

УДК 622.268.2

## Геомеханические аспекты выбора параметров комбинированных крепей капитальных выработок

Рассмотрены особенности развития геомеханических процессов, происходящих в окрестности одиночной горной выработки. Разработана методика численного моделирования, учитывающая механизм разрушения пород, характерный для Западного Донбасса. На основе результатов численного моделирования определена зависимость влияния количества установленных в кровле анкеров и расстояния от забоя на пучение пород подошвы выработки.

**Ключевые слова:** комбинированная крепь, пучение пород подошвы выработки, численное моделирование.

**Контактная информация:** prokudin.o.z@nmu.one

Промышленные запасы ЧАО «ДТЭК Павлоградуголь» составляют около 700 млн т угля, что при существующем уровне добычи позволит обеспечить работу предприятия на более чем 50 лет. Однако дальнейшая разработка запасов требует перехода горных работ на более глубокие горизонты. Помимо повышения горного давления, связанного с углублением, также ухудшатся горно-геологические и горнотехнические условия. Последующие затраты на проведение, крепление, ремонт и поддержание горных выработок возрастут, что негативно скажется на себестоимости конечной продукции. В связи с этим в целях эффективной финансово-экономической деятельности компании необходимо усовершенствовать весь комплекс работ технологического цикла. Один из значимых его составляющих – строительство капитальных протяженных горных выработок.

Опыт показывает, что применяемая для крепления традиционная арочная податливая крепь не справляется в полной мере с проявлениями горного давления и требует дополнительных мероприятий по ее усилению. Для повышения устойчивости и долговечности выработок в сложных горно-геологических условиях наиболее эффективны комбинированные крепи с использованием несущей способности окружающего массива. Наибольшее распространение получили конструкции на базе рамной металлической крепи с дополнительными элементами в виде полного или частичного заполнения закрепного пространства, а также инъекционного либо анкерного упрочнения массива. Это позволяет равномерно распределить нагрузки на рамную крепь, устранить влияние сосредоточенных нагрузок и перекоса, т. е. рационально использовать материал металлической крепи. Кроме того, дополнительный несущий слой из затвер-



**А. Н. ШАШЕНКО,**  
доктор техн. наук  
(Национальный горный университет)



**А. З. ПРОКУДИН,**  
науч. сотрудник  
(Национальный горный университет)



**А. В. СМИРНОВ,**  
канд. политич. наук  
(ОАО «Шахтоуправление «Обуховская»)

девшего (уплотненного) породного материала способствует работе крепи в режиме взаимовлияния с окружающим массивом.

При разработке комбинированных типов крепей необходимо выполнить исследования, направленные на рационализацию и адаптацию их технологических параметров для конкретных горно-геоло-

гических условий, которые можно выполнить с помощью численного моделирования в специализированных программных продуктах, в частности «Phase 2» [1], основанном на методе конечных элементов (разработан лабораторией геомеханики Rocscience). Применение его при решении разных геомеханических задач показал высокую эффективность и достоверность полученных результатов.

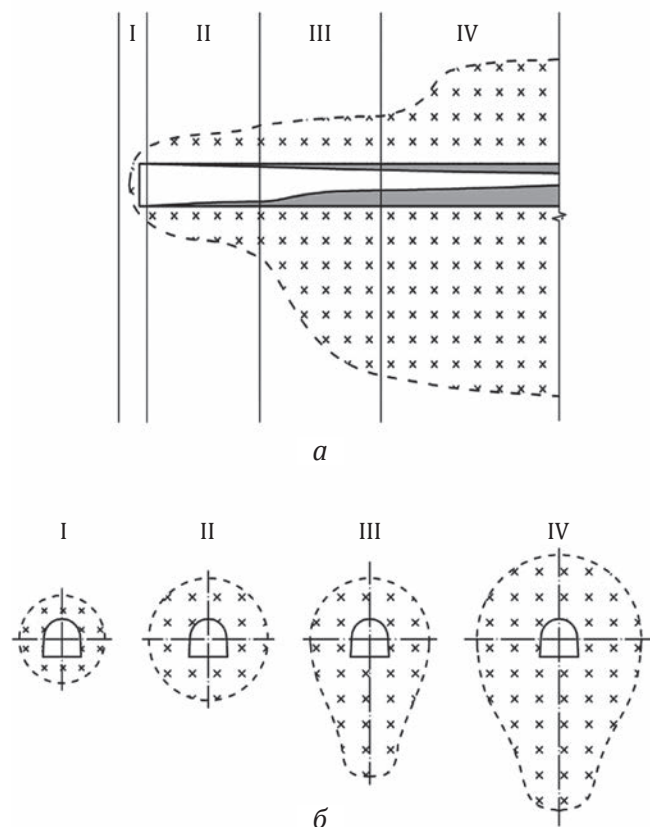
**Цель исследования** – разработка математической модели протекания геомеханических процессов, происходящих в окрестности одиночной горной выработки на шахтах Западного Донбасса, и определение на ее основе рациональных параметров комбинированной крепи.

**Материалы и результаты исследования.** В процессе подвигания забоя вокруг выработки последовательно образуются зоны разрушенных пород, разделенные зияющими трещи-

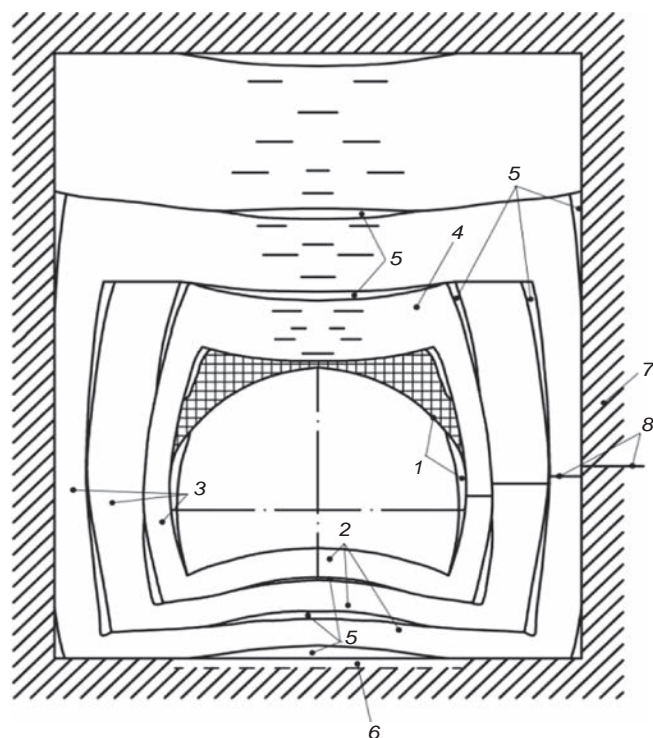
нами (рис. 1). Их образование сопровождается неупругим расширением пород в приконтурной области. Зона I формируется вследствие влияния подвигания проходческого забоя, в зоне II образуется полноценная зона неупругих деформаций (ЗНД), в зоне III – вспучиваются породы подошвы, в зоне IV происходит последующая деструкция породного массива.

В Западном Донбассе процесс образования зон разрушений развивается аналогично, однако имеет свои особенности (рис. 2). Так, во время деформации пород кровли от массива по трещинам усыхания отрывается вертикальный слой боковых пород. Затем под воздействием деформированных вертикальных слоев породы подошвы выдавливаются внутрь выработки и вспучиваются.

Для получения достоверных и обоснованных результатов численного моделирования рассмотренные особенности деформирования



**Рис. 1.** Развитие геомеханических процессов по мере перемещения забоя выработки: *а* и *б* – разрезы продольный и поперечный; I–IV – зоны разрушенных пород.



**Рис. 2.** Схема деформирования (разрушения) пород приконтурного слоя и образования зон разрушения [2]: 1 – металлическая арочная податливая крепь; 2, 3 и 4 – деформированные породы подошвы, боковые породы и породы кровли выработки; 5 – пустоты и трещины в деформированных (разрушенных) породах приконтурного слоя; 6 – вода; 7 – ненарушенный массив; 8 – маркирующий слой.

приконтурного массива пород необходимо отразить в методике моделирования.

Первоначально в программном комплексе строится поперечное сечение выработки и окружающий ее массив с геометрическими и горно-геологическими характеристиками, присущими реальной выработке. Выполняется расчет и определяются размеры зоны неупругих деформаций  $R_L$ , а также смещения на контуре выработки  $u_0$ . Затем строится продольное сечение, к внутреннему контуру которого прикладывается такая нагрузка  $k\gamma H$ , чтобы размеры зоны неупругих деформаций и перемещения контура на расстоянии  $10h$  от забоя выработки были бы равны соответствующим значениям, полученным в результате расчета площади поперечного сечения (рис. 3). По итогам численного решения на любом расстоянии от забоя и до  $10h$  располагают значения смещений  $u_0$ .

Представив эти данные в виде графика (рис. 4), аппроксимируем полученную кривую степенной функцией, т. е. функцией влияния забоя  $k_3 = k_3(l)$ . Ее можно показать также в виде поправочного коэффициента

$$k_3 = u_0^i / u_0^{\max}, \quad (1)$$

где  $u_0^i$  – смещения контура выработки на  $i$ -м расстоянии от забоя;  
 $u_0^{\max}$  – смещения контура выработки на расстоянии  $10h$  от забоя.

Данный коэффициент необходим для перехода от исследования плоского продольного сечения выработки к исследованию плоского поперечного сечения. Таким образом, используя поправочный коэффициент, появляется возможность рассмотреть поперечное сечение выработки на необходимом расстоянии от забоя.

В целях отображения в модели процесса образования зон разрушения (см. рис. 1) установим их границы. В пределах зоны I размеры ЗНД меньше своего критического значения

$R_L^*$  ( $R_L < R_L^*$ ), а ее реализация происходит на расстоянии до 10 м от забоя. В границах зоны II образуется полноценная ЗНД размерами  $R_L = R_L^*$ , при этом смещения не превышают  $u_0 \leq 0,3$  м. В границах зоны III появляется область разрушенных пород в подошве, распространяющаяся от контура выработки на расстояние до  $10 R_0$ ,  $R_L \geq R_L^*$ ,  $u_0 = 0,5 \dots 0,6$  м. Зоны II и III возникают на расстоянии 10–25 и 25–45 м соответственно, зона IV – на расстоянии более 45 м от плоскости забоя.

Принятая схема деформирования предполагает, что процесс трещинообразования происходит с отслоением породы, отделенной от массива магистральными трещинами (см. рис. 2). В связи с этим можно предположить, что отслоенные породы не участвуют в дальнейшем формировании ЗНД, однако своим весом они создают нагрузку на подошву выработки. В программном комплексе реализовать указанное

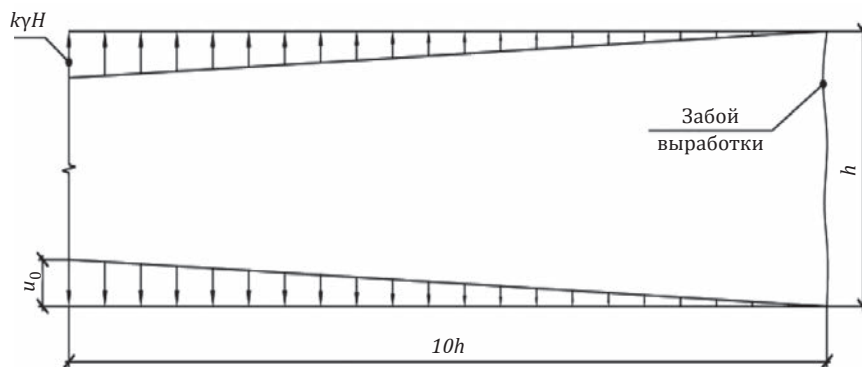


Рис. 3. Расчетная схема к определению перемещения контура продольного сечения выработки.

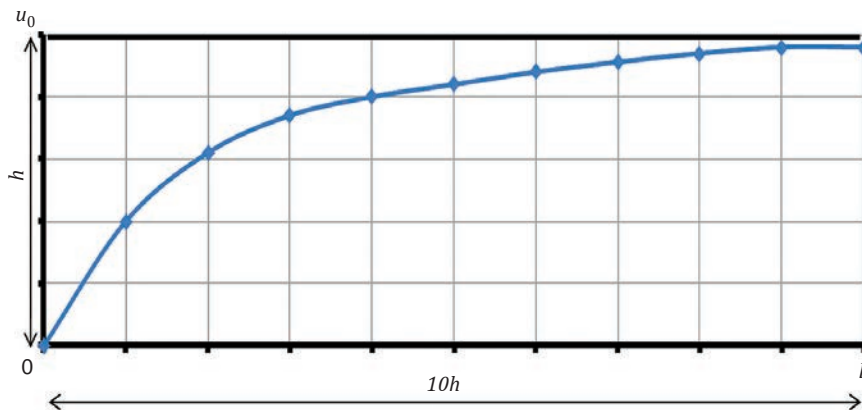


Рис. 4. Смещения контура выработки по мере удаления от забоя.

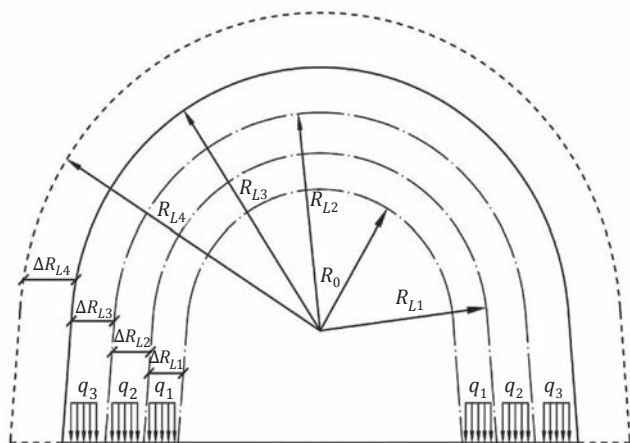


Рис. 5. Расчетная схема для 4-й стадии моделирования.

предположение можно за счет расширения (выемки) площади сечения выработки на количество разрушенных пород и замены их воздействия на подошву выработки распределенной нагрузкой.

Для учета фактора подвигания забоя дальнейшее моделирование предполагает решение четырех стадий с условием, что результаты решения предыдущей стадии принимаются в качестве исходных данных для последующей. Расчетная схема для 4-й стадии представлена на рис. 5.

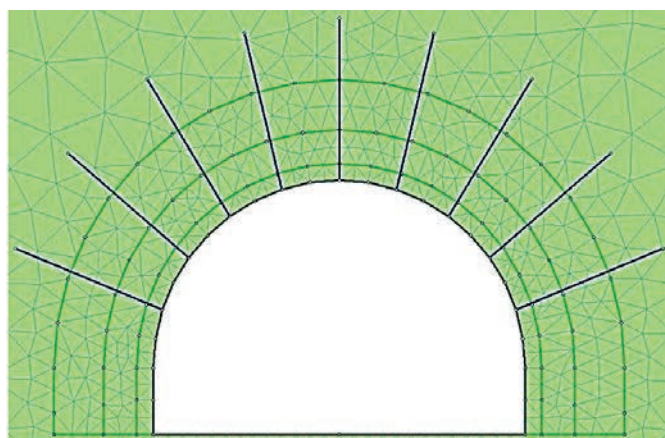
Таким образом, разработана методика численного моделирования развития геомеханических процессов, происходящих в

окрестности одиночной горной выработки, которая позволяет рассматривать влияние разных технологических факторов на ее состояние.

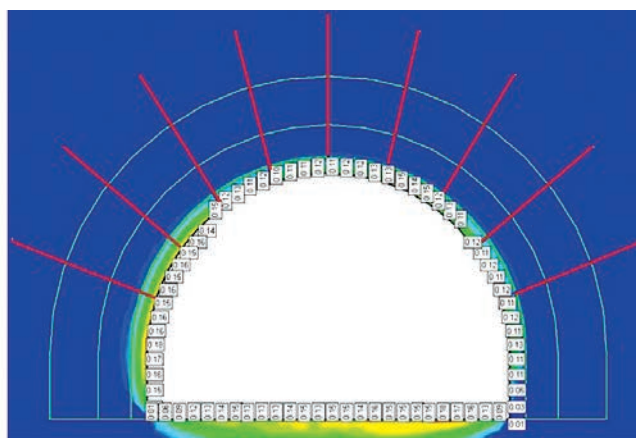
Следующий этап – исследование влияния установки элементов усиления крепи (анкеров и тампонажа) на развитие геомеханических процессов. Если в выработке выполнить иньектирование приконтурного породного массива (в том числе тампонаж), то, как показывают натурные исследования, его прочность увеличится на 50–70 %, что предотвратит дальнейшее развитие ЗНД.

Согласно исследованию [3] тампонажные работы следует выполнять на расстоянии от забоя, не превышающем 15 м, до того как завершится процесс образования трещин, но все еще происходит деструкция породного массива. Анализ результатов моделирования упрочнения массива показал, что в этом случае существенно (в 1,5–2 раза) уменьшаются размеры ЗНД и значения перемещений на контуре выработки. Это свидетельствует о повышении устойчивости выработки и о снижении в будущем эксплуатационных затрат на поддержание.

Однако выполнить тампонажные работы на расстоянии 12–15 м от забоя выработки невозможно, поскольку процессу мешает проходческое оборудование (комбайн, перегружатель). Это можно осуществить, установив анкеры одновременно с рамной крепью. Система анкеров



а



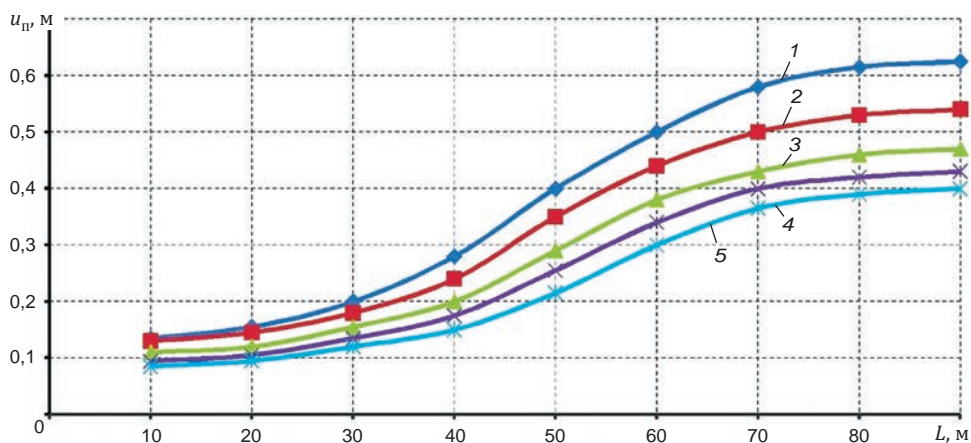
б

Рис. 6. Конечно-элементная расчетная схема (а) и перемещения на контуре выработки (б) при установке девяти анкеров.

предотвратит преждевременное расслоение приконтурного породного массива и позволит на 40–50 м отодвинуть от забоя работы по упрочнению приконтурного массива, что не будет мешать проходке выработки. Моделировали ситуации, когда в кровле выработки устанавливали разное количество сталеполимерных анкеров стандартной длины 2,4 м. Конечно-элементная расчетная схема и перемещения на контуре выработки при установке девяти анкеров приведена на рис. 6.

Анализ результатов вычислений позволил составить зависимости смещений пород подошвы  $u_{\text{п}}$  на расстоянии от забоя  $L$  при разном количестве анкеров в кровле выработки для рассматриваемых горно-геологических условий. Из рис. 7 следует, что при пяти установленных в кровле анкерах тампонажные работы целесообразно выполнять на расстоянии 60 м от забоя выработки, обеспечив при этом смещение пород подошвы в пределах  $u_{\text{п}} \approx 0,3 \dots 0,4$  м.

**Выводы.** Разработанная методика численного моделирования учитывает механизм деформирования, присущий породам Западного Донбасса, что дает возможность обосновывать



**Рис. 7.** Зависимость смещений и пород подошвы  $u$  от расстояния  $L$  между местом выполнения набрызг-бетонных работ и забоем выработки: 1 – без анкеров; 2, 3, 4 и 5 – соответственно 3, 5, 7 и 9 анкеров.

выбор оптимальных технологических параметров возводимых комбинированных крепей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Phase2. Finite Element Analysis for Excavations and Slopes. version 8.0 // Режим доступа: <https://www.rocscience.com/products/3/Phase2>.
2. Выгодин М. А. Обоснование параметров армопородных грузонесущих конструкций на базе рамно-анкерных крепей и технология их сооружения в выработках шахт Западного Донбасса: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.04 / Михаил Александрович Выгодин. – Днепропетровск, 1990. – 215 с.
3. Роечко А. Н. Устойчивость подготовительных выработок угольных шахт в условиях больших глубин разработки: дис. ... доктора техн. наук: 05.15.04 / А. Н. Роечко. – Днепропетровск, 1995. – 426 с.

## ПО МАТЕРИАЛАМ ЖУРНАЛА «УГОЛЬ УКРАИНЫ» ПРОШЛЫХ ЛЕТ

Год 1978

В журнале № 2 в статье Б. К. Куклина, А. Ф. Бахтина, А. Д. Попова «Использование некондиционных по мощности пластов для защиты пологих выбросоопасных» приведено состояние разработки пологих выбросоопасных пластов под защитой. Даны результаты исследования по использованию некондиционных по мощности пластов в качестве защитных для выемки выбросоопасных пластов.

При окончательной оценке эффективности того или иного способа защиты следует принимать во внимание неучтенные при экономическом анализе факторы: безопасность работ, максимальное исключение тяжелого физического труда, надежность технологических процессов добычи угля. Учет этих факторов может оказаться решающим при переходе на защитную отработку пропластка.