma_{xx}^{(h)}$ достигают в зонах глубиной 1-2 м, примыкающих к боковым стенкам выработок. Максимальных значений как сжимающие, так и растягивающие суммарные напряжения $\sigma_{xx} = \sigma_{xx}^{(\partial)} + \sigma_{xx}^{(h)}$ достигают в окрестности угловых точек контуров подошвы выработок. По этим причинам в указанных зонах по всей высоте целика могут развиваться откольные явления. Концентрация динамических напряжений в окрестности угловых точек возрастает с уменьшением расстояния до них.

Суммарные горизонтальные напряжения $\sigma_{yy} = \sigma_{yy}^{(\partial)} + \sigma_{yy}^{(h)}$ знакопеременные как по ширине, так и по высоте целика. В центральной зоне целика на удалении 1,2 м от боковых стен выработки и на таком же удалении от подошвы и потолочин максимальные значения как растягивающих, так и сжимающих напряжений $\sigma_{yy} = \sigma_{yy}^{(\partial)} + \sigma_{yy}^{(h)}$ не превышают 5 МПа. Наибольших значений напряжения $\sigma_{yy} = \sigma_{yy}^{(\partial)} + \sigma_{yy}^{(h)}$ (сжимающие и растягивающие) достигают в зонах, примыкающих к угловым точкам контуров выработок. По этим причинам в центральной зоне целика может происходить расслоение пород с образованием вертикальных трещин. Наибольшая концентрация динамических напряжений реализуется в нижней части целика, в зонах, примыкающих к угловым точкам контура выработок.

Суммарные напряжения $\sigma_{xy} = \sigma_{xy}^{(\partial)} + \sigma_{xy}^{(h)}$ знакопеременные как по ширине, так и по высоте целика. В центральной зоне целика на удалении 1,2 м от боковых стен выработки и на таком же удалении от подошвы и потолочин максимальные значения как растягивающих, так и сжимающих напряжений $\sigma_{xy} = \sigma_{xy}^{(\partial)} + \sigma_{xy}^{(h)}$ изменяются от −25 до 15 МПа. Наибольших значений (сжимающих и растягивающих) напряжения $\sigma_{xy} = \sigma_{xy}^{(\partial)} + \sigma_{xy}^{(h)}$ достигают в зонах, примыкающих к угловым точкам контура выработок.

Анализ кинематических параметров $U_x^{\bullet}$ и $U_y^{\bullet}$, характеризующих движение пород целика, позволяет условно выделить в нем две зоны центральную, расположенную вблизи вертикальной оси целика; боковую, состоящую из пород, примыкающих к боковым стенкам выработок. В начальные моменты времени массовые скорости $U_x^{\bullet}$ по всей высоте целика близки к массовым скоростям прямой продольной сейсмической волны. В последующие моменты времени на характер изменения массовых скоростей оказывает влияние поперечная волна.

В боковых зонах по всей высоте целика смещение его пород происходит разнонаправлено и обусловлено воздействием поперечной волны на систему «целик-выработка». Максимальные значения массовых скоростей $U_x^{\bullet}$ составляют −3,0 и 2,3 м/с.

Анализ расчетов массовых скоростей $U_y^{\bullet}$ показал, что эти скорости распределены по сечению целика практически равномерно, но абсолютные их величины убывают по высоте целика. Максимальные значения массовых скоростей $U_y^{\bullet}$ составляют –4,0 и 5,3 м/с и достигаются в верхней части целика на боковых стенках выработок. В этой части целика максимальные значения массовых скоростей $U_y^{\bullet}$ почти в полтора раза превосходят максимальные значения массовых скоростей $U_x^{\bullet}$. В основании целика максимальные значения массовых скоростей $U_y^{\bullet}$ составляют 2,1 и –1,2 м/с. Такие уровни максимальных значений массовых скоростей $U_y^{\bullet}$ могут спровоцировать при развитии и накоплении повреждений в приконтурном массиве выработок обрушение их боковых стенок.

Выявленные закономерности изменения поля напряжений и массовых скоростей при прохождении продольных и поперечных сейсмических волн по системе «целик-выработка», выражающиеся в повышенных горизонтальных растягивающих напряжениях и массовых скоростей в слоистой кровле камер и целиках, а также в значительных по величине знакопеременных касательных напряжениях, показывают, что влияние поперечных волн на напряженное состояние слоистой кровли камер и их устойчивость может быть основной причиной отколов с боков целиков и обрушения кровли камер с характерным, отмечаемым на практике, изгибом анкеров.

Заметим, что с увеличением глубины горных выработок и соответствующим ростом статических напряжений растягивающие динамические напряжения в кровле камер будут снижаться. Однако, в неподкрепленных боках целиков условия формирования откольных явлений сохраняются.

Естественно, интенсивность проявлений негативных эффектов в системе могут усиливаться или снижаться в зависимости от энергии горных ударов и расстояний от их гипоцентров до разрабатываемого блока.