

УДК 622.035

## Динамические явления при сооружении туннелей в масштабах мировой практики

Лысиков Б. А.<sup>1</sup>, Кауфман Л. Л.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Донецкий национальный технический университет, Донецк, Украина

<sup>2</sup>Массачусетский технологический институт, Бостон, США

---

### Аннотация

Представлен зарубежный опыт решения проблемы внезапных выбросов породы при сооружении туннелей, механизм и способы предотвращения этого явления.

---

#### 1. Постановка проблемы

Во многих странах мира при разработке полезных ископаемых в течение последнего столетия зафиксированы многочисленные динамические явления: внезапные выбросы угля и газа, песчаника и газа, калийных солей и газа, которые происходили в осадочных породах.

Представлены геологические и горно-технические условия проявления выбросов, влияние горно-геологических условий, физико-механических свойств, напряженного состояния на выбросоопасность угольных и породных пластов. Разработаны способы прогнозирования и предотвращения этого явления [1].

В середине XX века зафиксированы выбросы изверженных пород (порфирита) и углекислого газа при строительстве 50-ти километрового туннеля Арпа-Севан в Армении [2].

Авторами произведен обзор зарубежных источников и представлен материал по динамическим явлениям, имевшим место при сооружении туннелей в той трактовке, как представляют это явление зарубежные специалисты.

Одной из главных причин выбросов являются напряжения в породном массиве. Силы, необходимые для разбрасывания тонн пород, требуют участия высоких напряжений. Другой решающий фактор – тип пород: выбросы не происходят в слабых породах. Предполагается, что напряжение, которое в принципе может привести к выбросу, в слабых породах высвобождается медленно. Породы, в которых происходят выбросы, почти всегда твердые, прочные и хрупкие. Они могут иметь прочность на сжатие от 100 до 400 МПа.

Давление веса пород, перекрывающих район ведения горных работ не всегда достаточно, чтобы создать напряжения, необходимые для выброса. Должен также существовать механизм, производящий локализованное увеличение напряжений в породах. Это может происходить в местах вулканических интрузий и других неоднородностей пород, концентрирующих напряжения в ограниченных пунктах.

#### 2. Цель исследования

Установление единства природы внезапных выбросов при строительстве и эксплуатации угольных и галогенных месторождений, т. е. динамических явлений в осадочных породах и при строительстве туннелей в изверженных породах с целью использования единых (идентичных) существующих и разработки новых способов прогноза и методов борьбы с этими динамическими явлениями.

#### 3. Обзор существующих гипотез

Одно из объяснений происхождения внезапных выбросов породы заключается в том, что они являются нестабильными формами высвобождения потенциальной энергии пород вокруг зоны экскавации. Другое объяснение предполагает, что изменения, вызванные горными работами, служат только пусковым механизмом остаточных динамических событий, вызываемых, главным образом, энергией напряжений, причиной которых является геологические различия в состоянии породного массива. Оба эти объяснения могут быть правильными [3].

В США существуют несколько определений внезапного выброса породы, сделанных рядом государственных агентств. Эти определения, однако, не идентифицируют условия или причины выбросов:

– «это явление, которое происходит, когда породный массив напряжен свыше предела упругости, а его аккумулированная энергия высвобождается, мгновенно сопровождаясь обрушениями пород»;

– «мгновенное обрушение пород, вызываемое выталкиванием материала на поверхность полости или сейсмическим воздействием на горные работы»;

– «внезапное и бурное обрушение большого объема сверхнапряженных пород, вызываемое мгновенным высвобождением большого объема аккумулированной энергии».

В эти определения входят нестабильные явления, начиная с резкого отслаивания нескольких малых кусков породы и кончая сейсмическими событиями, которые перемещают большие объемы породы и подобны локальным землетрясениям.

Важным признаком возможности возникновения внезапного выброса является расслоение на диски керна разведочного бурения. Такое расслоение обычно происходит на большой глубине и в крепких породах: граните, гнейсе, андезите и песчанике. Это явление – признак высоких напряжений, перпендикулярных оси скважины, причем, чем выше напряжение, тем на более тонкие диски происходит разделение керна.

Механизм образования дисков заключается в следующем. Разрывные или растягивающие напряжения, возникающие на внешней части керна, распространяются на его тело. Когда эти напряжения превышают прочность пород на растяжение, происходит разделение керна на диски.

Образование дисков сопутствует внезапным выбросам породы и поэтому может быть признаком их проявления. Так, в туннеле Jwate, Япония длиной 25,8 км во время экскавационных работ в туфовых породах в местах, где керны разделялись на диски, наблюдались экстраординарные деформации крепи и явления, подобные внезапным выбросам породы.

Здесь проводилось горизонтальное разведочное бурение, показавшее наличие дисков в кернах, а при перекрывающей толще пород более 200 м произошло обрушение забоя с характерным шумом. Обычно в породных массах, подобных туфу, деформации пород происходят в виде пучения позади забоя. В случае туннеля Jwate породы в забое периодически расщеплялись на блоки в форме тонких плит, толщина которых была меньше 1 м. Затем забой обрушался подобно внезапному выбросу, характерному при отрывных напряжениях в породном массиве [4].

Появление предупредительных признаков внезапного выброса показывает необходимость принятия мер по уменьшению вероятности его возникновения. В настоящее время при сооружении туннелей практических путей предотвращения внезапных выбросов не существует. Определенные меры могут быть приняты до минимизации тяжести их последствия. Например, уменьшение скорости подвигания забоя строящегося туннеля. Когда забой подвигался в высоконапряженных породах, перед ним развивается трещиноватая зона. В то время, как большинство трещин появляется в пределах нескольких часов после взрывных работ, граница трещиноватой зоны продолжает мигрировать в течение суток. Глубина этой зоны зависит от размеров забоя и уровня давления горных пород. Трещиноватая зона служит «подушкой» саморазгрузки пород между нетронутым массивом и сооружаемой полостью.

Слишком быстрое подвигание забоя не дает времени развиться этой зоне постепенно и достичь равенства напряжений, тогда событие выброса становится очень вероятным. В таких случаях должно быть сокращено подвигание забоя за цикл.

Вторым важным фактором, снижающим воздействие выброса является крепь туннеля или другой строящейся плоскости. Традиционная конструкция крепи не выдерживает этого воздействия, поскольку она предназначена для поддержания собственного веса пород, но не для динамических ударных нагрузок, вызываемых выбросом. Жесткая крепь или усиленные тампонажем породы не способны к податливости и, следовательно, обрушаются или деформируются почти мгновенно во время выброса, позволяя породам, окружающим полость, заполнить ее.

Податливая крепь поглощает энергию деформаций и, таким образом, может уменьшить повреждения от динамических ударов. Такие крепежные системы позволяют удержать породы в

пределах трещиноватой зоны вокруг полости и деформироваться самим вместе с трещиноватыми породами.

При подземных работах очень трудно предотвратить большинство внезапных выбросов. Во многих случаях, однако, возможно избежать выброса разгрузкой массива от горного давления. Это может быть достигнуто искусственным с помощью взрывных работ, образованием в породах трещиноватой зоны для уменьшения напряжений.

Разгрузочное взрывание рассеивает потенциальную энергию напряжений, вызывая трещиноватость, которая, в свою очередь, создает податливость массива. Обычной процедурой для успешного применения разгрузки является взрывание, по крайней мере, двух параллельных скважин, пробуренных с опережением забоя и двух скважин, направленных под углом к стене туннеля. Это уменьшает высокие напряжения перед забоем, формирующиеся после взрывного цикла проходки и, таким образом, устраняет или позволяет контролировать «стреляние» породы – малые выбросы.

#### 4. Изложение основного материала исследования

После проявления и регистрации выбросов породы при проведении туннелей (в первой половине XX века) развиваются классификационные системы их оценки. За главный критерий принимался размер ущерба, но учитывались также амплитуда и продолжительность ощущения вибраций. Легкой категорией считался выброс менее 10 т породы, средней – 10–50 т, тяжелой – более 50 т. Независимо от величины ущерба, регистрируются также выбросы, приводящие к травмам или смертельным повреждениям персонала.

Эти оценки в ранних 1980-х гг. были дополнены значением «магнитуда», применяемым к любым сейсмическим событиям, например, землетрясениям. Величина магнитуды – относительная оценка силы события, основанная на измерениях максимального перемещения его субъекта. Наиболее широко для таких оценок применяется шкала Рихтера (Richter) и шкала Nuttli, которая обычно используется в восточной Канаде.

Шкала Рихтера является логарифмической. Это означает, что каждый следующий шаг в шкале в 10 раз увеличивает оценку сейсмического события. В такой шкале события могут иметь также отрицательные значения магнитуды.

К примеру, для подземных объектов, строящихся в крепких породах, сейсмические события могут быть следующими:

- малые, расположенные в диапазоне по Рихтеру от  $-3$  до  $-2$ . Эти события могут быть услышаны, как хлопок или удар, на тихом рабочем месте;

- средние, имеющие по Рихтеру магнитуду равную  $-1$ , могут звучать, как громкий хлопок или удар. Событие будет слышно и замечено на расстоянии более сотни метров от источника. На рабочем месте такое событие может испугать большинство людей;

- большие, имеющие по шкале Рихтера магнитуду равную  $0$ , могут звучать подобно очень близкому удару грома или выстрелу. Такие события обычно слышны по всей выработке и могут ощущаться на поверхности (в нескольких сотнях метров от источника). Возникающие вибрации аналогичны вибрациям при взрывных проходческих работах;

- очень большие, имеющие по шкале Рихтера магнитуду равную  $1$  или  $2$ , определенно ощущаются на поверхности, имеют вибрацию равную массовому взрыву при добычных работах по отбойке руды. Региональные сенсоры землетрясений часто могут зарегистрировать событие с такой магнитудой.

В табл. 1 приведены субъективные параметры осязательности сейсмического события в зависимости от его магнитуды.

Проведенные исследования и расчеты позволили установить взрывчатый эквивалент, кинетическую энергию и радиус зоны воздействия динамического события от его магнитуды при проведении туннелей по выбросоопасным породам. Результаты представлены в табл. 2.

Табл. 1. Приведены субъективные параметры осознанности сейсмического события в зависимости от его магнитуды

Магнитуда по Рихтеру	Степень осознанности
-3,0	- малые удары или толчки, услышанные вблизи источника. Обычно такие события могут быть услышаны только относительно близко к источнику; - событие слышимо, но вибрации слишком малы, чтобы быть осознанными.
-2,0	- значительные вибрации; - событие ощущается, как глухой звук или рокот (может быть осознано на расстоянии более 100 м).
-1,0	- событие ощущается персоналом строительства; - вибрации пород ощущаются близко к событию, как взрывные работы.
0,0	- вибрации осознанны и слышны во всей выработке; - удар может быть осознан (но не услышан) на поверхности в сотнях метров от события; - вибрации осознанны на поверхности подобно взрывным работам в подготовительных забоях.
1,0	- событие осознано и слышно очень отчетливо на поверхности; - вибрации осознанны на поверхности подобно добычным взрывам в рудной шахте; - событие может быть зарегистрировано региональными сейсмическими системами, расположенными в сотнях километров от события.
2,0	- вибрации осознанны на поверхности сильнее, чем большой добычной взрыв; - событие регистрируется геологической наукой.

Табл. 2. Зависимость зоны воздействия сейсмического события от его магнитуды

Магнитуда, м	Кинетическая энергия, мДж	Взрывчатый эквивалент, кг	Радиус зоны воздействия, м
-1	0,002	0,04	0,8
0	0,06	1,2	2,6
1	2,0	40	8,5
2	60	1200	26
3	2000	40000	84
4	60000	1200000	270

Установлено, что кроме уровня магнитуды динамического события, его последствия определяются расстоянием от источника события (рис 1).

Далее приведены примеры снижения воздействия выбросов породы при сооружении туннелей в мировой практике туннелестроения [5].

В туннеле Нюангер-Ланефjord длиной 7,52 км проходческие работы начались в конце 1982 г. Породный массив состоит, в основном, из различных типов гнейса. Часто встречаются линзы амфиболита, редко – слои кварцита.

Прочность пород на сжатие находится в пределах 60–200 МПа в зависимости от их состава, структуры, размера зерен и т. д. Гнейсы представляют из себя монолитный массив с относительно немногими трещиноватыми зонами. В середине горного хребта мощность толщи пород, перекрывающих туннель, составляла 1100 м.

Сечение туннеля почти полукруглое имеет площадь 50 м<sup>2</sup>. Туннель проходил с двух сторон – Нюангер и Ланефjord по обычной технологии буровзрывных работ.

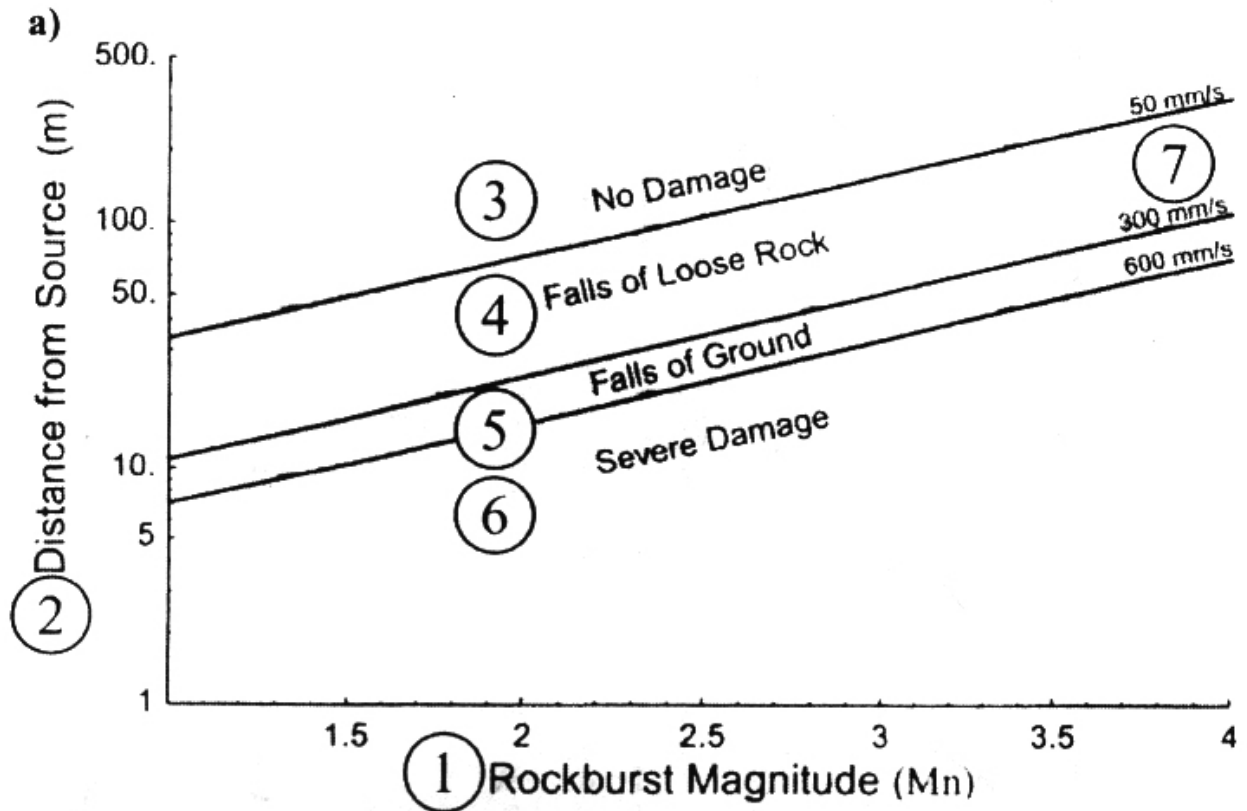


Рис. 1. Зависимость последствий выбросов породы от магнитуды и расстояние от центра событий

- 1 – магнитуда; 2 – расстояние от центра событий;  
 3 – отсутствие повреждений; 4 – обрушение пород; 5 – завалы;  
 6 – тяжелые повреждения; 7 – пиковые значения скорости колебаний

Со стороны Lanefjord на первых 500-600 м от портала происходило значительное расслоение пород кровли, которое увеличивалось при дальнейшем подвигании туннеля. Из кровли и забоя происходили выбросы породы. Их максимальная интенсивность была отмечена, когда длина туннеля от портала составила 2000 м, затем при подвигании забоя до 2800 м выбросоопасная активность уменьшилась. Причиной локальной концентрации высоких напряжений стало изменение качества пород от массивного гнейса до слоистого амфиболита.

Для предотвращения расслоения и выбросов пород в туннеле применялась анкерная крепь с диаметром болтов 20 мм и длиной 2,4 м. Вместе с ними устанавливались полимерные картриджи для закрепления анкеров, треугольные плиты под болты в кровле с размерами 400×500×8 мм. При установке болты не подвергались предварительному напряжению, поскольку его необходимая степень достигалась деформацией пород.

В зависимости от интенсивности расслоения и выбросов породы использовались 35–70 анкерных болтов на 4-метровый цикл подвигания забоя. Их общее количество, установленное в туннеле, составило 55 тыс. штук. Позднее было добавлено еще 20 тыс. болтов и 26 тыс. м<sup>2</sup> проволоочной сетки.

Скорость подвигания туннеля на благополучных участках (без проблем с напряжениями пород) составляла 9–11 циклов (10 смен, 40 метров) в неделю. На сложных участках – 5–6 циклов в неделю, т.е. уменьшалось вдвое.

Туннель Heggura служит примером борьбы с выбросоопасными проявлениями нестабильности пород в туннелях, которые проводились в Норвегии по традиционному направлению вдоль фиорда. Общая длина туннеля составила 5,3 км, сечение полукруглой формы имело площадь 39 м<sup>2</sup>.

Породы, пересекаемые туннелем, состояли из разных видов гнейсов с некоторыми включениями амфиболитов. Гнейсы, в основном, представляли собой монолит со средней

степенью трещиноватости и разделения на блоки. Максимальная мощность пород, перекрывающих туннель, равнялась 700 м, общая высота хребта – 1800 м.

Обширное расслоение пород произошло на расстоянии 800 м от портала туннеля. Оно наблюдалось во внешнем углу (со стороны фиорда) кровли сечения и внутреннем углу почвы. Проблемы с напряжениями пород в туннеле были решены комбинацией анкерной крепи и набрызгбетона, армированного стальным волокном. При проведении участка длиной 3800 м было установлено 15500 болтов и 2650 м<sup>3</sup> набрызгбетона или 16 болтов и 2,8 м<sup>3</sup> набрызгбетона на цикл подвигания равный 4 м. Анкерные болты устанавливались после взрывания и оборки породы. После взрывных работ второго и третьего циклов, наносились соответственно первый и второй слои набрызгбетона, до достижения его общей толщины 100 мм. Набрызгбетон направлялся от середины кровли к уровню примерно 2 м от почвы.

Число анкерных болтов на 1 м туннеля варьировалось в зависимости от интенсивности расслоения пород и равнялось 7,7–4,8–3,1 и 2,6 болтов для высокой, средней, низкой или нулевой степени расслоения соответственно. Скорость проходки в зависимости от этого составляла 31,7 м, 39,5 м, 43,5 м и 52,6 м в неделю соответственно.

Гидроэлектрическая станция Kobbelv Hedro Elekteic Project, Норвегия включала туннели, которые по гранитным гнейсам проводились буровыми туннельными машинами. Здесь из-за высоких горизонтальных напряжений на длине 1700 м головного туннеля происходили расслоения пород и их внезапные выбросы. Поэтому непосредственно вслед за подвиганием забоя с рабочей платформы буровой туннельной машины устанавливались анкерные болты, позволяющие создать общую «балку» из отдельных слоев породы. Однако, проведение таких работ привело к снижению скорости проходки и потребовало двух месяцев сверх установленного графика строительства.

Железнодорожный туннель Lotschberg Base, Швейцария испытал проблемы, связанные с опасностью внезапных выбросов породы. На трассе строительства мощность перекрывающего слоя пород, состоящих из гранита и гранодиорита, достигает 2000 м в двух местах. Мощность более 1500 м представлена на участке туннеля длиной около 9,3 км в связи с этим, риск внезапных выбросов породы в условиях туннеля очень высок.

При работе машины в выбросоопасных зонах замечались сильные звуковые явления, но выбросы пород не наблюдались, очевидно, по той причине, что большая часть энергии массива высвобождалась в пределах щита, т. е. в 4 м от забоя.

На участках туннеля, строящихся буровзрывным способом, ощущались спорадические звуковые явления. В опасных местах для предотвращения выбросов устанавливалась анкерная крепь и наносился набрызгбетон, армированный стальным волокном. По периметру туннеля укреплялась проволочная сетка. Анкерные болты длиной 3–3,5 м располагались по решетке 1×1,5 м и 1×1 м. Дополнительную защиту обеспечивали поданкерные плиты размером 22×50 см.

Гидроэлектрическая станция Alfalfal, Чили расположена в Чилийских Андах примерно в 50 км восточнее Santiago на высоте 1330 м над уровнем моря. Станция включает в себя подземную систему длиной 25 км подачи напорной воды, состоящую из туннелей Olivares, Colorado и Alfalfal Main Water Tunnel, которые передают воду в объеме 27 м<sup>3</sup>/сек. к турбинам электростанции. Разница гидравлических уровней системы составляет 700 м.

При проходке туннеля Alfalfal Main Water Tunnel была встречена зона, опасная по бурному раскрытию трещин, расслоению и внезапным выбросам породы. Характерными особенностями этой зоны была большая мощность перекрывающей толщи пород – более 900 м, трещиноватость породного массива, наличие локальных нарушений, параллельных направлению туннеля. Длина опасной зоны составляла 2250 м, а критического значения опасность выбросов достигала на участке протяженностью 360 м.

В октябре 1990 г. большой и очень громкий выброс произошел между отметками длины 8 + 450 (8 км + 450 м) и 8 + 465, образуя слой сверхэкскавации сечения размером до 2 м<sup>2</sup> в верхней части левой стены и левой части свода туннеля. Несколько меньшая сверхэкскавация наблюдалась также в нижней части левой стены. Объем выброшенных пород составил примерно 100 м<sup>3</sup>. Хотя выброс произошел всего 2 минутами позднее взрывных работ, никто из персонала не пострадал.

Этот случай побудил подрядчика изменить конструкцию крепи туннеля, применив в ней полиуретановый слой, чтобы обеспечить податливость крепи после затвердения бетона,

армированного стальным волокном. Скорость подвигания туннеля в зоне со средними напряжениями пород составила 130–150 м/мес., в районе интенсивных напряжений была снижена до 70–80 м/мес.

## 5. Выводы

Проведенные исследования позволили:

1. Установить единство природы, способов прогноза и мер предотвращения внезапных выбросов породы при сооружении туннелей и при строительстве и эксплуатации угольных предприятий.

2. Отторжение породы от массива при проведении туннелей в выбросоопасных условиях может вызывать высокий градиент напряжений и поэтому постепенное высвобождение этой энергии совершенно безопасно для динамических последствий, в то время как бурное высвобождение становится явлением, которое называется выбросом породы.

3. При проведении туннелей в выбросоопасных условиях важна последовательность выполнения технологических операций и поэтому необходимо выбрать такую, которая позволит осуществить постепенное высвобождение энергии напряжений в породах, избежав таким образом их выброса.

4. Исследования устойчивости представленных туннелей показали, что улучшение состояния туннеля в условиях выбросов породы достигается не столько усилением несущей способности крепи, сколько улучшением характеристик ее податливости и способности предотвратить отделение слоев породы и развитие трещиноватой зоны, окружающей туннель.

## Библиографический список

1. Большинский М.И., Лысиков Б.А., Каплюхин А.А.. Газодинамические явления в шахтах. – Севастополь: «Вебер», 2003. – 283 с.
2. Лысиков Б.А., Бикинцев М.Г., Бондаренко А.Ф. Опыт использования реакций массива при проведении туннелей для прогноза выбросоопасности горных пород // Энергетическое строительство. 1987. - № 3, С. 17-21.
3. L. Laverdure. A Case Study of Mining-induced Seismicity in Relation to Rock burst and Mining Activities at Creighton Mine. Sudbury, Ontario.
4. T. Ohta. Core Disking and «Rock burst» in soft Tuffaceous Rock Masses at Jwate Tunnel. <http://www.istaqe.jst.go.jp/iplastic/rtrjq/423/130.pdf>.
5. The Lotschberg Base Tunnel-Connecting Europe. [http://www.srp.ch\(de/referenzen\)publication/enrefergte/0252-03-04-MA.pdf](http://www.srp.ch(de/referenzen)publication/enrefergte/0252-03-04-MA.pdf).

© Лысиков Б. А., Кауфман Л. Л., 2009 г.