



ВНИМИ — это признанная во всем мире научная школа, представленная выдающимися учеными.

Учеными института выполнены научные исследования, составляющие основу новых нормативных документов: инструкции по анкерному креплению в угольных шахтах; инструкции по безопасному ведению горных работ на шахтах, разрабатывающих угольные пласты, склонные к горным ударам; положение о порядке организации и контроля ведения горных работ в опасных зонах при подземной добыче угля; инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений; инструкция по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях, объектах строительства подземных сооружений склонных и опасных по горным ударам; руководства по геодинамическому районированию шахтных полей. Институтом создано новое поколение автоматизированных геофизических и геомеханических систем и оборудования для контроля напряженно-деформированного состояния горного массива, которое имеет все необходимые сертификаты соответствия и разрешения на применения в горной промышленности.

«Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела — Межотраслевой научный центр ВНИМИ» развивается, имея в своем составе, помимо главного центра в Санкт-Петербурге, филиалы и представительства в основных горнодобывающих регионах России, обеспечивает решение проблем горного производства в области геомеханики, геодинамики, геофизики, гидрогеологии и маркшейдерии.

УДК 622.831

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ УДАРООПАСНОСТИ НА УЧАСТКАХ ВЫРАБОТОК



А. А. АКСЕНОВ,
директор, канд. техн. наук,
info@ufvnmimi.ru



И. А. ОЖИГАНОВ,
старший научный сотрудник



Д. В. ГУБАНОВ,
научный сотрудник



Ф. Ф. БЛИНОВ,
научный сотрудник

Уральский филиал АО «ВНИМИ», Екатеринбург, Россия

Введение

Решения проблем удароопасности на горнорудных предприятиях в большей мере обеспечиваются своевременным прогнозом и применением профилактических мероприятий [1–5]. Согласно нормативному документу [6], для каждого месторождения разрабатывают свои методики прогноза для выявления опасных участков, в которых применяют меры предотвращения горных ударов. Однако многообразие условий и форм проявлений удароопасности предопределяет детальное исследование напряженного состояния, в частности изучение зон концентрации напряжений в приконтурном хрупкоупругом массиве вокруг выработок.

Обычно на эксплуатируемых месторождениях удароопасность усиливается по мере увеличения глубины ведения горных работ с возрастанием субгоризонтальных (тектонических) составляющих естественного поля напряжений. Принято считать [6, 7], что при горизонтальном действии максимальных главных напряжений (тектонических составляющих) вследствие динамических проявлений горного давления происходит разрушение кровли выработки. Тем не менее зачастую наблюдается разрушение только их стенок.

Методика и результаты исследований

С целью изучения условий формирования удароопасности на участках выработок, отнесенных к опасным по горным ударам, с помощью измерений многоточечным гидравлическим датчиком (МГД) выполнены определения параметров напряженного состояния в законтурном массиве горных выработок [8]. В результате этих работ выявлено наличие двух пиков максимальных главных

Рассмотрены результаты исследований напряженного состояния на участках выработок с категорией «Опасно по горным ударам». Для выбора мер предотвращения удароопасности предложены методы расчетов требуемой зоны разгрузки и способа снижения запаса упругой энергии.

Ключевые слова: удароопасность, зоны напряженного состояния, параметры вдавливания многоточечным гидравлическим датчиком, математическое моделирование, меры предотвращения.

DOI: 10.17580/gzh.2019.09.09

напряжений – в зоне максимума опорного давления X_1 и в приконтурном массиве X_2 (деструктивной зоне). Также замечено, что в условиях удароопасности в зоне максимума опорного давления X_1 главное напряжение сжатия σ_1 действует в горизонтальной плоскости, тогда как в приконтурной зоне X_2 указанная составляющая поля напряжений меняет ориентировку и действует в вертикальном направлении, как это схематично показано на **рис. 1**.

Шахтные измерения показали, что на границе приконтурной зоны X_2 и зоны максимума X_1 наблюдается резкое снижение величин напряжений во всех направлениях вдавливания по поперечному сечению шпура. Такой сброс напряжений может быть связан как со структурным ослаблением массива, так и обусловлен трещинообразованием, вызванным тангенциальными напряжениями на границе рассматриваемых зон [9]. Между зонами X_1 и X_2 формируется трещина отрыва.

В качестве примера на **рис. 2** и **3** проведены графики изменения по глубине шпура величин напряжений, полученные по результатам вдавливания прибором МГД. От границы зон в глубь массива отчетливо просматривается возрастание напряжений до максимальных значений, а в зоне X_2 в сторону контура выработки наблюдается переход от роста к спаду напряжений. Кроме того, по расчетам в зоне X_2 происходит смена направления максимального главного напряжения σ_1 .

Таким образом, для удароопасных участков кромка массива в приконтурной зоне X_2 сдерживает нагрузки от напряжений

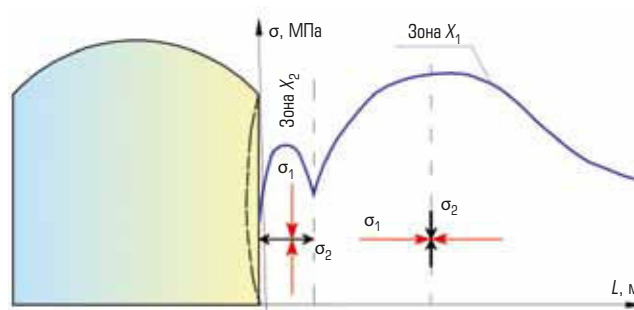


Рис. 1. Зоны напряженного состояния в приконтурном массиве, формируемые в удароопасных условиях

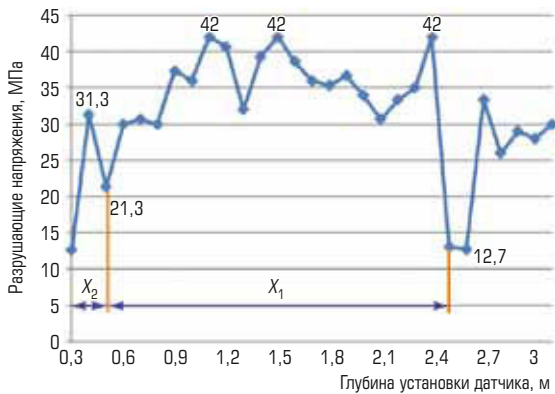


Рис. 2. Распределение поинтервальных напряжений в краевой части выработки (по данным Североуральского бокситового рудника)

сжатия зоны X_1 . До превышения напряжениями критических значений краевая часть выработки находится в уравновешенном состоянии. Рост нагрузок в зоне максимума и достижение ими предела прочности пород в зоне X_2 в хрупких породах создают предпосылки динамического разрушения стенок выработки в форме горного удара.

В зависимости от соотношения напряжений, формируемых в этих зонах, и размеров зон возможны явления различного энергетического уровня — от стрельяния до горного удара. Причем стрельяния происходят в том случае, когда максимум напряжений в X_1 расположен вблизи контура выработки, или, иными словами, практически при отсутствии зоны X_2 . При микроударе с энергией 10^3 – 10^4 Дж объем разрушения составляет порядка 1–2 м³ породы, а при горном ударе с энергией более 10^4 Дж возможные значительные разрушения приводят к авариям и, как следствие, к остановке работ [10, 11].

Определение параметров зон X_1 и X_2 и условий разрушения позволяет осуществить выбор мер по профилактике и предотвращению проявлений динамического характера горного давления.

В качестве примера расчетов безопасных параметров зон используем результаты характерных замеров, проведенных на шахте «Кальинская» Североуральского бокситового рудника и на Гайском руднике, показанных на рис. 2 и 3. Как было установлено, в зоне X_1 наибольшее напряжение направлено в сторону выработки, а в зоне X_2 — перпендикулярно напряжению X_1 . Тогда приконтурную часть стенки выработки — зону X_2 можно представить как балку, нагружаемую сжимающими напряжениями зоны X_1 . Приняв ширину балки равной 1 м, допустимую толщину балки с достаточной точностью можно определить из условия [12]

$$b_{X_2} \geq \sqrt{\frac{3\sigma_{X_1}h}{4(\sigma_{X_2} + \sigma_p)}}, \quad (1)$$

где σ_{X_1} , σ_{X_2} — наибольшие напряжения в зонах X_1 и X_2 ; σ_p — предел прочности на растяжение; h — высота вертикальной стенки выработки.

По расчетам минимально требуемый размер зоны X_2 в глубину для случаев, показанных на рис. 2 и 3, составляет 1,5 и 1,3 м соответственно. По указанным графикам размеры зоны

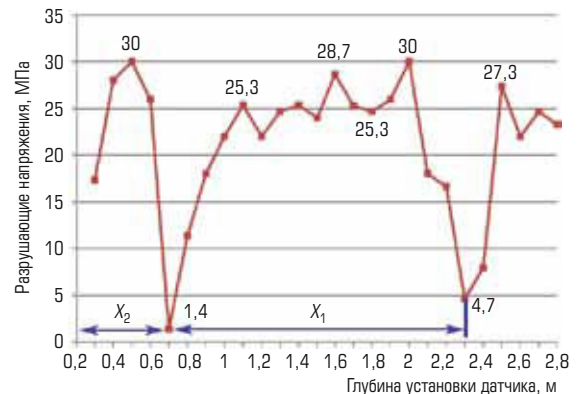


Рис. 3. Распределение поинтервальных напряжений в краевой части выработки (по данным Гайского рудника)

X_2 на исследуемых участках меньше расчетной величины. Следовательно, для предупреждения динамического разрушения следует создать защитную зону (произвести разгрузку скважинами) на глубину расчетного размера зоны b_{X_2} .

По уровню напряжений в зоне X_1 можно оценить энергию прогнозируемого разрушения [13]:

$$\mathcal{E} = \frac{\pi(\sigma_{X_1})^2 \cdot (X_1 - X_2)^2 \cdot h}{E_{X_1} - E_{X_2}}, \quad (2)$$

где E_{X_1} и E_{X_2} — модули упругости пород в зонах X_1 и X_2 , определяемые по диаграммам вдавливания при замерах прибором МГД [8].

По результатам расчетов формируемая энергия сжатия в зоне X_1 составит $5 \cdot 10^3$ и $5 \cdot 10^2$ Дж/м соответственно. Таким образом, исходя из расчетных величин, для снижения запаса упругой энергии в бортах выработки в первом случае следует не только создать защитную зону бурением разгрузочных скважин, но и применить камуфлетное взрывание.

Для общей оценки зон предельного напряженного состояния при условиях двукратного превышения горизонтальных напряжений над вертикальными и достижения ими предела прочности пород проведены расчеты на конечно-элементных моделях с использованием программного комплекса FEM [14]. На рис. 4 и 5 показана картина распределения напряжений сжатия и растяжения соответственно. Изолинии совмещены со схемой, построенной по шахтным результатам определений (см. рис. 2). Полученные для равных условий совмещенные результаты имеют подобный вид напряженного состояния сжатия для X_1 и изгиба с растяжением для X_2 . Зоны имеют схожие размеры. При анализе напряжений на рис. 4 и 5 отчетливо видно, что в зоне X_2 более заглубленная в массив часть испытывает действие напряжений сжатия, а ближняя к контуру выработки испытывает действие растягивающих напряжений. Такое напряженное состояние борта подобно нагруженной балке с изгибом в сторону выработанного пространства, заземленной в узлах кровли и почвы выработки.

Аналогичные условия приводят к выдавливанию, отслоению пород в стенках выработки, а при увеличении нагрузки — к динамическим разрушениям прибортового массива, что зачастую наблюдается в выработках со схожим напряженным состоянием.

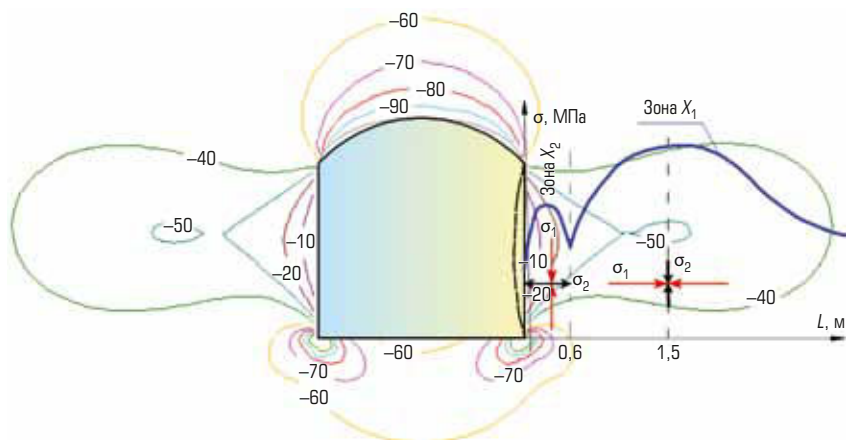


Рис. 4. Изолинии сжимающих напряжений вокруг выработки

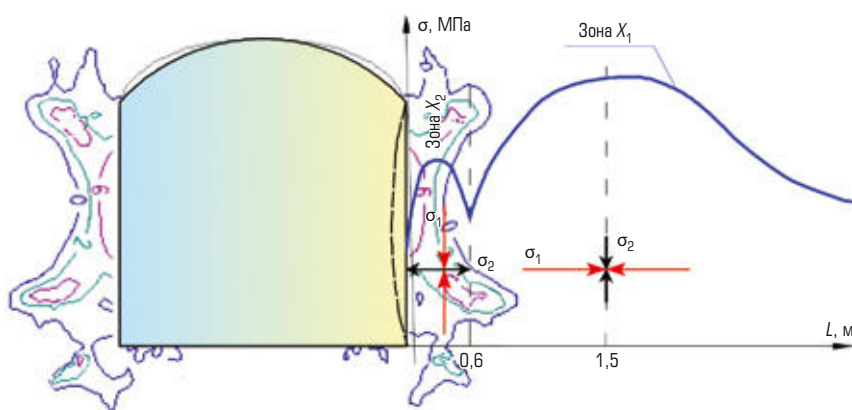


Рис. 5. Изолинии растягивающих напряжений вокруг выработки

На сопряжении кровли и бортов выработки концентрация растягивающих напряжений достигает предельных значений, что может способствовать и разрушению кровли.

Проведение разгрузки, создание защитной зоны в стенках выработки по расчетным параметрам и крепление кровли позволяют

снизить и выровнять напряженное состояние выработки до безопасных значений.

Заключение

Таким образом, по результатам исследований в удароопасных условиях выявлен механизм разрушения бортов выработок. Формирование динамических разрушений происходит при превышении напряжениями в краевой части выработки предела прочности пород. Образуются зоны, которые находятся в силовом взаимодействии друг с другом, и их неустойчивое состояние приводит к возникновению разрушений. Разрушение бортов происходит при возрастании радиальных напряжений в зоне максимума X_1 , когда эти напряжения преодолевают действие напряжений сдерживания зоны X_2 . В зоне X_2 создаются изгибающие усилия в сторону выработочного пространства, как у балки с опорами в кровле и почве. Нагрузка на балку создается действием радиального к продольной оси выработки напряжения сжатия зоны X_1 . Если не будут приняты меры разгрузки, то при дальнейшей эксплуатации выработок сформированные зоны предельного напряженного состояния способны привести к внезапному разрушению в виде горного удара, инициируемого резким притоком энергии из массива.

Кроме того, проведение замеров с помощью прибора МГД позволяет выявить параметры зон напряженного состояния выработки в удароопасных условиях. По полученным напряжениям рассчитывают безопасную ширину защитной зоны и определяют запас упругой энергии сжатия в зоне X_1 . Это дает возможность выбрать необходимые мероприятия по предотвращению горных ударов.

Библиографический список

- Аксенов А. А., Ожиганов И. А., Губанов Д. В., Блинов Е. Ф. Применение комплексной системы профилактики горных ударов на рудных месторождениях // Горная геомеханика и маркшейдерское дело : сб. науч. тр. – СПб. : ВНИМИ, 2009. С. 90–92.
- Cai M., Kaiser P. K. Rockburst Support : Reference Book. – Sudbury : Laurentian University, 2018. Vol. 1. Rockburst Phenomenon and Support Characteristics. – 284 p.
- Аксенов А. А., Морин С. В., Ожиганов И. А., Шадрин М. А., Садинов Ш. М. Оценка геомеханических процессов Зармитанской золоторудной зоны Навоийского горно-металлургического комбината // Горный вестник Узбекистана. 2017. № 4. С. 29–34.
- Xia-Ting Feng, Jianpo Liu, Bingrui Chen, Yaxun Xiao, Guangliang Feng, Fengpeng Zhang. Monitoring, Warning, and Control of Rockburst in Deep Metal Mines // Engineering. 2017. Vol. 3. Iss. 4. P. 538–545.
- Li C. C. Principles of rockbolting design // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2017. Vol. 9. Iss. 3. P. 396–414.
- Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам». – М. : НТЦ ПБ, 2014. Сер. 06. Документы по безопасности, надзорной и разрешительной деятельности в горнорудной промышленности. Вып. 7. – 80 с.
- Еременко В. А., Рыльникова М. В., Есина Е. Н. Мониторинг напряженно-деформированного состояния структурно нарушенного и удароопасного массива горных пород // ГИАБ. 2015. Спец. выпуск 15. Условия устойчивого функционирования минерально-сырьевого комплекса России. Вып. 3. С. 105–115.
- Аксенов А. А., Ожиганов И. А., Губанов Д. В. Использование метода вдавливания прибором МГД для определения геомеханического состояния массива и его физико-механических свойств // Известия вузов. Горный журнал. 2015. № 6. С. 17–22.
- Латышев О. Г. Неоднородность трещинной структуры и прочность горных пород // Известия вузов. Горный журнал. 2014. № 6. С. 152–159.
- Fanzhen Meng, Hui Zhou, Zaiquan Wang, Liming Zhang, Liang Kong et al. Experimental study on the prediction of rockburst hazards induced by dynamic structural plane shearing in deeply buried hard rock tunnels // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2016. Vol. 86. P. 210–223.
- Селивоник В. Г., Воинов К. А. Опыт ведения горных работ в удароопасных условиях // Горный журнал. 2004. № 3. С. 18–24.
- Слесарев В. Д. Механика горных пород. – М. : Углетехиздат, 1948. – 303 с.
- Петухов И. М., Егоров П. В., Винокур Б. Ш. Предотвращение горных ударов на рудниках. – М. : Недра, 1984. – 230 с.
- Зотеев О. В. Моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород численными методами // Известия вузов. Горный журнал. 2003. № 5. С. 108–115. ГЖ

Conditions of initiation and growth of rockburst hazard in mines

Information about authors

A. A. Aksenov¹, Director, Candidate of Engineering Sciences, info@ufvniimi.ru

I. A. Ozhiganov¹, Senior Researcher

D. V. Gubanov¹, Researcher

E. F. Blinov¹, Researcher

¹Ural Division, VNIMI, Yekaterinburg, Russia

Abstract

The article discusses the outcome of the stress analysis in mine areas categorized as rockburst-hazardous. Aimed to examine conditions of initiation and growth of rockburst hazard in rockburst-hazardous mine areas, parameters of the stress state in the adjacent rock mass are determined by measurements using the multipoint hydraulic sensor assembly. As a result, two peaks of the maximum principal stresses are revealed— X_1 in the maximum abutment pressure zone and X_2 in the adjacent rock mass (destruction zone). Furthermore, it is found that under rockburst hazard, in the maximum abutment pressure zone X_1 , the principal compressive stress σ_1 acts in the horizontal plane. In the meanwhile, in the adjacent rock mass X_2 , the principal compression is vertical.

It is proposed to select rockburst hazard precautions by calculating the wanted relief zone and by reducing accumulated elastic energy. The calculation of safe parameters is illustrated in terms of the representative measurements taken in the Kalia mine site of the North Ural Bauxite Mine and in the Gaya Mine. The zones of limiting stress states, given the horizontal stresses exceed the vertical stresses by two times and rocks reach the ultimate stress limit, are estimated using the finite element modeling in the FEM software environment.

Using the research findings on rockburst hazard conditions, the mechanism of sidewall failure is revealed in mines. Dynamic failure takes place when stresses in the edge areas of mine workings exceed strength limit of rocks. The resultant zones exist in the force interaction and their instability results in destructions and failure.

Keywords: rockburst hazard, stress state zones, indentation parameters of multipoint hydraulic sensor assembly, mathematical modeling, precautions.

References

1. Aksenov A. A., Ozhiganov I. A., Gubanov D. V., Blinov E. F. Integrated precaution and prevention of rockbursts in ore mines. *Mining geomechanics and mine surveying : collection of scientific proceedings*. Saint-Petersburg : VNIMI, 2009. pp. 90–92.
2. Cai M., Kaiser P. K. Rockburst Support : Reference Book. Sudbury : Laurentian University, 2018. Vol. 1. Rockburst Phenomenon and Support Characteristics. 284 p.
3. Aksenov A. A., Morin S. V., Ozhiganov I. A., Shadrin M. A., Sadinov Sh. M. Geomechanical assessment of the Zarmitan gold ore zone of the Navoi Mining and Metallurgical Combinat. *Gornyi vestnik Uzbekistana*. 2017. No. 4. pp. 29–34.
4. Xia-Ting Feng, Jianpo Liu, Bingrui Chen, Yaxun Xiao, Guangliang Feng, Fengpeng Zhang. Monitoring, Warning, and Control of Rockburst in Deep Metal Mines. *Engineering*. 2017. Vol. 3, Iss. 4. pp. 538–545.
5. Li C. C. Principles of rockbolting design. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2017. Vol. 9, Iss. 3. pp. 396–414.
6. Federal Code of Industrial Safety : Safety Regulations for Rockburst-Hazardous Mining. Moscow : NTS PB, 2014. Series 06. Safety, supervision and permission activity in mining industry. Iss. 7. 80 p.
7. Eremenko V. A., Rilnikova M. V., Esina E. N. Monitoring stress-strain state of structural defects and udaroopasnost rock mass. *GIAB*. 2015. Special issue 15. Sustainable Performance Conditions for Mineral Resources Sector of Russia. Iss. 3. pp. 105–115.
8. Aksenov A. A., Ozhiganov I. A., Gubanov D. V. The use of pressings-in method with MHS device in order to determine geomechanical state of massif and its physico-mechanical properties. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 2015. No. 6. pp. 17–22.
9. Latyshev O. G. Inhomogeneity of crack structure and strength of rocks. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 2014. No. 6. pp. 152–159.
10. Fanzhen Meng, Hui Zhou, Zaiquan Wang, Liming Zhang, Liang Kong et al. Experimental study on the prediction of rockburst hazards induced by dynamic structural plane shearing in deeply buried hard rock tunnels. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2016. Vol. 86. pp. 210–223.
11. Selivonik V. G., Voinov K. A. Experience of mining under rockburst hazard. *Gornyi Zhurnal*. 2004. No. 3. pp. 18–24.
12. Slesarev V. D. Rock mechanics. Moscow : Ugletekhizdat, 1948. 303 p.
13. Petukhov I. M., Egorov P. V., Vinokur B. Sh. Prevention of rock bumps in mines. Moscow : Nedra, 1984. 230 p.
14. Zoteev O. V. Stress state modeling in rocks using numerical methods. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 2003. No. 5. pp. 108–115.

ПРИБОР МГД



Прибор МГД с помощью которого получают диаграммы вдавливания пуансона в породы, по характеру которых определяют:

- контактную прочность;
- контактный модуль упругости;
- коэффициент хрупкости.

По изменению диаграмм вдавливания в зоне опорного давления определяют:

- величину напряжений в массиве;
- степени удароопасности отдельных участков;
- устанавливают параметры зоны опорного давления.

РЕКЛАМА