

Б.В. Лаптев, д.т.н., Б.Ш. Ахметов, инж.,
Московский государственный горный университет

**об одной концепции ПРИЧИН АВАРИИ НА
КАЛИЙНОМ РУДНИКЕ СКПРУ - 2 ОАО «СИЛЬВИНИТ»**

В январе 1995г. на Втором Соликамском калийном руднике, ведущем разработку Верхнекамского калийного месторождения, произошла крупнейшая авария, выразившаяся в мгновенном массовом разрушении опорных целиков, обрушении пород кровли очистных камер, междупластий с одновременным выделением и вспышкой природных газов. Объем разрушенных пород составил около 3 млн. м³, выделилось газа примерно 1 млн. м³. Несколькими сейсмическими станциями России был зафиксирован сейсмический сигнал длительностью 4 мин., с магнитудой 3,8 и с энергией в 10¹⁰ Дж. Разрушение сопровождалось оседанием земной поверхности над очагом на величину до 4,5 м. Подобные катастрофы ранее происходили на германских калийных рудниках при горных ударах, сейсмограммы, записи которых по своим параметрам схожи с Соликамским явлением.

К сожалению, местоположение сейсмостанций относительно очага события и их режим работы не позволяют до сегодняшнего времени дать точную оценку глубины залегания генератора сигнала. Ранее в 1993г. и позднее в 1997г. в районе г. Березники в площади Верхнекамского месторождения было зарегистрировано три землетрясения примерно с такой же магнитудой, но они не вызвали разрушений в горных выработках в ближайшем к очагам Втором Березниковском руднике.

Указанное не позволило дать однозначную оценку типу произошедшего на Соликамском руднике явления, причин его вызвавших, т.к. в ближайших районах ведется также добыча нефти. Существуют мнения, что первоначально

было землетрясение на глубине около 3 км, которое вызвало массовое разрушение горных выработок, другие считают землетрясение техногенным, спровоцированным обрушением пород в выработанном пространстве рудника, третьи утверждают, что это был горный удар в целиках (ВНИМИ [1]), имеется гипотеза о первоначальном существовании в подработанном массиве полостей расслоений, при потере несущей способности пород в которых последние обрушились, создали динамическую нагрузку на нижележащие опорные целики, под воздействие которой они разрушились (фактически также горный удар [2]). Представленные суждения выглядят не очень убедительно, т. к. не подтверждаются количественными показателями на основе исследований.

Представим нашу концепцию, основанную на энергетической оценке произошедшего события. Необходимо отметить, что сильвинитовые и карналлитовые пласты на Верхнекамском месторождении газоносны и выбросоопасны. Ранее, в 1990 г., на рассматриваемом руднике зарегистрировано весьма крупное газодинамическое явление, при котором объем разрушенной породы составил 2,1 тыс. м³.

На основании результатов предыдущих исследований и проведенных замеров количества выделенных из аварийного очага газов было установлено, что газоносность пород в среднем составляла 0,7 м³/м³. Давление свободного газа на месторождении может изменяться от 1 до 10 МПа (до γН), а в среднем - около 4 МПа. Удельная потенциальная энергия свободного газа, согласно

расчетам, могла составить от 0,9 x 10⁶ до 9,0 x 10⁶ или в среднем - 3,6 x 10⁶ Дж/м³.

Удельная потенциальная энергия упругого сжатия породного массива с учетом реологических, прочностных и деформационных свойств соляных пород различного минералогического состава теоретически на глубинах 300-350 м от земной поверхности должна быть в пределах (0,5 - 1,2) x 10⁶ Дж/м³.

Энергоемкость разрушения единицы объема соляных пород, согласно аналитическим расчетам по полученной нами зависимости, равна 2 x 10⁶ Дж/м³. В расходной части баланса энергий часть их идет на образование сейсмических колебаний массива, создание ударной воздушной волны, придание разрушенному материалу кинетической энергии (на разлет кусков) и часть поглощается вмещающим массивом. Вся сумма этих затрат составляет до 20% от общего запаса энергий в массиве, а на сейсмические колебания до 10% [3].

Общий запас удельной потенциальной энергии соляного массива насыщенного свободным газом теоретически достигает (1,4 - 10,2) x 10⁶ Дж/м³ или в среднем 4,5 x 10⁶ Дж/м³. Расходная часть баланса удельных энергий с учетом дополнительных 20 % затрат могла быть в размере (2,28 - 4,04) x 10⁶ Дж/м³.

Анализ общего теоретического баланса энергий не позволяет дать однозначный ответ о возможной организации самопроизвольно начавшегося самоподдерживающегося процесса разрушения пород.

Для оценки степени влияния сейсмике на устойчивость подземных сооружений в соляных породах произведен расчет поля динамических напряжений по мето-

дике Н.С. Булычева при двух численных значениях коэффициента Пуассона в 0,3 и 0,5.

По данным А.А. Маловичко скорость продольных сейсмических волн в соляных породах достигает 4000 м/с, а поперечных - 2450 м/с. Расчеты показали, что при землетрясениях силой в 5 баллов (аналогично Соликамскому) экстремальные значения напряжений на контуре выработок в случае наложения продольных и поперечных волн составят:

при $\mu = 0,3$ - $\sigma_{\theta \max} = 0,55$ МПа;

$\sigma_{\theta \min} = -0,247$ МПа;

и $\mu = 0,5$ - $\sigma_{\theta \max} = 0,44$ МПа;

$\sigma_{\theta \min} = -0,04$ МПа .

Полученные величины дополнительных напряжений достигают 10 - 15% от действующих статических и могут спровоцировать процесс саморазрушения пород только в предельно напряженных зонах.

Следующим этапом было проведение лабораторных исследований прочностных и деформационных свойств пород в условиях одноосного нагружения. Испытания проводились на породах различного минералогического состава, из выбросоопасных и неопасных зон различных геометрических разме-

ров в соответствии с ГОСТом 21153.0-75 (2-84; 3-85) при скоростях нагружения 0,2 - 0,3 МПа x сек.⁻¹ или деформирования (1-2) x 10⁻⁴ x сек.⁻¹. По данным многочисленных авторов мгновенное, взрывоподобное хрупкое разрушение образцов соляных пород под прессом наблюдается при скорости нагружения не менее 1,0 МПа x сек.⁻¹ или 1 x 10⁰ сек.⁻¹ при нагрузках 80 - 100 % от σ_0 [4]. В ряде случаев были составлены модели «участков пород с динамическим характером их разрушения» (рис. 1). Было получено, что в зависимости от состава пород (карналлит, сильвинит, каменная соль), геометрических размеров образцов $h/d = 2, 1, 0,5$, модулей жесткости нагружающих систем, в качестве которых принимались модули упругости пород вышележащих пластов, энергетические показатели разрушения имеют широкий диапазон изменений даже при одной и той же скорости нагружения.

Прочность пород в выбросоопасных зонах на 25 % и более ниже, чем в неопасных; энергоемкость разрушения также ниже как в допредельной, так и в запредельной стадиях разрушения - (5-7) x 10⁴ и (9-11) x 10⁴ против (8-

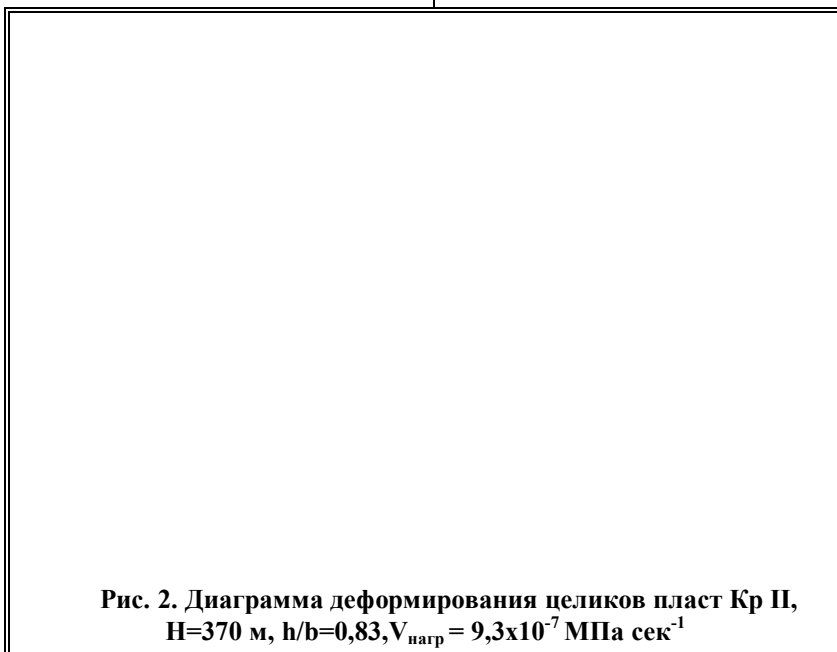
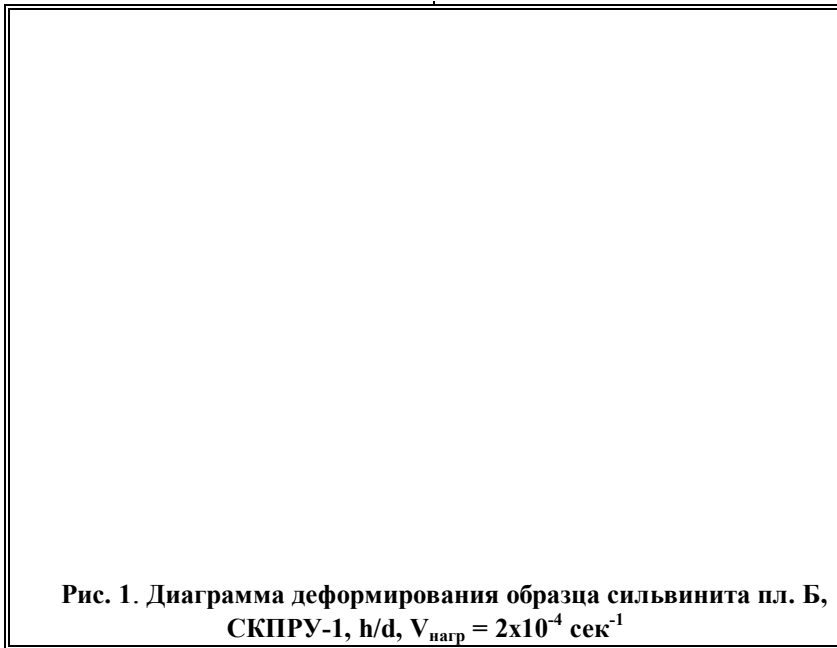
12) x 10⁴ и (24-28) x 10⁴ Дж/м³ для карналлитовых пород (таблица).

Количество кинетической энергии в «динамических моделях» может достигать (2,4-17,0)x10⁴ Дж/м³ и примерно равно величине работы, затрачиваемой на разрушение пород в запредельной стадии. Коэффициенты хрупкости K_4 и K_5 , подсчитанные по методике ВНИМИ, указывают на высокую хрупкость соляных

пород, зачастую модули спада обрабатываемых пластов больше по величине модулей упругости вмещающих пород. Влияние геометрических размеров образцов общеизвестно.

Оценка энергоемкости разрушения пород, а также энергообмена между обрабатываемыми пластами и вмещающими их породами велась по результатам натурных наблюдений за НДС конструктивных элементов камерной системы разработки. По натурным данным также были построены полные диаграммы деформирования пород, построены «модели динамических разрушений» (рис. 2). Измерения напряжений проводились в краевых частях поддерживающих целиков, массивов с помощью методов полной разгрузки, фотоупругости, скважинных и гидравлических деформометров.

Установлено, что геометрические размеры охранных целиков в значительной степени влияют на энергетические показатели разрушения пород. Так, например, при уменьшении ширины целиков в 4 раза (h / b увеличивается с 0,36 до 1,32) количество затрачиваемой энергии в допредельной стадии на пластическое и упругое деформирование возрастает в 2-4 раза ((20,4 и 2,1)x10⁴ Дж/м³ против



(36,9 и 9,3) $\times 10^4$ Дж/м³). В предельной стадии, наоборот, количество энергии, затрачиваемое на разрушение пород в более податливых целиках в два раза меньше (17×10^4 и 40×10^4 Дж/м³). Согласно диаграммам деформирования при принятых параметрах очистных работ скорости и схем отработки пластов, скорости нагружения) кинетическая энергия не накапливается в породах и не реализуется в виде взрывоподобного разрушения. Целики на карналлитовом пласте по энергетическим показателям разрушения мало отличаются от целиков на

сильвинитовых пластах при том, что прочность (особенно выбросоопасных) карналлитовых пород в 1,5 - 2 раза ниже сильвинитовых. Данное обстоятельство объясняется тем, что степень нагружения целиков на карналлитовом пласте в два раза меньше.

Скорость нагружения целиков в природных условиях составляет (1-2,3) $\times 10^{-6}$ МПа \times сек.⁻¹ при максимально зафиксированной в случае встречной отработки сближенных пластов в $5,9 \times 10^{-5}$ МПа \times сек.⁻¹, а скорость деформирования - до 3 $\times 10^{-8}$ сек.⁻¹.

Исследования проводились в приконтурных породах, находившихся в плоском напряженном состоянии. Исследования, проведенные с помощью контактного метода в глубине мощных целиков и в краевых частях массивов показали, что объемная прочность пород примерно в 5 раз выше прочности при плоском напряженном состоянии. В объемном напряженном состоянии величина удельной работы, затрачиваемой на разрушение, составит около $P_{раз.} = 55 \times 10^4 \times 5 = 2,9 \times 10^6$ Дж/м³, что примерно соответствует расчетной величине (2×10^6 Дж/м³).

Таким образом теоретические расчеты показали, что для разрушения пород, находящихся в объемном напряженном состоянии, недостаточно накапливаемой потенциальной энергии их упругого сжатия (горный удар исключен) - $(0,5 - 1,2) \times 10^6 < (2,28 - 4,04) \times 10^6$ Дж/м³. В случае плоского напряженного состояния динамический процесс саморазрушения пород также исключен, т.к. величина энергии нагружающей системы полностью расходуется (равна) на предельное деформирование без выделения кинетической энергии.

При участии энергии газа, как указывалось выше, самоподдерживающиеся процессы саморазрушения вполне реальны, что подтверждается многочисленными газодинамическими явлениями на месторождении.

Хрупкое разрушение соляных пород с динамическим эффектом происходит при лабораторных испытаниях образцов при одноосном нагружении со скоростями, которые на несколько порядков выше, чем наблюдаемые в природных условиях в приконтурных породах ($1,0 \text{ МПа сек.}^{-1}$ против $(2-59) \times 10^6 \text{ МПа сек.}^{-1}$).

В районе аварии на Соликамском руднике к отработке было принято два сильвинитовых пласта АБ и КрII. Ширина камер составляла 16 м, целиков -11м. В соседней панели отработано три пласта - дополнительно вышележащий пласт В сильвинитового

состава. В самом эпицентре аварии не были отработаны две камеры по верхнему пласту АБ и был оставлен целик шириной 65 м, длиной 200 м. Кроме того, запасы вокруг очага отработаны на 1,5 - 3 года ранее, чем внутри него, что повлияло на большую скорость оседания целиков вокруг очага. Таким образом, в районе аварии создавалась горнотехническая обстановка, способствующая накоплению, в первую очередь в неотработанном карналлитовом пласте В, значительных запасов потенциальной энергии пород за счет наличия в центре мощного целика, осадения вокруг него с большей скоростью междукамерных целиков и трехпластовой отработкой на соседней панели, которая реализовалась в форме динамического разрушения пород в огромных размерах.

Как показал анализ горно-геологической обстановки, в районе аварии по пласту В наблюдается смена состава пород от силвинитового к карналлитовому. Подобная смена состава пород характеризуется наличием переходных зон, которые отличаются в пределах Верхнекамского месторождения повышенной газоносностью и пониженной прочностью пород во всей толще калийномагниево-солевых солей. По данным исследований ОАО «Галургия» подобные зоны всегда отличаются наибольшей выбросоопасностью и высокими скоростями оседания подрабатываемой толщи пород. К примеру, если бы даже не было аварийной ситуации, то на данном участке ожидалась по нашим расчетам максимальная скорость оседания подработанной поверхности в 373 мм/год.

Горнотехнических и горно-геологических ситуаций подобных рассмотренным в отдельности на месторождении в выработанном

пространстве имеется значительное количество. Любое проявление сил горного и газового давления в динамической форме является недетерминированным, стохастическим процессом, зависящим от случайного сочетания природных и техногенных факторов. Именно такое сочетание горнотехнической ситуации, при которой породы в районе оставленного мощного целика получили значительную пригрузку и накопили большие запасы упругой потенциальной энергии, и геологической обстановки, отличающейся повышенной газоносностью пород и их пониженной прочностью, привели к динамической форме высвобождения накопленных энергий. Таким образом, вопрос о «взрывчатом веществе» выяснен – его необходимо искать в горнотехнической и горно-геологической обстановках, а вопрос о «детонаторе» остается открытым, т.к. по имеющимся сейсмограммам нет четкого ответа о местоположении очага явления (его глубины). Принятый сейсмосигнал на сейсмостанциях величиной в 10^{10} Дж мог быть вызван самим разрушением соляных пород, как это было при массовом разрушении на одном из германских рудников, когда сейсмическая волна была зарегистрирована в Москве.

Из анализа сейсмограммы следует отметить два момента, выпавших из поля зрения специалистов:

- во-первых, длительность сигнала и его частота больше соответствуют газодинамическим явлениям, а не землетрясениям и горным ударам (4 мин., а не 1-2 мин.);
- во-вторых, если было первоначально землетрясение, а затем обрушение пород в горных выработках или наоборот, то на сейсмограмме должны были быть по две волны (поперечные, продольные и поверхностные), как это имело

место при двух Березниковских землетрясениях 1993 г., произошедших через 6 сек. один после другого.

Таким образом, мы считаем, что произошедшее явление относится к сложному, комбинированному газодинамическому, включающему в себя серию внезапных обрушений, собственно внезапных выбросов и явлений комбинированного типа, проявившихся лавинообразно, почти мгновенно друг за другом, а частично одновременно, и объединившихся в центральной части очага в одно массовое разрушение пород. В краевой части очага разрушения в отдельных камерах произошли одиночные внезапные выбросы пород не объединенные в общую полость разрушения, когда энергии уже не хватило для разрушения междукамерных целиков, т.е. главный и основной потенциал энергии находился концентрированно в центральной части очага.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимов А.Г., Кузнецова Е.И. Причины и последствия внезапного обрушения горных пород на Втором Соликамском калийном руднике// Горный журнал, №8, 1997, с.13-15.
2. Нестеров М.П., Аникин Н.Ф., Марakov В.Е., Зальцзейлер О.В. Об удороопасности силвинитовых целиков в зависимости от отношения их ширины к высоте, от их запредельных деформаций и скорости деформирования//Материалы X Межотраслевого координационного совещания по проблемам геодинамической безопасности. Екатеринбург, - 1997 г., с.128-137.
3. Петухов И.М., Линьков А.М. Механика горных ударов и выбросов//Недра, М., - 1983, - с.150-173.
4. Проскураков Н.М., Пермяков Р.С., Черников А.К. Физико-механические свойства соляных пород//Недра, -М., - с.66-70.

© Б.В. Лаптев, Б.Ш. Ахметов