

PACS: 62.20.F, 91.10.Kg

Н.Н. Касьян¹, Ю.А. Петренко¹, Г.П. Стариков²

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ НАГРУЗКИ НА КРЕПЬ ВЫРАБОТОК В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКИХ ШАХТ

¹Донецкий национальный технический университет

²Институт физики горных процессов, Донецк

Статья поступила в редакцию 18 июля 2018 года

Определена продолжительность формирования зоны разрушения горных пород (ЗРП) вокруг выработок в различных горно-геологических и горно-технических условиях по данным глубинных реперных станций. Установлен механизм взаимодействия движущегося фронта разрушения пород при формировании ЗРП с крепью выработки.

Ключевые слова: горные породы, выработка, крепь, репер

Устойчивость горных выработок во многом зависит от соответствия параметров крепи горно-геологическим условиям отработки пластов. Для обоснования параметров крепи в первую очередь необходимо знать величину ожидаемой нагрузки на крепь. В настоящее время ее определяют с помощью двух методических подходов. При первом нагрузка на крепь рассматривается как вес породы в пределах некоторого свода обрушения (режим заданной нагрузки) [1]. Эта методика согласуется с данными практики в условиях небольших глубин отработки пластов.

Во втором случае нагрузка на крепь является ее реакцией на перемещения контактной поверхности, возникающие за счет образования зоны неупругих деформаций (режим заданной деформации) [2]. Данная методика используется при расчете нагрузки на крепь в условиях глубоких шахт. Известные представления о механизме формирования нагрузки на крепь, заложенные в методиках расчета горного давления, не в полной мере отражают физику протекания геомеханических процессов как в период формирования ЗРП, так и после ее стабилизации.

С целью определения особенностей и закономерностей механизма формирования нагрузки на крепь выработок решались следующие задачи:

- 1) установить продолжительность формирования ЗРП вокруг выработок в различных горно-геологических и горно-технических условиях;
- 2) определить механизм взаимодействия движущегося фронта разрушения пород при формировании ЗРП с крепью выработки;

3) установить механизм формирования нагрузки на крепь после образования ЗРП.

Для изучения геомеханических процессов, происходящих в массиве пород вокруг поддерживаемых выработок, были использованы материалы наблюдений по пятнадцати глубинным замерным станциям: по станциям № 2, 7, 11 – результаты собственных наблюдений, по станциям № 1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15 – данные из банка натуральных наблюдений Московского государственного горного университета, предоставленные проф. И.Л. Черняком.

Принятые к обработке данные представляют собой материалы натуральных наблюдений по глубинным реперным станциям, оборудованным как в одиночных пластовых выработках, так и в выработках, испытывающих влияние очистных работ.

В традиционной методике оценки результатов инструментальных наблюдений по глубинным замерным станциям одним из универсальных показателей, характеризующих деформационные процессы в породном массиве вокруг выработок, является коэффициент расширения пород K_{exp} . Однако его практическое использование ограничивается оценкой характера деформационных процессов на конечный момент наблюдений. Такой подход не позволяет в полной мере отслеживать динамику этих процессов. По графику изменения K_{exp} при удалении в глубь массива можно дать только их количественную оценку – установить границу ЗРП. Качественную характеристику деформационных процессов внутри ЗРП осуществить невозможно.

Причина, на наш взгляд, скрыта в самом методическом подходе к анализу и представлению результатов натуральных наблюдений, который рассматривает смещение пород как непрерывный процесс. Такой подход был бы правомерным при непрерывном наблюдении за смещениями пород во всем объеме рассматриваемого массива.

Однако глубинные реперы являются фиксированными точками массива, и информацию об их смещениях мы получаем эпизодически в моменты произведения замеров (рис. 1). При образовании и росте зоны разрушенных пород от контура выработки в глубь массива смещения глубинных реперов носят дискретный характер, и K_{exp} необходимо определять за период между предыдущим и текущим замерами, рассматривая величины их смещения за этот период по всему пути их установки.

С учетом приведенных рассуждений величина K_{exp} определяется по формуле

$$K_{\text{exp}}^{N[(n-1)-n]} = \frac{(U_{n-1}^N - U_{n-1}^{N-1}) - (U_n^N - U_n^{N-1})}{h_n}, \quad (1)$$

где $K_{\text{exp}}^{N[(n-1)-n]}$ – коэффициент расширения пород на период, равный текущему замеру N между рассматриваемой парой реперов, имеющих номера $(n-1)$ и n ; $U_{n-1}^N, U_n^N; U_{n-1}^{N-1}, U_n^{N-1}$ – абсолютные смещения рассматриваемых

реперов соответственно на текущий замер N и на период предыдущего замера; h_n – начальное (базовое) расстояние между парой рассматриваемых реперов.

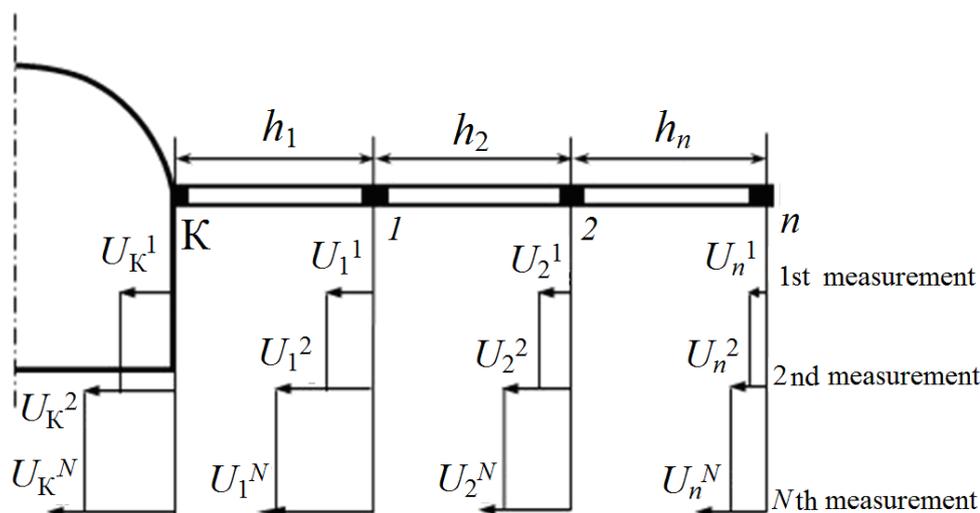


Рис. 1. Схема расположения глубинных реперов

Сравнение результатов обработки и представления натуральных наблюдений по традиционной и предлагаемой методикам показывает, что последняя позволяет проследить динамику деформационных процессов, происходящих в массиве пород в окрестности выработок [3].

Следует отметить, что для повышения точности определения K_{exp} необходимо учитывать изменение расстояния между парами рассматриваемых реперов, которое зависит от их абсолютных смещений. В процессе образования и формирования зоны разрушенных пород в уже разрушенном массиве происходят процессы расширения и сжатия разрушенной массы, что вызывает необходимость их учета при определении базисного расстояния между реперами на момент предыдущего замера.

С учетом вышеизложенного базисное расстояние для последующего замера определяется по формуле

$$h_{[(n-1)-n]}^N = h_{[(n-1)-n]}^{N-1} + (U_{n-1}^{N-1} - U_n^{N-1}), \quad (2)$$

где $h_{[(n-1)-n]}^N$ – новое базовое расстояние между реперами $(n-1)$ и n , учитываемое при определении K_{exp} на момент N -го замера; $h_{[(n-1)-1]}^{N-1}$ – базовое расстояние между рассматриваемой парой реперов на момент предыдущего замера $N-1$; $(U_{n-1}^{N-1} - U_n^{N-1})$ – разность в смещениях рассматриваемых реперов на момент предыдущего замера (характеризует величину, на которую изменяется базовое расстояние между реперами за счет их смещений на момент предыдущего замера).

Для учета изменения расстояния между реперами за счет их предыдущего смещения в формуле (1) вместо h_n следует использовать выражение (2).

Область разрушенных пород вокруг выработки определяется величиной предельных деформаций, которая для пород глинистого сланца составляет $3 \cdot 10^{-2}$, для песчаного сланца – $2 \cdot 10^{-2}$ [4].

Для обработки данных натурных наблюдений по разработанной методике была составлена программа и выполнены расчеты.

При решении первой задачи величину ЗРП за определенные периоды времени, характеризующие интервалы между производственными замерами, рассчитывали путем сопоставления суммарного коэффициента расширения пород между смежными глубинными реперами с величиной предельных деформаций. Породный массив между глубинными реперами считали разрушенным в том случае, когда величина его относительных деформаций равнялась или превышала предельные значения, соответствующие данному типу пород.

Первоначально отслеживали изменение суммарного значения коэффициента расширения пород $\sum K_{\text{exp}}$ между контуром и репером № 1. После установления факта разрушения пород между ними рассматривали изменение суммарных значений K_{exp} между глубинными реперами № 1 и 2, № 2 и 3 и т.д. Такую процедуру производили по всей цепи установленных глубинных реперов.

Для условий одиночных выработок рост ЗРП устанавливали в зависимости как от времени наблюдений, так и от расстояния между замерной станцией и забоем выработки.

В качестве примера определения размера ЗРП вокруг одиночной выработки в зависимости от расстояния до забоя воспользуемся данными наблюдений по станции № 14, которая была оборудована в 6-м южном бортовом ходе блока № 2 пласта l_7 шахты им. А.Г. Стаханова. Ходок проводили комбайном на глубине 860 м. Сечение ходка в свету 11.2 м^2 . Выработку крепили металлической арочной крепью АП-3, устанавливаемой через 0.8 м. Породы кровли пласта сложены мелкослоистым песчаным сланцем мощностью 14 м с пределом прочности на сжатие 50 МПа. Глубинную станцию оборудовали в забое выработки в вертикальной скважине глубиной 10 м. Шаг установки реперов до глубины 5 м составлял 1 м. Последние два репера устанавливали с интервалом в 3 и 2 м.

На рис. 2 приведены графики изменения суммарных значений коэффициента расширения пород $\sum K_{\text{exp}}$ в зависимости от расстояния до забоя ходка. Анализ приведенных графиков показывает, что с увеличением расстояния до забоя выработки наблюдается рост $\sum K_{\text{exp}}$ между парами реперов от контура до глубины 4 м. За этой зоной деформирование породного массива не наблюдается.

Учитывая то, что величина предельных деформаций песчаного сланца составляет $2 \cdot 10^{-2}$, момент разрушения породного массива вокруг выработки между соответствующими парами глубинных реперов определяем по точкам пересечения кривых суммарных значений коэффициента расширения пород

с прямой, соответствующей величине $2 \cdot 10^{-2}$. При этом установлено, что ЗРП на глубину 1 м от контура выработки образуется на расстоянии 7 м от забоя, на глубину 2 м – на расстоянии 15 м, на глубину 4 м – на расстоянии 25 м.

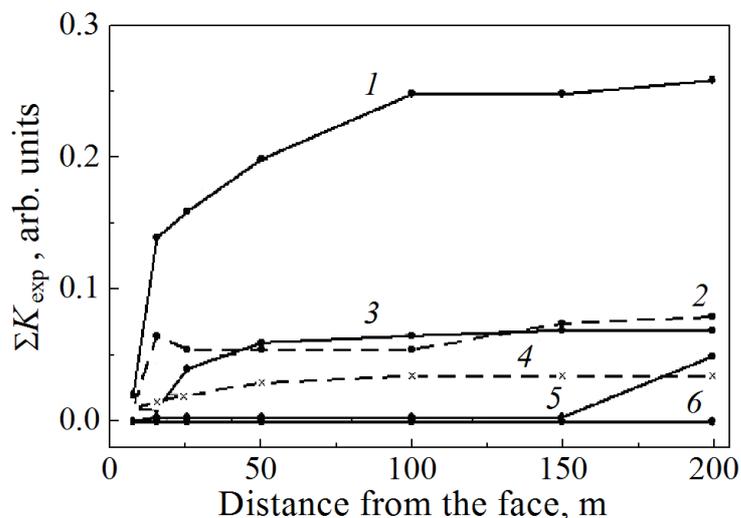


Рис. 2. Графики изменения суммарных значений $\Sigma K_{\text{эксп}}$ между смежными парами глубинных реперов по станции № 14: 1 – К (контур)–1, 2 – 1–2, 3 – 2–3, 4 – 3–4, 5 – 4–5, 6 – 5–6

Аналогичные результаты были получены и по другим замерным станциям. На рис. 3,а приведены графики зависимости величины ЗРП от времени наблюдения для одиночных пластовых выработок. Анализ графиков показывает, что ЗРП в кровле выработок формируется в течение 5–35 d. Ее размер составляет от 2 до 5 м от контура выработки. В боку выработок (станция № 13, установленная по пласту) ЗРП формируется в течение 100 d и составляет 6 м от контура выработки.

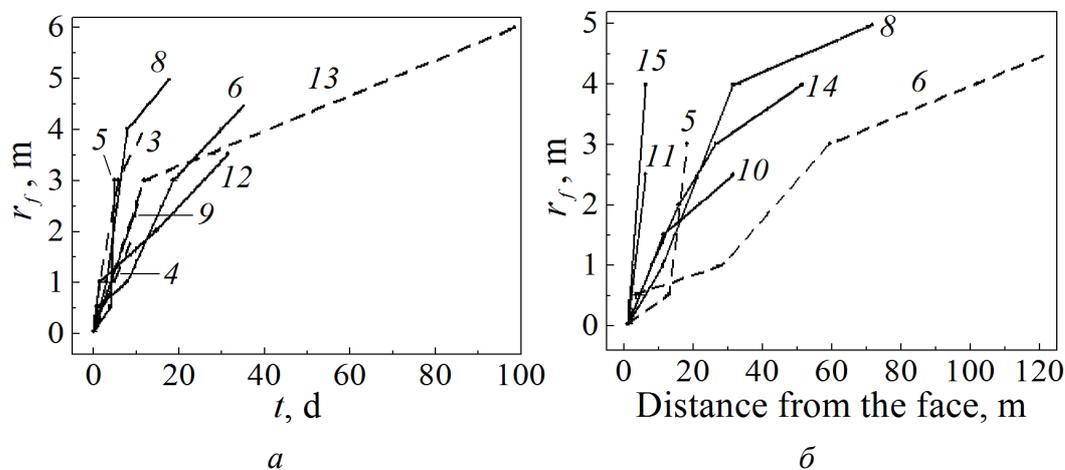


Рис. 3. Зависимости величины ЗРП от времени (а) и от расстояния до забоя выработки (б). Цифры на кривых соответствуют номерам замерных станций

Графики зависимости величины ЗРП от расстояния до забоя выработок приведены на рис. 3,б. Как видим, при расстоянии 5–70 м до забоя ЗРП формируется на глубину 2.5–5 м. В первом и втором случаях показатель устойчивости пород $\gamma H/R = 0.35–0.59$. Для станции № 6, оборудованной по пласту, $\gamma H/R = 1.52$. На момент формирования ЗРП величины смещений контура выработок составляют от 28 до 100% от первоначальных значений.

На рис. 4 представлено изменение K_{exp} между соответствующими парами реперов в зависимости от расстояния до забоя выработки по данным станции № 8, оборудованной в 6-м восточном вентиляционном штреке шахты № 1 Челюскинцев. Штрек проводился комбайном ПК–3М на глубине 720 м. Угол падения пласта 10–11°. Сечение выработки в свету 7 м². Выработка закреплена трапециевидной крепью – деревянные ножки, металлический верхняк. Плотность установки крепи составляла 1.25 рамы на 1 м выработки. Глубинную станцию устанавливали в забое выработки в вертикальной скважине глубиной 8 м. Шаг установки глубинных реперов составлял 1 м.

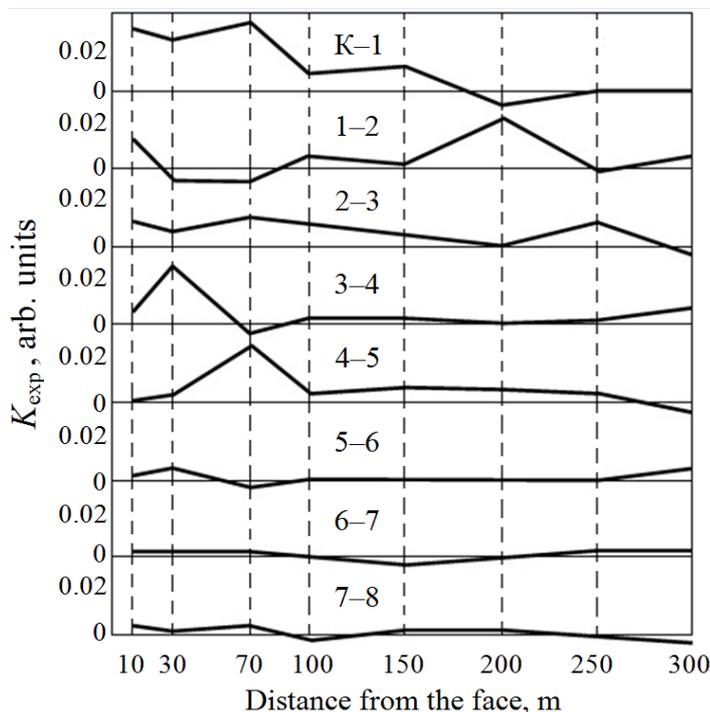


Рис. 4. Изменение K_{exp} в зависимости от расстояния до забоя выработки по данным станции № 8

Мощность пласта 1.4 м. Кровля пласта сложена глинистым сланцем мощностью 8 м с пределом прочности на сжатие 46 МПа. При изменении расстояния до забоя выработки с 10 до 30 м между реперами К–1, 1–2, 2–3, 7–8 наблюдается уменьшение значения K_{exp} , что свидетельствует о деформациях сжатия породного массива. Между реперами 3–4, 4–5, 5–6 зафиксирован рост K_{exp} , что связано с наличием растягивающих деформаций в окру-

жающем выработку породном массиве. Увеличение расстояния до забоя выработки с 30 до 70 м вызывает деформации сжатия породного массива между реперами 3–4, 5–6. На этот период растягивающие деформации породного массива наблюдаются между реперами К–1, 2–3, 4–5. Изменение расстояния до забоя выработки с 70 до 100 м приводит к появлению сжимающих деформаций породного массива между реперами К–1, 4–5, 7–8. В то же время между реперами 1–2, 3–4, 5–6 наблюдаются деформации растяжения.

Дальнейшее увеличение расстояния до забоя выработки от замерной станции сопряжено с наличием активного деформирования участка породного массива от контурного репера до репера № 3. Характерной особенностью деформационного процесса породного массива, окружающего выработку, является чередование знакопеременных деформаций породного массива между соответствующими парами реперов при увеличении расстояния до забоя, а также в направлении от контура выработки в глубь массива на периоды производства замеров.

Анализ графиков изменения K_{exp} по результатам наблюдений на других станциях подтверждает наличие чередования деформаций сжатия и растяжения породного массива в направлении от контура выработки в глубь массива на момент проведения замеров.

Для оценки характера деформационных процессов, происходящих в породном массиве, вмещающем выработку, в зависимости от времени наблюдения (или в зависимости от расстояния до забоя выработки, лавы) и величины уже сформировавшейся ЗРП на момент, определяемый очередным замером, используем круговую диаграмму [5]. Такое представление позволяет выполнить анализ геомеханических процессов, происходящих в породном массиве вокруг выработки, в качественном и количественном аспектах. При этом на момент замеров фиксируются четыре параметра: время существования выработки (или расстояние от наблюдательной станции до забоя выработки, лавы), размер сформировавшейся ЗРП, расстояние от контура выработки в глубь массива (по шагу установки глубинных реперов) и динамика изменения K_{exp} .

Следует отметить, что с помощью диаграммы отражаются геомеханические процессы, происходящие в породном массиве только в направлении установки реперов глубинной станции. Для изучения характера изменения деформационных процессов в объеме всего породного массива, окружающего выработку, необходимы инструментальные наблюдения по целой серии глубинных реперных станций, устанавливаемых в одном сечении в разных направлениях. Оборудование такой комплексной глубинной станции и выполнение наблюдений в настоящее время связано с большими материальными затратами и высокой трудоемкостью работ.

Однако, учитывая единую природу геомеханических процессов, результаты наблюдений по глубинной станции, состоящей из одной скважины, можно рассматривать в качестве информации, отражающей динамику деформационных процессов, происходящих в горном массиве вокруг выработки.

На рис. 5 показана картина деформационных процессов, наблюдаемая в одиночной выработке по данным замерной станции № 8 в зависимости от расстояния до забоя штрека. При отходе забоя штрека на 10 м размер ЗРП составляет 1 м, при этом преобладают деформации растяжения.

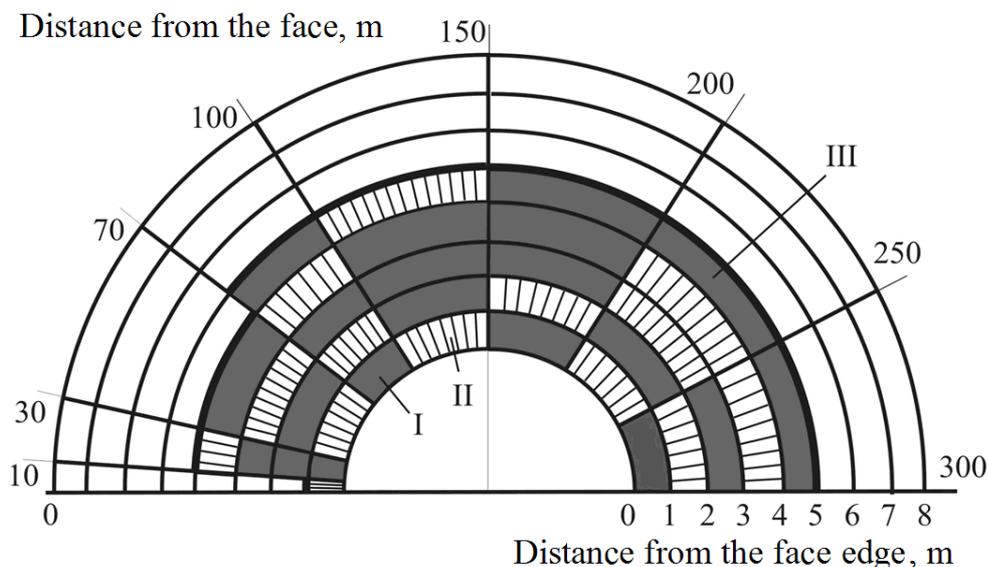


Рис. 5. Характер деформационных процессов внутри ЗРП при ее формировании по данным станции № 8: I, II – соответственно области сжатия и растяжения; III – граница ЗРП

При отходе забоя штрека от замерной станции на 30 м ЗРП выросла до 4 м. Внутри нее область пород, испытывающих сжатие, составляет 3 м от контура выработки. На участке глубиной 3–4 м наблюдается расширение породной толщи.

На расстоянии до 70 м от замерной станции до забоя не наблюдается рост ЗРП. При этом участки разрушенного породного массива на глубинах 1–2 и 3–4 м испытывают деформации сжатия, а на глубинах 0–1 и 2–3 м – деформации растяжения.

Дальнейшее увеличение расстояния до забоя штрека (до 100 м) приводит к увеличению размера ЗРП до 5 м. Внутри нее наблюдается чередование деформаций сжатия и растяжения на различных участках породного массива от границы ЗРП до контура выработки. Так, области пород на глубинах от контура выработки 0–1, 2–3 и 4–5 м испытывают сжатие, а на глубинах 1–2 и 3–4 м – растяжение. В дальнейшем наблюдается стабилизация ЗРП на глубине 5 м.

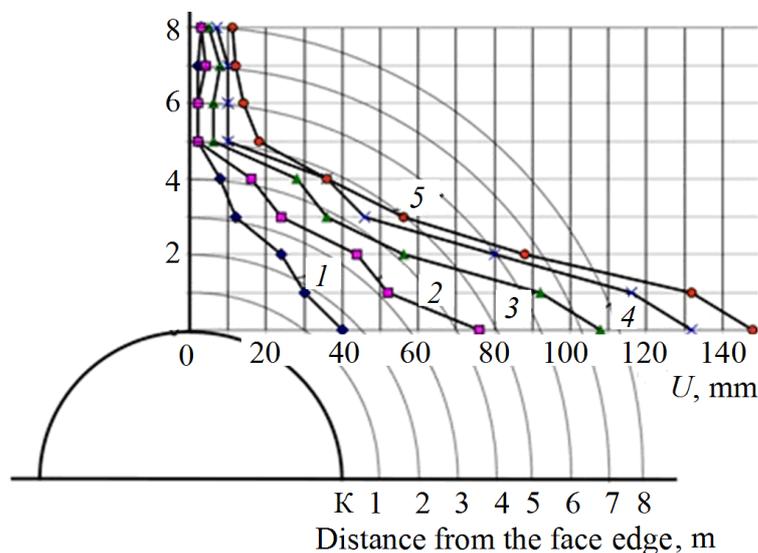
На расстоянии 150 м до забоя участок породного массива на глубине 1–4 м испытывает сжатие, а на глубинах 0–1 и 4–5 м – расширение.

При отходе забоя от замерной станции на расстояние 200 м деформации сжатия породного массива отмечаются на глубинах 0–1 и 2–5 м, а деформации растяжения уже разрушенного породного массива – на глубине 1–2 м.

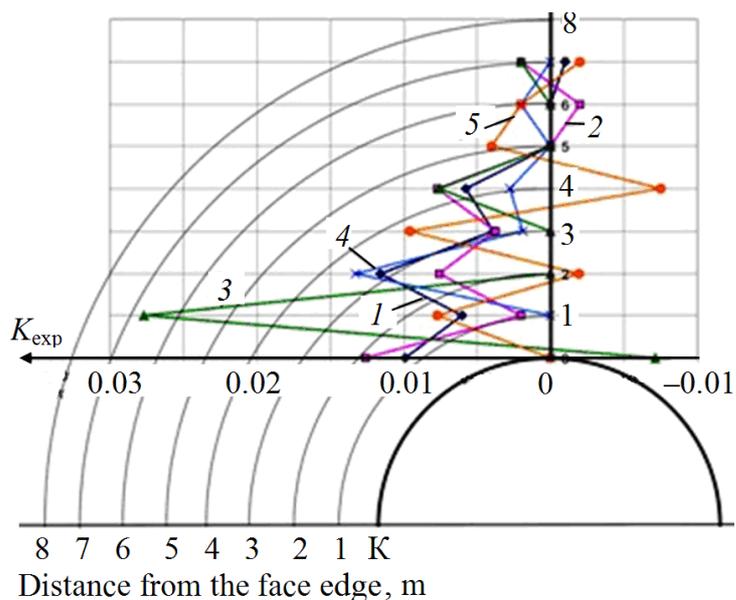
При расстоянии 250 м до забоя области сжатия породного массива отмечаются на глубинах 1–2 и 4–5 м. В то же время толща пород на глубинах 0–1 и 2–4 м испытывает деформации растяжения.

На расстоянии 300 м до забоя штрека на глубинах 0–1 и 2–3 м отмечаются деформации сжатия пород, а на глубинах 1–2 и 3–4 м – деформации растяжения.

Анализ динамики деформационных процессов, происходящих в породном массиве в окрестности одиночной выработки по станции № 8, показал,



a



б

Рис. 6. Изменение распределения величины смещения глубинных реперов (*a*) и коэффициента расширения пород по глубине ЗРП (*б*) в зависимости от расстояния от замерной станции до забоя выработки, м: 1 – 100, 2 – 150, 3 – 200, 4 – 250, 5 – 300

что внутри ЗРП наблюдается чередование зон сжатия и растяжения в разрушенных породах как с увеличением расстояния от замерной станции до забоя штрека, так и по мере удаления от контура выработки в глубь массива. Данная закономерность деформационных процессов внутри ЗРП сохраняется и после стабилизации размеров разрушенной зоны.

Установленная закономерность является ответом на третью поставленную задачу с позиций характеристики деформационного процесса в качественном аспекте. Для ее решения в количественном плане проанализируем смещения реперов и коэффициентов расширения породного массива после момента стабилизации роста ЗРП по этой же станции.

На рис. 6 показаны деформационные процессы внутри ЗРП после ее стабилизации. Как видим, на момент стабилизации ЗРП смещение контура выработки составляет 240 мм, что равно 62% от конечных смещений. Это смещение контура выработки вызвано разрушением пород за счет движения фронта разрушения при деформировании ЗРП. Оставшиеся 38% величины конечных смещений контура выработки при стабилизации зоны являются следствием смещения (обрушения) разрушенных пород внутри нее. Анализ приведенных графиков показывает, что с увеличением расстояния от забоя выработки повышается интенсивность как смещения пород, так и степени их расширения в пределах ЗРП. При этом внутри зоны наблюдаются знакопеременные деформации, о чем свидетельствует изменение коэффициента разрыхления пород от 0.0277 до -0.0075 .

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. В условиях глубоких шахт размер ЗРП вокруг выработок составляет 3–6 м от их контура и формируется в течение 5–100 д.

2. В период образования ЗРП нагрузка на крепь формируется за счет увеличения объема разрушающихся пород и смещения их в полость выработки. При этом механизм влияния движущегося фронта разрушения породного массива на характер взаимодействия крепи с окружающим массивом заключается в образовании позади этого фронта уже в разрушенных породах волн знакопеременных деформаций, перемещающихся к контуру выработки.

3. В период формирования ЗРП реализуется 30–60% конечных смещений контура выработок. После формирования ЗРП эти смещения являются результатом обрушения пород внутри зоны, которые своим весом пригружают крепь.

4. Расчет нагрузки на крепь необходимо производить с учетом этих двух этапов. На первом нагрузка на крепь рассчитывается как результат смещений пород в полость выработки в процессе формирования ЗРП. На втором этапе нагрузку на крепь определяют как вес пород, отделившихся от массива, внутри ЗРП.

1. *М.М. Протодьяконов*, Давление горных пород и рудничное крепление, Госгортехиздат, Москва (1930).
2. *К.В. Руппенейт*, Некоторые вопросы механики горных пород, Углетехиздат, Москва (1954).

3. Н.Н. Касьян, Известия Донецкого горного института № 1(5), 93 (1997).
4. И.Л. Черняк, Повышение устойчивости подготовительных выработок, Недра, Москва (1993).
5. Н.Н. Касьян, Физико-технические проблемы горного производства вып. 11, 40 (2008).

N.N. Kasyan, Yu.A. Petrenko, G.P. Starikov

FEATURES OF THE MECHANISM OF FORMATION OF THE LOAD ON A TIMBER IN DEEP MINES

The duration of formation of the rupture zone (RZ) around the workings in varied geological and mining conditions according to the data deep reference benchmarks is found. The mechanism of interaction of the moving rupture front in the course of formation of the RZ and the timber in mine opening.

Keywords: rocks, mine opening, timber, benchmark

Fig. 1. Scheme of location of deep benchmarks

Fig. 2. Evolution of sums $\sum K_{\text{exp}}$ between adjacent pairs of deep benchmarks at station № 14: 1 – K (circuit)–1, 2 – 1–2, 3 – 2–3, 4 – 3–4, 5 – 4–5, 6 – 5–6

Fig. 3. RZ size vs time (a) and the distance to the face ($\bar{\sigma}$). The numbers at the curves correspond to the numbers of the measuring stations

Fig. 4. Face distance dependence of K_{exp} according to the data of station № 8

Fig. 5. Deformation within the RZ in the course of formation according to the data of station № 8: I, II – areas of compression and tension, respectively; III – RZ boundary

Fig. 6. RZ depth distribution of the shift of deep benchmarks (a) and the rock expansion coefficient ($\bar{\sigma}$) vs the distance between the measuring station and the working face, m: 1 – 100, 2 – 150, 3 – 200, 4 – 250, 5 – 300