

# ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ ВЗРЫВОВ: ТЕОРИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ

## О НЕКОТОРЫХ ВОЗМОЖНЫХ ПРИЧИНАХ ВЗРЫВОВ И ВОЗГОРАНИЙ, ВОЗНИКШИХ ПОСЛЕ ВЗРЫВОВ НА ШАХТАХ КУЗБАССА



**Евгений Сергеевич  
Ледяйкин, к.т.н.**



В шахтах, обрабатывающих пласты угля в горно-геологических условиях, характеризующихся областями с высокими тектоническими напряжениями, имеются условия формирования взрыва, не характерные для причин, обычно имеющих место в шахтах, обрабатывающих пласты угля в условиях, не имеющих высоких тектонических напряжений. (В Кузбассе области с высокими тектоническими напряжениями, в шахтных полях, расположены главным образом в южной части, в Осинниковском и Междуреченском районах).

При выемке угля в горно-геологических условиях, характеризующихся областями с высокими тектоническими напряжениями, в процессе горных работ весьма велика вероятность образования обширных участков упругих напряжений (упругого сжатия). Такое состояние характерно для возникновения горного удара. Области, обладающие высокой потенциальной энергией, заключенной в породах, могут образоваться в горном массиве междупластья, примыкающего к краевым частям целиков.

При одновременной отработке сближенных пластов условия для горного удара могут возникнуть в по-

родном массиве между обрабатываемыми пластами (в междупластье при наличии прочных пород).

При выемке пластов, после обрушения кровли и подбучивании необрушившейся части пород междупластья, в оставшейся части междупластья (плите) вследствие давления вышележащих пород и деформации (прогиба), возникают растягивающие и сжимающие усилия, которые формируют напряженное состояние. Это напряжение возрастает при последующем уплотнении обрушившихся пород.

При отработке следующего пласта механизм формирования напряженного состояния повторяется, при этом общее (суммарное) напряжение в массиве увеличивается.

На междупластье (удерживающую плиту) при отработке и последующем уплотнении пород действует удерживающая сила, состоящая из горизонтальной компоненты нормальных напряжений и противодействующая сила, возникающая при сжатии подбучивающих пород как противодействие гравитационной силе, а также общее напряжение вышерасположенного горного массива. При этом возможно два варианта дальнейшего изменения напряженной системы.

1. При увеличении площади подработки, в краевых частях лав у монтажных камер и целиках, к ним примыкающих, возникают гравитационные напряжения, которые в совокупности с тектоническими напряжениями создают участки упругого сжатия пород с большой величиной потенциальной энергии. Вследствие чего возникают упругие деформации в краевых частях массива междупластья. При превышении возникших напряжений над силами сцепления и внутреннего трения в массиве пород возникает потеря устойчивости, поскольку величина потенциальной энергии значительно превышает энергию поглощения (потеря устойчивости, сопровождается нарушением целостности междупластья, образованием блоков и смещением их относительно друг друга по образующимся трещинам), процесс приобретает динамический характер, возникает явление, подобное горному удару.

2. При наработке пласта и снятии напряжения вышерасположенного горного массива противодействующая сила может превысить гравитационную составляющую (веса плиты), вследствие чего произойдет разрядка напряжения в виде горного удара. Механическое действие удара может

### Матрица «вероятность — тяжесть последствий»

Отказ	Частота возникновения отказа в год	Тяжесть последствий отказа			
		Катастрофического	Критического	Некритического	С пренебрежимо малыми последствиями
Частый	>1	A	A	A	C
Вероятный	1 — 10 <sup>-2</sup>	A	A	B	C
Возможный	10 <sup>-2</sup> — 10 <sup>-4</sup>	A	B	B	C
Редкий	10 <sup>-4</sup> — 10 <sup>-6</sup>	A	B	C	C
Практически невероятный	< 10 <sup>-6</sup>	B	C	C	D

Таблица 1

распространиться как вниз, так и вверх или в обоих направлениях, в зависимости от величины напряжения.

Физическая модель формирования условий для горного удара могла быть следующей.

На образовавшееся после обработки междупластья (удерживающую плиту) в сторону, подработанную и подбученную породой после обрушения, действует гравитационная сила  $P$  (сила тяжести  $F_m$ ) и сила  $F_{c.z.n}$ , возникающая вследствие действия горизонтальной составляющей нормальных напряжений. Удерживается междупластье (плита) силами сцепления и внутреннего трения в массиве породы  $F_{c.v.m}$  и упругими силами противодействия, возникающими в сдавленной подбучивающей породе  $F_{y.c.n.n}$ .

Для сохранения равновесия необходимо, чтобы выполнялось условие [13]:

$$\frac{F_{c.v.m} + F_{y.c.n.n}}{F_{c.z.n} + P} \geq 1$$

В данном условии переменными величинами являются площади подработываемого и надработываемого массива.

Так,  $F_m = \gamma_n S h \sin \alpha$ :

Где  $\gamma_n$  — удельный вес породы;

$H$  — расстояние от междупластья (плиты) до поверхности;

$S$  — сечение, подработанного междупластья (плиты);

$\alpha$  — угол наклона.

$F_{c.z.n}$  зависит от давления вышележащих пород, которое создается гравитационной силой, то есть ее изменение связано с изменением площади;

$F_{c.v.m}$  — величина практически постоянная, зависит от свойства пород, слагающих массив междупластья (плиты);

$F_{y.c.n.n}$  — зависит от свойств сдавленной подбучивающей породы и возможности прогиба междупластья (плиты), которое возникает вследствие давления.

По мере обработки пласта площадь подработываемого междупластья (плиты) постоянно увеличивается. Слагаемое в знаменателе, условия равновесия, возрастает практически прямо пропорционально площади  $S$ , в то время как величина  $F_{y.c.n.n}$  в основном определяется свойствами пород.

При переходе из состояния

$$\frac{F_{c.v.m} + F_{y.c.n.n}}{F_{c.z.n} + P} \geq 1$$

в состояние

$$\frac{F_{c.v.m} + F_{y.c.n.n}}{F_{c.z.n} + F_m} = 1,$$

система будет находиться в состоянии неустойчивого равновесия с постоянно возрастающим напряженным суммирующимся с тектоническим напряжением, присущим данному месторождению. Для дальнейшего перехода системы в состояние

$$\frac{F_{c.v.m} + F_{y.c.n.n}}{F_{c.z.n} + P} \leq 1$$

достаточно незначительных изменений. Разрушение системы может возникнуть мгновенно под действием малых внешних или внутренних возмущений (не связанных с производством, например, импульса от повышенной сейсмичности, от взрывных работ и др.).

При нарушении равновесия знак в условии меняется на противоположный. При этом, так как система находилась в напряженном состоянии, в месте или в местах наибольшего напряженного состояния в результате действия потенциальной энергии сжатия и горного давления происходит изменение состояния системы, мгновенное снятие напряжения, посредством разрушения целостности массива (разрушения междупластья (плиты)). В результате возникает явление, характерное для горного удара.

Происходит разрядка напряжения с формированием ударной волны. Ударная волна, распространяясь по массиву горных пород, вызывает

образование трещин и разделение массива на крупные блоки, которые смещаются по линии разлома на некоторые величины. При этом в трещинах разлома возникают электрические поля высокой напряженности порядка 10<sup>8</sup> В/см, в которых происходят электрические разряды [3].

Изучение возможности возникновения в горных породах электрических полей при воздействии на них механических нагрузок проводилось и было подтверждено Томским политехническим институтом и Сибирским филиалом ВНИИМИ. Образование электрических разрядов при разрушении горных пород наблюдалось (фиксирувалось) в лабораторных условиях лабораторией горных ударов Сибирского филиала ВНИИМИ. Причем «электрические разряды регистрировались при разрушении углей, алевролитов, песчаников и других разновидностей горных пород» [3].

При смещении породных блоков, от трения породы о породу под большим давлением, происходит воспламенение метановоздушной смеси от образующихся искр, а также теплового воздействия раскаленной зоны, образующейся в местах трения [3] [6]. Данные явления были проверены опытным путем лабораторными исследованиями ВостНИИ на специальных стендах. Из 64 опытов 11 закончились выгоранием метана, 40 — взрывами [3].

Возможность взрывов и загораний метана по этой причине подтверждается реальными взрывами, возникшими на шахтах. В условиях Кузбасса, по выводам комиссий, также были случаи загораний и последующих взрывов. В технической литературе [3] приведены случаи возникновения взрыва в лаве №324 на ш. «Капитальная» ПО «Южжубассуголь» в 1976 г. На ш. «Томская» ПО «Южжубассуголь» в 1974 г. в лаве 3-1-6 на момент возникновения аварии, происходили резкие удары.

На ЗАО «Распадская-Коксовая» 4 апреля 2011 года (в поле шахты №1) в 14 часов 33 минуты произошло разрушение перемычек, изолирующих выработанное пространство выемочных камер 1-2-10; 1-2-12 участка КСО-1-2 (камерно-столбовая система обработки) по пласту IV-V. По выводам экспертной комиссии, «при обрушении кровли образовалась волна

сжатия газовой среды, вследствие чего возникла ударная волна слабой интенсивности. При этом от фрикционного трения при смещении породных блоков или от искр, при ударе перемещающейся породы об металлические предметы, оставшиеся в завале, возник тепловой импульс, в результате чего произошло воспламенение небольшого объема метановоздушной смеси.

По тектоническим условиям району, в которых вели работы данные шахты, сходны с условиями геологического района, в котором работает шахта «Распадская».

Если рассматривать только эти два случая, период возникновения взрыва в год по этой причине составит  $P(\bar{T}) = 2010-1974 = 36$  лет. Частота аварии (взрыва) в год по этой причине  $P^*(A) = 2/36 = 0,0555$ . Если рассматривать только Междуреченский район,  $P^*(A) = 1/36 = 0,0277$ .

В соответствии с «Методическими указаниями по проведению анализа риска опасных производственных объектов» РД 03-418-01 [8] Таблица 1, возникновения отказа, в данном случае аварии (загорания, приведшего к пожару) с частотой  $1 - 10^{-2}$  классифицируется как «вероятный».

Так как частота рассматривается как статистическая вероятность [7], можно считать, что статистическая вероятность события  $P^*(A)$  находится в пределах (0,0277–0,0555). Данные величины достаточны для характеристики возможности данной аварии по рассматриваемой причине как вероятное событие. Рассмотрим такое событие на примере шахты «Распадская».

Статистическая вероятность такого события во время аварии, происшедшей 8 мая 2010 г. на ш. «Распадская», с учетом времени начала отработки четвертого блока составит  $P(\bar{T}) = 2010-1974 = 36$   $P^*(A) = 1/36 = 0,0277$ .

При возникновении горного удара и разрушении междупластья (плиты) на отдельные блоки, которые по всей вероятности произошли между пластами 6 и 7.

При образовании трещин и образовании электрических разрядов, а также от теплового действия раскаленной зоны, от трения породы о породу при смещении породных блоков под большим давлением, в отработанном пространстве в лаве 5а-6-18 или 5а-7-28, могло произойти воспламенение метановоздушной

смеси. Причем воспламенение могло распространяться как в выработанном пространстве одной из лав (лава 5а-6-18), так и одновременно в отработанных пространствах обеих лав.

В результате горного удара и воспламенения метановоздушной смеси, в свободных полостях отработанного пространства, примыкающих к целикам, возникает дефлаграция (турбулентное горение, распространение пламени порядка 100 м/с) [4].

Кроме того, в результате динамического явления (горного удара) осевшая на кромке целика и обрушившейся породе отработанного пространства мелкодисперсная угольная пыль переходит во взвешенное состояние и может принять участие в горении (взрыве).

Возможны следующие варианты развития события:

1 При наличии свободного пространства (купола обрушения) под зависшим междупластьем (плитой) образовавшаяся пылеметановоздушная смесь взрывоопасной концентрации под действием ударной волны и электрических разрядов взрывается, детонирует. Смесь может взрываться не только от электрических разрядов, но и детонировать от ударных волн при адиабатическом сжатии и повышении температуры смеси до 565°C [3].

2. Происходит дефлаграционное горение пылеметановоздушной смеси с образованием больших концентраций оксида углерода ( $CO > 2\%$ ) [4]. За счет температурного расширения в отработанном пространстве происходит образование областей повышенного давления и перемещение (выдавливание) метановоздушной смеси и других газов в свободные объемы.

3. При достижении больших свободных объемов в отработанном пространстве, например, изолированных выработок, примыкающих к выработанному пространству и с образовавшейся пылеметановоздушной смесью взрывоопасной концентрацией (в данном случае сбоек), происходит взрыв. При этом происходит выдавливание оксида углерода в действующие выработки, примыкающие к выработанному пространству (в данном случае лавы) и выход ударной волны в действующие выработки.

4. При перемещении блоков в вертикальном направлении (обрушении) на «больших площадях создаются крайне опасные ситуации, при кото-

рых возникают сильные волны сжатия, переходящие в ударные волны слабой интенсивности. В этих случаях на участках прохождения волн сжатия и ударных волн, в горных выработках одновременно будут образовываться взрывоопасные концентрации метана за счет выброса волной из выработанного пространства высококонцентрированной метановоздушной смеси [2].

Таким образом, взрыв в выработанном пространстве с большой степенью вероятности мог произойти от следующих причин:

- от фрикционного трения при смещении породных блоков и образования нагретых поверхностей в зоне смещения;

- от образующихся электрических полей высокой напряженности или электрических искр, при разломе кровли на отдельные блоки;

- от ударной волны, возникающей вследствие действия упругих напряжений (упругого сжатия), которые обладают высокой потенциальной энергией, заключенной в породах, примыкающих к краевым частям и в горном массиве междупластья. Высвобождения потенциальной энергии вследствие изменения напряженного состояния горного массива, проявляющееся в виде горного удара, образования ударной волны и разрушения горного массива. В этом случае газовой смеси может взорваться (или детонировать);

- от перемещения блоков обрушения в вертикальном направлении на больших площадях, создающих опасные ситуации, при которых возникают сильные волны сжатия газовой среды, переходящие в ударные волны слабой интенсивности, образование искр, при ударе перемещающейся (летающей) породы об металлические предметы, оставшиеся в завале.

В данном разделе не рассматривалось влияние геодинамического фактора (землетрясения) как причины горнодинамических факторов, приведших к взрыву, ввиду того, что вопрос не анализировался из-за недостаточности фактического материала, указывающего на прямую связь этих явлений.

Хотя публикации о влиянии такого природного явления, как землетрясение, на формирование опасности, связанной с повышением горного давления, инициирования горноди-

намических явлений, повышение газовыделения, в последнее время появляются довольно часто.

Влияние геодинамического фактора (землетрясения) как причины (инициатора) разрядки участков упругого сжатия пород с гравитационными и тектоническими напряжениями и выделения большой величины потенциальной энергии в отработанном пространстве, создавшего условия для возникновения источника воспламенения (фрикционное трение, возникновение в горных породах электрических полей, образование электрических разрядов при разрушении горных пород), весьма возможно. Есть основания для рассмотрения такого развития событий, на формирование условий, приведших к взрыву на шахте «Распадская», так как непосредственно перед аварией, по данным станции «Лужба» Междуреченского района, наблюдался повышенный фон сейсмической активности.

Скрытая непредвиденная угроза может быть заключена в одновременном возникновении нескольких факторов опасности, возникающих от одной причины, которая исходя из ее физических свойств не предполагает создания того или иного опасного фактора в отдельности.

Например, для возникновения взрыва необходимо наличие следующих факторов:

- достаточный объем взрывоопасной концентрации метановоздушной смеси;
- источник воспламенения;
- совмещение во времени и пространстве этих событий.

Для возникновения взрыва с большими разрушительными последствиями дополнительно необходимо:

- наличие отложившейся в горных выработках угольной пыли во взрывоопасных концентрациях;
- перевод ее во взвешенное состояние.

Меры предупреждения причин возникновения этих опасностей зачастую специализированны. И не затрагивают (не включают в себя) взаимосвязь с опасностями иного рода.

Гравитационные напряжения, которые в совокупности с тектоническими напряжениями создают участки упругого сжатия пород с большой величиной потенциальной энергии. Вследствие чего при потере устойчивости нарушение целостности массива пород приобретает мгновенный (динамичный) характер при этом возникает явление, подобное горному удару, мощность которого может быть очень значительна.

Возникновение источника воспламенения как фактора опасности при таком явлении считается невероятным (не предполагается в качестве причины). Возникновение объема взрывоопасной концентрации метановоздушной смеси, перевод во взвешенное состояние угольной пыли также считаются маловероятными событиями для рассмотрения опасности взрыва во взаимосвязи с подобной причиной.

Вместе с тем при совместном наличии определенных условий (абразивность пород, сдвигение блоков разлома при разрядке напряжения, резком проседании кровли и др.)

вероятность образования искр или раскаленных областей в плоскости сдвига, способных воспламенить пылеметановоздушную смесь, проверена опытным путем и подтверждается в практике.

Повышение метановыделения при повышении горного давления — общеизвестный факт, так же, как и повышение запыленности воздуха при явлениях, связанных с изменением напряженного состояния горного массива (горном ударе). Так как реализация (появление) этих опасностей обусловлена одной и той же причиной, то одновременность (совпадение) во времени и пространстве является естественным условием.

Накапливание опасностей, проявление которых обусловлено одной причиной, создает совокупность условий для возникновения неустойчивого состояния системы, которое может измениться от одного-двух, казалось бы, незначительных факторов, инициирующих катастрофическое разрушение системы. Например, при высокой скорости подвигания очистного забоя увеличивается площадь обнажения, рост напряжения и потенциальной энергии сжатия в единицу времени, что само по себе может вызвать внезапное обрушение на большой площади, а при дополнительном импульсе внешнего характера (сейсмическая активность) и динамическое явление типа горного удара.

(Продолжение в следующем номере и на сайте журнала: [www.fk42.ru](http://www.fk42.ru))

1. «Методические рекомендации по классификации аварий и инцидентов на опасных производственных объектах угольной промышленности». РД 05-392-00.
2. Г.Г. Стекольников. «О потенциальной опасности образования воздушных волн в горных выработках при посадке пород труднообрушаемой кровли». ВостНИИ. «Безопасность работ в угольных шахтах». 1994 г.
3. А.А. Мясников, С.П. Старков, В.И. Чукунов. «Предупреждение взрывов газа и пыли в угольных шахтах». Москва. «Недра». 1985 г.
4. А.В. Ремизов. «Механизм протекания взрыва в угольной шахте». «ТЭК и ресурсы Кузбасса № 50». Кемерово. 2010 г.
5. С.Н. Осипов. «Борьба со взрывами газа в горных выработках». Москва. «Недра». 1972 г.
6. О.В. Смирнов, А.Т. Айруни. «Взрывы газопылевоздушных смесей в угольных шахтах». Москва. 2000 г.
7. Е.С. Вентцель. «Теория вероятностей». Москва. «Наука». 1969 г.

8. «Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов». РД 03-418-01.
9. «Правила безопасности в угольных шахтах». ПБ 05-618-03.
10. В.И. Саранчук. «Окисление и самовозгорание угля». Киев. 1982 г.
11. «Инструкция по предупреждению и тушению подземных эндогенных пожаров в шахтах Кузбасса». Кемерово. 2007 г.
12. В.И. Мамаев, Ж.А. Ибрагимов, В.А. Лигай и др. «Предупреждение взрывов пылеметановоздушных смесей». Москва. «Недра». 1990 г.
13. А.В. Шадрин, А.О. Чугуев. «Автоматизированный прогноз предвзрывного состояния угольного пласта в процессе его отработки». «Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности». №1. 2010 г. ВостНИИ. Кемерово.
14. Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. «Теория вероятностей». Москва. «Наука». 1973 г.