

DOI: 10.25558/VOSTNII.2022.19.55.002

УДК 622.023.23

© В.В. Иванов, В.С. Зыков, С.Г. Ворожцов, А.В. Дягилева, 2022

В.В. ИВАНОВ

д-р техн. наук, проф.,
ведущий научный сотрудник
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово,
e-mail: v.ivanov@nc-vostnii.ru



В.С. ЗЫКОВ

д-р техн. наук, проф.,
зам. генерального директора по научной работе
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово
e-mail: v.zykov@nc-vostnii.ru



С. Г. ВОРОЖЦОВ

заместитель руководителя службы прогноза
предотвращения динамических явлений рудника
«Интернациональный»
МГОК АК «АЛРОСА» (ПАО),
Республика Саха (Якутия), г. Мирный



А. В. ДЯГИЛЕВА

канд. техн. наук, доцент
КузГТУ, г. Кемерово



О МЕХАНИЗМЕ ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСОВ ПОРОДЫ И ГАЗА НА РУДНИКЕ «ИНТЕРНАЦИОНАЛЬНЫЙ» «АК «АЛРОСА» (ПАО)

На руднике «Интернациональный» компании «АЛРОСА» с глубины горных работ более 1190 м начали происходить внезапные выбросы породы и газа, несмотря на низкую газоносность вмещающих пород (доломитов). В статье рассматривается наиболее вероятный механизм внезапных выбросов, основанный на влиянии двух основных факторов — горного давления и газового давления в трещинах вблизи контура выработок, которые повторяют геометрию выработок согласно известной закономерности зональной дезинтеграции массива горных пород вокруг выработок. Приводятся результаты расчета газового давления в трещинах на основании сведений, приведенных в актах расследования газодинамических явлений на руднике «Интернациональный».

рушения) вокруг горизонтальной подготовительной выработки цилиндрической формы.

Для простоты вычислений предположим, что выработка находится в условиях всестороннего равномерного сжатия, причем напряжение на глубине $\rho g H$ равно c , где ρ — плотность пород, g — ускорение свободного падения. Если считать выработку длинной, то напряжения в средней ее части можно считать зависящими лишь от полярного радиуса, т. е. можно рассматривать задачу в цилиндрической системе координат r, φ, z . Уравнения равновесия в этой системе координат в общем виде записываются в следующем виде [2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{r\varphi}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} &= 0; \\ \frac{\partial \sigma_{r\varphi}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma_{\varphi z}}{\partial z} + \frac{2}{r} \sigma_{r\varphi} &= 0; \\ \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\varphi z}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \sigma_{rz} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

В силу симметрии задачи и в силу того, что напряжения должны зависеть лишь от полярного радиуса, в системе уравнений (1) остаются следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} &= 0; \\ \frac{d\sigma_{rz}}{dr} + \frac{1}{r} \sigma_{rz} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Последнее уравнение немедленно интегрируется к виду $\sigma_{rz} = c/r$.

Так как на поверхности выработки отсутствуют касательные напряжения, то при $r = a$, $\sigma_{rz} = 0$ получаем $C = 0$.

Будем считать, что вокруг выработки радиуса a образуется зона разрушенных пород, определим ее размеры, полагая, что в этой зоне максимальные касательные напряжения достигают предельного значения:

$$\sigma_r - \sigma_\varphi = 2k,$$

где k — предельное (критическое) значение максимального касательного напряжения,

при котором наступает разрушение.

Выражая из последнего σ_φ и подставляя в первое уравнение (2), получим дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2k}{r} = 0. \quad (3)$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$\sigma_r = -2k \ln(r) + c_1$$

где c_1 — постоянная интегрирования, которая может быть определена из граничного условия равенства нулю радиальной компоненты напряжения на контуре выработки, т. е. при $r = a$.

Из этого условия находим:

$$c_1 = 2k \ln a.$$

Таким образом, решение нашей задачи имеет вид:

$$\sigma_r = -2k \ln(r/a). \quad (4)$$

Поскольку на границе зоны разрушения напряжения восстанавливаются до уровня $\rho g h$, то, приравнявая напряжение (4) к этой величине, получаем уравнение:

$$\sigma_r = -2k \ln(r^*/a) = -\rho g H,$$

где r^* — радиус границы зоны разрушения.

Откуда находим:

$$\sigma_r = -2k \ln(r^*/a) = -\rho g H, \quad (5)$$

Легко также рассчитать трансверсальную компоненту тензора напряжений:

$$r^* = a \exp(\rho g H / 2k). \quad (6)$$

Для оценки необратимых деформаций рассмотрим сначала приведенную выше модель поведения горного массива — упруго-

пластическую модель (рис. 2а). Пусть упругое состояние сменяется состоянием, в котором достигнуто предельное сопротивление сдвигу, определяемое формулой $\sigma_r - \sigma_\phi = 2k$, где k — предельное (критическое) значение максимального касательного напряжения, при котором наступает разрушение. В этом случае в окрестности выработки существуют две области. В первой, примыкающей к выработке, распределение напряжений определяется формулами (4) – (6).

Во второй области ($r > r^*$) распределение напряжений управляется упругими законами, а перемещение в пластической зоне на контуре выработки можно вычислить из условия упругого изменения объема в области неупругих деформаций.

Значение радиуса r^* зависит от выбора гипотезы, на основе которой вычисляются пе-

ремещения при $r > r^*$, хотя общий смысл сохраняется: зона необратимых (неупругих) деформаций появляется на больших глубинах $\gamma H > 2k \cong \sigma_{сж}$, где $\sigma_{сж}$ — предельное значение сжимающего напряжения при одноосном нагружении.

Рассмотрим другой пример — напряженно-деформированное состояние массива вблизи забоя при подземной разработке пластового полезного ископаемого [1].

Пусть в исходном состоянии напряженное состояние соответствует гидростатическому закону.

Обозначения координат и площадок, на которых действуют главные напряжения, показаны на рис. 2б; направление развития очистных работ указано стрелкой, для длинной лавы деформация близка к плоской.

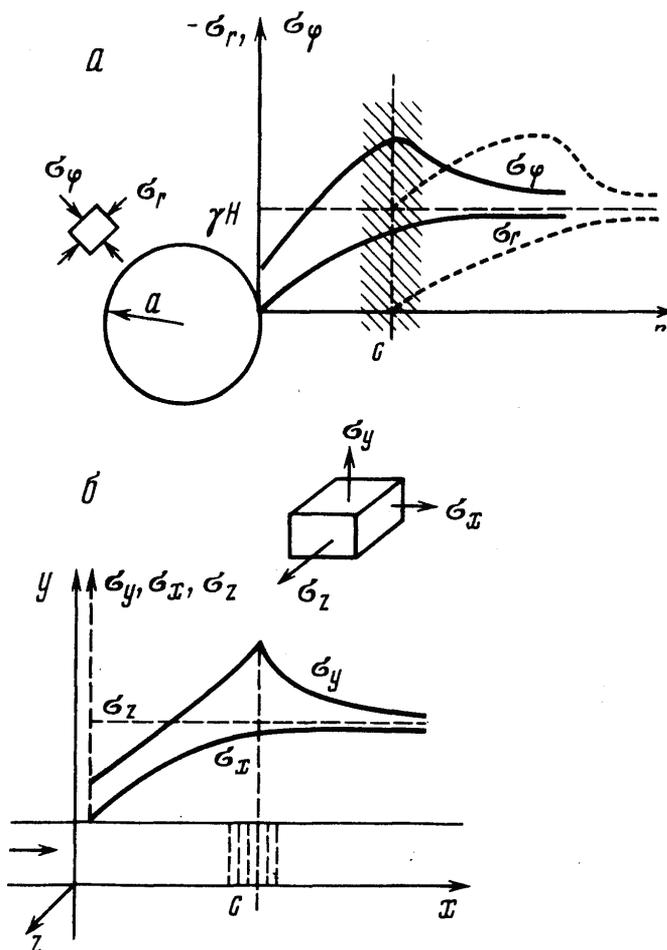


Рис. 2. Схема к теоретическому обоснованию эффекта зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок

Если рассмотреть элементарный объем в глубине пласта, то этот объем находится в состоянии всестороннего сжатия, затем (при развитии очистных работ) попадает в зону опорного давления, причем вертикальная компонента напряжений в несколько раз по величине превосходит критическое значение напряжения на одноосное сжатие. При этом растет вертикальная деформация сжатия, а горизонтальная деформация от сжатия переходит к растяжению — происходит «отжим». Такая картина распределения напряжений является в настоящее время общепринятой, хорошо подтверждается экспериментом при измерениях компонент тензора напряжений на сравнительно небольших глубинах.

Общим для этих двух типичных примеров является возникновение зон повышенного опорного давления, а также то, что величины напряжений в окрестности пика опорного давления превосходят предельное значение прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$. Следует также иметь в виду, что значение этой характеристики для массива отличается в несколько раз (в меньшую сторону) по сравнению с таковой характеристикой для образца.

Если выделить мысленно элементарный объем (с помощью координатных плоскостей), то в любом из этих примеров горная порода в пределах этого объема будет находиться в состоянии трехосного сжатия с наибольшим по величине главным напряжением $\sigma_{\varphi \max}$ (или σ_y) и боковым поджатием меньшей величины. При этом на площадках, перпендикулярных главному направлению нормального напряжения, касательные напряжения практически равны нулю [1].

Известно, что образец, находящийся в таких условиях, разрушается, как бы раскалываясь по поверхностям вдоль главной оси наибольшего по величине сжимающего напряжения. Можно строить различные гипотезы относительно того, как это происходит, но сам факт достаточно хорошо известен для широкого класса прочных горных пород. К числу таких гипотез на микроуровне относят гипотезы о формировании трещин за счет концентрации упругих напряжений на

микроразрывных или за счет появления растягивающих деформаций перпендикулярно главной оси наибольшего по величине сжимающего напряжения. Опираясь на этот факт, можно прийти к выводу о том, что на «больших» глубинах в зоне опорного давления может развиваться разрушение по поверхностям, касательным к поверхности цилиндра (пример с цилиндрической выработкой). Разрушение горной породы с расслоением по поверхностям, концентрическим поверхностям выработки, приводит к разгрузке области, непосредственно примыкающей к контуру выработки. При этом поверхность вне этой зоны становится новой свободной от радиальных напряжений поверхностью — «ложным» контуром, так что $r = r^*$ становится «новым» радиусом цилиндрической полости с повторением всех рассуждений относительно возможности проявлений необратимых деформаций [1].

МЕХАНИЗМ ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСОВ ПОРОДЫ И ГАЗА

При рассмотрении механизма выбросов будем опираться на кинетическую концепцию разрушения горных пород [3]. Суть этой концепции состоит в том, что при высоких механических напряжениях в массиве, которые на глубине 1210 м составляют около 30 МПа, причем вблизи выработок наблюдается чередование зон трещиноватости и концентрации напряжений, происходит процесс накопления трещин (фактор горного давления). При превышении предела прочности пород (доломитов) на одноосное сжатие вблизи контура выработки возникают растягивающие напряжения, что приводит к критическому накоплению трещин с концентрацией $(3L)^{-3}$ согласно концентрационному критерию разрушения, где L — линейный размер накапливающихся трещин. Как правило, этот размер сравним с размерами зерен, слагающих доломиты. Образующиеся трещины заполняются газом (газовый фактор). При этом объем газа, содержащегося в трещинах, выделившегося в процессе внезапного выброса после промывки, можно определить по формуле:

$$V_{\text{газа}} = S_{\text{тр}} \cdot \delta \cdot (3L)^{-3} \cdot V_{\text{пород}} \cdot g,$$

где S — площадь поперечного сечения трещины дискообразной формы; δ — раскрытие трещин; $V_{\text{пород}}$ — объем выброшенных пород; g — газоносность пород.

Вблизи контура выработки возникает система параллельных забоем трещин, причем суммарная сила давления газа в этих трещи-

нах в сторону выработки, может быть подсчитана по формуле:

$$F = S_{\text{тр}}(3L)^{-3}V_{\text{пород}}P,$$

где P — первоначальное давление газа в трещинах после их раскрытия. В табл. 1 приведены результаты расчета размера накапливающихся трещин и суммарной силы газового давления в сторону выработки.

Таблица 1

Результаты расчета раскрытия трещин и суммарной силы газового давления в сторону забоя выработки по данным расследования аварий

Источник данных	Объем выброшенной породы $V_r, \text{ м}^3$	Объем выделившегося газа $V_z, \text{ м}^3$	Раскрытие трещин в предшествующий выбросу момент $\delta, \text{ м}$	Суммарная сила давления газа в сторону забоя в квазипараллельных контуру выработки трещинах, $F, \text{ Н}$
Акт ГДЯ от 17.06.2017	43	228	0,003	$1,6 \cdot 10^9$
Акт ГДЯ от 05.09.2017	1,5	196	0,003	$5,7 \cdot 10^7$
Акт ГДЯ от 27.10.2017	5,5	453	0,003	$2,1 \cdot 10^8$
Акт ГДЯ от 20.11.2017	82	336	0,003	$3,1 \cdot 10^9$
Акт ГДЯ от 25.11.2017	78	487	0,003	$2,9 \cdot 10^9$
Акт от 04.02.2018	52	1433	0,003	$2,0 \cdot 10^9$
Акт от 26.02.2018	12	141	0,003	$4,5 \cdot 10^8$
Акт от 07.03.2018	180	2013	0,003	$6,8 \cdot 10^9$

Из данных таблицы следует, что в результате промышленного взрыва происходит раскрытие трещин, причем практически во всех случаях расследованных аварий это раскрытие примерно одинаково, а вблизи контура выработки возникает суммарная сила давления газов, направленная в сторону выработки и составляющая сотни и тысячи МН.

Как известно, при внезапном выбросе угля и газа при разрушении дегазированного слоя угля между забоем и зоной интенсивного трещинообразования при выемке угля в наиболее слабой точке потенциально выбросоопасной тектонически нарушенной пачки массива вы-

рывается газ, а затем фронт разрушения увеличивается за счет перемещения плоскости обнажения и газового дробления вглубь массива, и образуется, как правило, грушевидная полость.

Полости выбросов на руднике «Интернациональный», наоборот, имеют максимальную ширину на линии забоя.

Это объясняется механизмом внезапных выбросов потенциально выбросоопасных доломитов на руднике, отличным от механизма внезапных выбросов породы и газа.

Слой прилежащего к забоем слоя породы, имеющей прочность на порядок выше по

сравнению с углем тектонически нарушенной угольной пачки, не может быть разрушен давлением газа. Но с увеличением глубины ведения горных работ концентрация напряжений вблизи кромки забоя достигает качественно нового значения по своей величине. При выемке породы новая плоскость забоя перемещается вглубь ближе к максимуму опорного давления, напряжения вблизи кромки забоя возрастают и могут превысить предел прочности породы. Если такое происходит, то прилежащий к забою слой породы хрупко разрушается с отбросом фрагментов породы от забоя, а затем новая плоскость обнажения оказывается вблизи квазипараллельной плоскости забоя системе трещин с более высоким давлением газа. При значительном давлении газа слой породы между обнажением и системой трещин может быть разрушен за счет давления газа. Затем разрушается и отбрасывается за счет еще более высокого давления газа следующий слой, затем следующий, и начинается процесс послойного отделения породы.

В процессе послойного отделения породы происходит газовое дробление блоков и кусков породы, содержащих в трещинах газ под высоким давлением, до мелких и тонких фракций.

За счет перепада давления происходит перемещение разрушенной массы породы в газовом потоке по горной выработке и ее последующее размещение под углом меньше угла естественного откоса, характерного для перемещаемого вида пород. Последнее является важным признаком при отнесении произошедшего ГДЯ к внезапным выбросам породы и газа.

Таким образом, динамические явления, происходящие на руднике «Интернациональный», являются комплексными явлениями. Им присущ главный элемент горного удара — хрупкое разрушение породы вблизи плоскости обнажения. В процессе рассматриваемых явлений активную работу совершают и газ, и горное давление. Согласно [4], такие динамические явления относятся к газодинамическим.

Исходя из вышеизложенного, нельзя отрицать удароопасность горных пород рудника «Интернациональный». Микроудары, про-

исходящие вблизи кромки выбросоопасного слоя при выемке угля, особенно при мгновенном внедрении в массив взрывными работами, являются триггерами внезапного выброса породы и газа.

Такой вывод говорит о том, что для предотвращения внезапных выбросов породы и газа должны применяться более сложные способы, которыми можно защитить массив в окрестности забоя горной выработки как от хрупкого разрушения, так и от возникновения волны послойного разрушения пород вглубь массива.

Положительным моментом данной версии при ее подтверждении является то, что из нее вытекает возможность разработки более надежного метода текущего прогнозирования выбросоопасных зон, чем существующие сейчас.

Для этого следует дополнять метод текущего прогноза выбросоопасности по начальной скорости газовыделения из контрольных шпуров геофизическим методом прогноза удароопасности. Получение опасных значений показателей обоими методами будет говорить о входе забоя выработки в опасную по внезапным выбросам породы и газа зону.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, механизм внезапных выбросов на руднике «Интернациональный» компании «АЛРОСА» состоит в «работе» сочетания двух факторов — горного давления, которое на больших глубинах запускает процесс зональной дезинтеграции массива, приводящий к образованию системы трещин, параллельных контуру выработок, хрупкого разрушения вблизи кромки забоя, и суммарного газового давления в сторону выработанного пространства, которое и завершает процесс выброса.

Его понимание позволяет повысить достоверность прогноза выбросоопасности в проводимых на руднике «Интернациональный» горных выработках, а также правильнее выбирать способ предотвращения его проявлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шемякин Е.И., Фисенко Г.Л., Курленя М.В., Опарин В.Н., Рева В.В., Глушихин Ф.П., Розенбаум М.А., Тропп Э.А., Кузнецов Ю.С. Эффект зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок. Доклад АН СССР, 1986. Т. 289. № 5. С. 1088–1094.
2. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 744 с.
3. Гор А.Ю., Куксенко В.С., Томилин Н.Г. Концентрационный порог разрушения и прогноз горных ударов // ФТПРПИ. 1989. № 3. С. 54–60.
4. Зыков В.С., Лазаревич Т.И. Классификация динамических явлений в угольных шахтах // Уголь. 2016. № 1. С. 47–53.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2022.19.55.002

UDC 622.023.23

© V.V. Ivanov, V.S. Zykov, S.G. Vorozhcov, A.V. Dyagileva, 2022

V.S. ZYKOV

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Deputy Director General for Science
JSC «NC VostNII», Kemerovo,
e-mail: v.zykov@nc-vostnii.ru

V.V. IVANOV

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Leading Researcher
JSC «NC VostNII», Kemerovo,
e-mail: v.ivanov@nc-vostnii.ru

S.G. VOROZHCOV

Deputy Head of the Dynamic Phenomena Prediction and Prevention Service, International Mine Mirny Mining and Processing Plant, ALROSA (PJSC), Mirny

A.V. DYAGILEVA

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
Kuzbass State Technical University, Kemerovo

ON THE MECHANISM OF SUDDEN RELEASES OF ROCK AND GAS AT THE INTERNATIONAL MINE OF PJSC «ALROSA»

At ALROSA's International mine, sudden discharges of rock and gas began from the depth of mining more than 1190 m, despite the low gas content of the host rocks (dolomites). The article discusses the most probable mechanism of sudden emissions, based on the influence of two basically factors — mountain pressure and gas pressure in cracks near the contour of workings, which repeat the geometry of workings according to the known pattern of zonal disintegration of the rock mass around workings. The results of gas pressure calculation in cracks are presented based on the information given in the reports of investigation of gas dynamic phenomena at the International mine.

Keywords: SUDDEN EMISSION OF ROCK AND GAS, MINE, GAS CONTENT OF ROCKS, ZONAL DISINTEGRATION OF MASSIF, CRACKING, GAS PRESSURE, INVESTIGATION REPORT.

REFERENCES

1. Shemyakin E.I., Fisenko G.L., Kurlenya M.V., Oparin V.N., Reva V.V., Glushikhin F.P., Rosenbaum M.A., Tropp E.A., Kuznetsov Yu.S. The effect of zonal disintegration of rocks around underground workings. Report of the USSR Academy of Sciences, 1986. Vol. 289. No. 5. P. 1088–1094.
2. Rabotnov Yu.N. Mechanics of a deformable solid. M.: Nauka, 1979. 744 p.
3. Gor A.Yu., Kuksenko V.S., Tomilin N.G. Concentration threshold of destruction and forecast of mountain impacts // Physical and technical problems of mineral development [Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh]. 1989. No. 3. P. 54–60.
4. Zykov V.S., Lazarevich T.I. Classification of dynamic phenomena in coal mines // Coal [Ugol]. 2016. No. 1. P. 47–53.