

Метод статичного зондування дозволяє оцінити можливість та доцільність застосування в певних інженерно-геологічних умовах пальових фундаментів, а також отримати повний обсяг показників, які необхідні для розробки комплексу робочих креслень фундаменту, значно знизити обсяг вартісних та трудомістких робіт по дослідному випробуванню паль на майданчику будівництва.

#### **Висновки**

1. В результаті проведеного аналізу літературних джерел встановлено, що методи польових досліджень ґрунтів є основним джерелом отримання необхідних вихідних даних щодо природних умов району або ділянки розміщення споруди, яке забезпечить розробку технічно правильних і економічно доцільних рішень при проектуванні та будівництві.

2. Метод статичного зондування можна віднести до найбільш точного методу вивчення властивостей ґрунтів серед інших методів польових випробувань. Особливо це важливо при обстеженні ґрунтів на щільно забудованих майданчиках, а також в підземному будівництві – при спорудженні нових станцій метро, колекторів, пішохідних переходів, паркінгів, реконструкції підвальних приміщень.

3. При виконанні робіт з проектування пальових фундаментів статичне зондування ґрунтів використовується для інженерно-вивірених розрахунків несучої здатності паль (як забивних, так і буронабивних).

4. Безсумнівною перевагою методу статичного зондування є його екологічність та відносно невисока вартість.

#### **БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК**

1. В.П. Ананьев, А.Д. Потапов. Инженерная геология. Учебник для строит. спец вузов.. М.:Высш.шк., 2002 г – 511 с.
2. Трофименков Ю.Г., Воробков Л.Н. Полевые методы исследования строительных свойств грунтов 3-е изд, перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1981. – 215 с.
3. ДСТУ Б В.2.1-6-2000 Ґрунти. Польові випробування

УДК 622.831

*Солодянкин А.В., д.т.н., проф., Иванов А.С., к.т.н., доц., г. Днепропетровск, Украина  
Раскидкин В.В., директор проектно-конструкторского бюро НПО «Механик», г. Макеевка, Украина*

#### **ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАССИВЕ ПОРОД В ОКРЕСТНОСТИ СОПРЯЖЕНИЙ**

**Введение.** Объем сопряжений горизонтальных и наклонных выработок на угольной шахте составляет всего 6...8% общего объема горных работ [1, 2]. Этим объясняется относительно малое количество научно-технической литературы, посвященной расчету и выбору крепи сопряжений и технологии ее возведения в различных горно-геологических условиях. Тем не менее, вопросы поддержания сопряжений выработок чрезвычайно актуальны и обусловлены как геомеханическими условиями их поддержания, так и важностью в общем комплексе подземных выработок угольных шахт.

Под сопряжением понимают область породного массива, включающую в себя узел сопряжения и примыкающие к нему участки выработок, подверженные взаимному влиянию в результате наложения их зон опорного давления. Узел, по определению авторов [1], это

участок горной выработки, образуемый в результате соединения (пересечения) двух и большего числа выработок.

Основная особенность всех сопряжений – повышенное горное давление в результате наложения зон опорного давления сопрягаемых выработок и узла, а также многократное нарушение участка породного массива, вмещающего сопряжение, при сооружении узла и сопрягающихся выработок, что, однако не всегда принимается во внимание при выборе крепи сопряжений.

#### **Анализ основных положений проектирования крепи сопряжений**

Необходимо отметить, что многообразие горнотехнических и горно-геологических условий требует индивидуального подхода к составлению проекта или паспорта крепления сопряжений горных выработок.

Тем более что отсутствие единой теории расчета параметров крепи сопряжений выработок привело к возникновению большого количества методик расчета. При этом предпочтение в большинстве случаев отдается методикам и способам проектирования, основанных на результатах эмпирических исследований.

Например, эффективным, но достаточно трудоемким способом проектирования крепи сопряжений является подход, описанный в [3]. В его основу положены результаты комплексных исследований крепей сопряжений, которые включали следующие этапы.

1. Обследование крепей сопряжений в шахтах в широком диапазоне геомеханических и горнотехнических условий по соответствующей «Методике проектирования...» с обработкой данных на ПЭВМ с целью получения ряда необходимых показателей для оценки надежности крепей.

2. Оценка горно-геологических условий заложения узлов сопряжений с определением значений коэффициентов устойчивости вмещающих пород для каждого сечения в кровле, борта, почве по методике КузНИИШахтостроя.

3. Аналитические исследования с анализом эпюр нагрузок и размеров зон деформированных пород в приконтурном массиве пород.

4. Стендовые испытания различных конструкций крепей сопряжений.

По результатам комплексного обследования разработан альбом «Типовые конструктивные решения плоских сопряжений капитальных ( $S_{пр}$  до 22 м<sup>2</sup>) и подготовительных выработок для условий Кузбасса», включающий 9 типов сопряжений с использованием унифицированных конструкций металлических арочных крепей из взаимозаменяемого профиля СВП-22 и СВП-27.

Основными параметрами крепи сопряжений являются несущая способность и величина податливости. Несущая способность крепи и ее податливость на узлах сопряжений подготовительных выработок, как указывается в [4], должны быть не ниже, чем в примыкающих к узлу выработках.

Для сопряжений выработок, размещенных вне зоны существенного влияния очистных работ, необходимая несущая способность податливой крепи определяется по формуле:

$$q = \gamma L^3 \sqrt{\left( e^{\frac{\gamma H}{\sigma}} - 1 \right)^2}, \text{ МПа} \quad (1)$$

где  $\gamma$  – объемный вес пород, МН/м<sup>3</sup>;  $L$  – пролет сопряжения, определяемый в разветвлениях на расстоянии 1-2 м от лобовой опоры, для выработок, примыкающих под углом, близком к прямому:

$$L = L_1 + \frac{L_2}{2}, \quad (2)$$

где  $L_1$  – ширина магистральной выработки, м;  $L_2$  – ширина примыкающей выработки

(рис. 1),  $m$ ;  $H$  – глубина заложения сопряжения, м;  $\sigma$  – предел прочности породы на одноосное сжатие, МПа.

Предел прочности пород определяется как средневзвешенная прочность по слагающим слоям в кровле на высоту, равную ширине сопряжения.

Расчет величины податливости крепи сопряжений, размещенных вне зоны существенного влияния очистных работ, рекомендуется производить по формуле:

$$U = 0,1L \left[ e^{\frac{\gamma H - 10 \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^2 q}{\sigma}} - 1 \right], \quad (3)$$

где  $U$  – смещение пород кровли, м;  $\sigma_0$  – условная прочность пород ( $\sigma_0 = 30$  МПа).

Рекомендуемые зависимости (2) и (3) могут быть использованы для расчета параметров сопряжения при условии  $\gamma H / \sigma \leq 0,65$  и предела прочности пород на одноосное сжатие не менее 30 МПа.

Предваряя этап расчета и выбора параметров сопряжения, необходимо отметить следующие важные замечания для получения результатов, соответствующих реальным горно-геологическим и горнотехническим условиям.

Во-первых, в расчетных формулах должна быть учтена реальная прочность массива, с учетом структурной неоднородности пород, степени обводненности, средневзвешенной прочности массива, слагающих толщ и т.д.

Во-вторых, в указанных формулах не учтена концентрация напряжений, а значит – увеличение нагрузки на крепь сопряжений и смещений породного контура, вызванная влиянием очистных работ, близлежащих выработок, которыми являются также и выработки, примыкающие к сопряжению.

В-третьих, величина пролета, показанная на схемах сопряжений (см. рис. 1), должна быть увеличена, поскольку технология сооружения сопряжений, растянутая во времени, а также влияние комплекса выработок, приводит к тому, что область разрушенных пород вокруг сопряжения существенно увеличивается, что эквивалентно увеличению пролета выработки и действующей нагрузке.

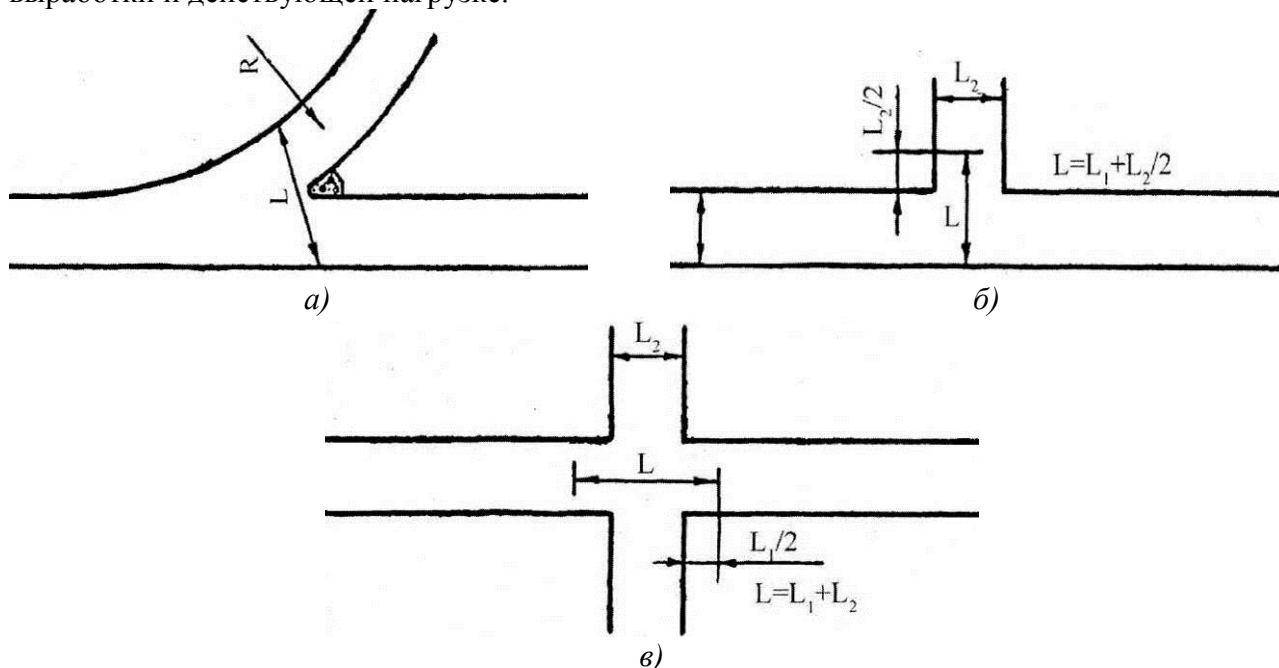


Рисунок 1 – Пролеты сопряжений: а – разветвление; б – примыкание; в – пересечение

### Выбор метода определения НДС породного массива в окрестности сопряжения подготовительных выработок

Сложность решения задач геомеханики в аналитической постановке, трудоемкость и ограниченная область применения результатов экспериментальных исследований, привели к широкому использованию численных методов.

На настоящий момент для решения задач геомеханики достаточно развиты численные методы – метод граничных (МГЭ) и метод конечных элементов (МКЭ), позволяющие определить характеристики НДС области массива любой конфигурации, в том числе и пространственной. Поскольку замкнутых зависимостей при использовании этих методов получить не удастся, для установления закономерностей интересующего исследователей явления, необходимо проведение вычислительных экспериментов того или иного объема, заключающегося в вариации определяющих параметров.

Основными предпосылками для выбора метода определения НДС являются особенности расчетной схемы задачи и деформационной модели среды. Расчетная схема задачи должна включать и узел сопряжения и выработки, сопрягающиеся (пересекающиеся) под определенным углом. То есть, исследуемая область массива является многосвязной, причем взаимное влияние границ полостей таково, что их нельзя рассмотреть с точки зрения условий плоской деформации и НДС необходимо исследовать в трехмерной постановке. Следующим важным элементом является то, что одним из влияющих факторов является соотношение между жесткостями слоев. Поэтому необходимо использование модели трансверсально-изотропной среды, имитирующей природную горизонтальную слоистость породного массива.

Наиболее эффективным для отражения перечисленных выше особенностей является метод конечных элементов, который на сегодняшний день является наиболее распространенным численным методом механики благодаря его универсальности и пригодности для моделирования НДС систем сложной геометрии и различного уровня неоднородности.

МКЭ предполагает разбиение исследуемой области на конечное число подобластей - малых частей простых форм, называемых элементами (рис. 2), эффективно заменяющими сложную задачу несколькими простыми, которые необходимо решить совместно. Элементы имеют общие точки, называемые узлами. Реакция в любой точке элемента определяется суммарными реакциями узлов элементов.

Каждый узел полностью описывается рядом параметров, зависящих от типа анализа и используемого элемента (рис. 3). Все виды нагрузок, действующие на исследуемую область и формирующие в ней определенное напряженно - деформированное состояние, приводятся к статически эквивалентным силам, приложенным в узловых точках. На внешнем контуре рассматриваемой области массива и на контуре выработки задаются поверхностные силы  $F_n$ , которые в случае отсутствия поверхностных нагрузок равны нулю, а перемещения узловых точек контура неизвестны. Этапы определения характеристик НДС помощью метода конечных элементов показаны на (рис. 4).

Вводимая в расчетную схему исходная информация состоит из следующих параметров: число конечных элементов, на которые разбивается исследуемая область; общее число узлов образующихся при этом разбиении и координаты этих узлов; число типов элементов с разными физико-механическими свойствами; значения физико-механических свойств для каждой группы элементов, значения напряжений и перемещений, характеризующие граничные условия.

Задача сводится к решению системы уравнений, содержащих глобальную матрицу жесткости системы, элементы которой характеризуют размеры конечного элемента, его механические свойства, координаты узлов и связь между перемещениями узлов и перемещениями внутренней точки конечного элемента; вектор узловых сил системы,

характеризующий внешние загрузки, в том числе массовые силы от веса пород; неизвестный вектор перемещений узлов конечно-элементной сетки.

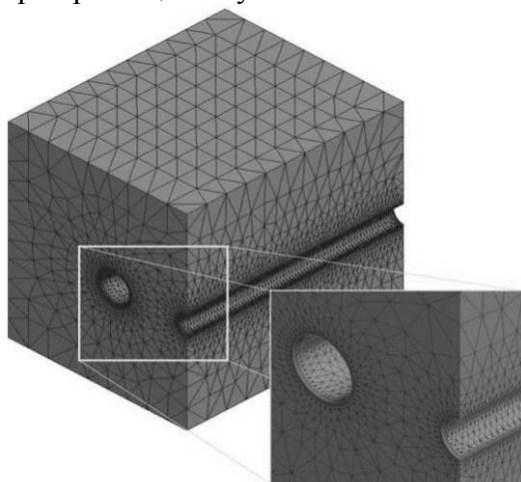


Рисунок 2 – Представление породного массива в виде совокупности взаимосвязанных элементов



Рисунок 3 – Тетраэдральный элемент



Рисунок 4 – Этапы расчета математической модели методом конечных элементов

В результате решения системы уравнений определяются значения перемещений узлов, от которых переходят к перемещениям внутренних точек элемента, а затем к относительным деформациям и напряжениям в этих точках. Таким образом, результатом вычислений есть полный тензор напряжений, деформаций и перемещений в каждом конечном элементе области.

Полученная информация является первым этапом исследований, предшествующим обоснованию параметров способа обеспечения устойчивости сопряжений выработок.

#### **Численные исследования НДС породного массива в окрестности сопряжения подготовительных выработок и анализ результатов.**

Целью численного моделирования являлось определение областей приконтурного массива с повышенными зонами разрушения, влияющими на состояние выработки. Методом конечных элементов моделировалось трехмерное НДС области, включающей Т-образное сопряжение подготовительных выработок (рис. 5).

Конечноэлементная аппроксимация области осуществлялась посредством элементов-

тетраэдров. Наиболее сложные зоны распределения напряжений находятся вблизи поверхностей обнажений. Поэтому для зоны в кровле выработки размер элементов сетки был уменьшен до 20-30 см по ребру тетраэдра.

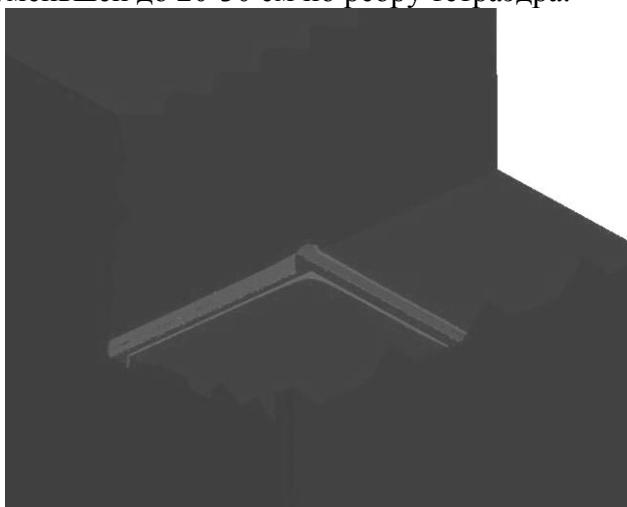


Рисунок 5 – Расчетная схема T-образного сопряжения подготовительных выработок



Рисунок 6 – Распределение коэффициента запаса прочности породного массива в окрестности сопряжения

Предел прочности на сжатие пород принимался равным 54 МПа. С учетом коэффициента структурного ослабления (для данных условий  $k_c = 0,5$ ) прочность пород основной кровли составляет 27 МПа.

На рис. 5 показано распределение коэффициента запаса прочности породного массива на сопряжении выработок. Более светлым цветом отмечены зоны повышенных напряжений, характеризующие область разрушенных пород (зоны повышенной трещиноватости).

Размеры этих зон непосредственно в узле сопряжения выработок, а также по длине протяженных участков выработки определяют параметры способа охраны сопряжений.

Результаты моделирования показали, что протяженность участков повышенных деформаций приконтурного массива вдоль выработки примыкающей к сопряжению составляет 12 м, вдоль основной выработки длина этого участка увеличивается до 15 м (рис. 7). Размер зоны трещиноватости непосредственно в точке сопряжения выработок достигает 3,5 м (по диагонали) и по мере удаления снижается до обычных размеров, характерных для одиночных выработок не испытывающих влияния близлежащих.

Практика поддержания выработок в условиях образования зон повышенной трещиноватости в приконтурном массиве пород свидетельствует, что одним из эффективных способов повышения устойчивости выработок является использование анкерной крепи. Размеры зон повышенной трещиноватости позволяют применять для этой цели обычные анкера и удлиненные, устанавливаемые непосредственно в месте пересечения выработок.

К настоящему времени в практике угольных шахт России и Украины уже накоплен достаточный опыт применения способов обеспечения устойчивости сопряжений за счет создания системы «крепь-окружающий породный массив» с применением анкерной крепи [1, 3, 5-8]. Параметры системы обеспечения устойчивости выработки решаются применительно к конкретным условиям поддержания выработок, с учетом возможностей шахт и отработанной технологии крепления выработок. Так, в [6] показан опыт применения промежуточных анкеров увеличенной длины, что явилось эффективным средством крепления сопряжений подготовительных выработок на шахте «Абашевская». Данный вариант крепления сопряжений широко используется на шахтах Кузбасса.

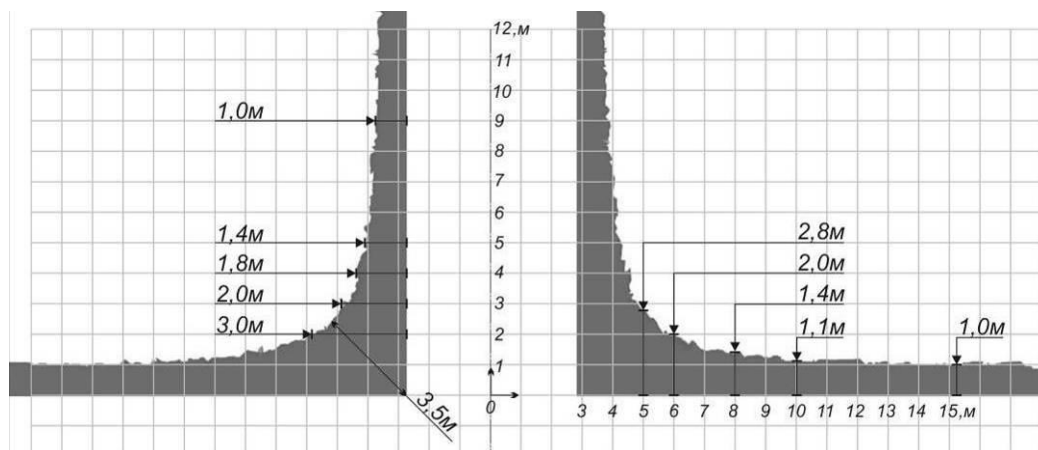


Рисунок 7 – Размеры зон приконтурного массива повышенной трещиноватости в окрестности сопрягаемых выработок

По данным работы [1], податливая крепь сопряжений за счет усиления анкерами повышает работоспособность на 10...15 %, увеличивая трудоемкость крепления сопряжения (в пределах узла) на 20...25 %, но снижающая последующие затраты на ремонтные работы. В породах прочностью до 40 МПа анкерами усиливается и камерная рама для повышения устойчивости ее стоек.

В зарубежной практике (Германия, Англия) практически все сопряжения независимо от вида применяемых крепей, имеют анкерное усиление, позволяющее снизить стоимость крепи на 12...15 %.

**Вывод.** При выборе крепи сопряжений не всегда принимается во внимание увеличение трещиноватости приконтурного массива пород на протяженных участках выработок, примыкающих к сопряжению. Численное моделирование участка Т-образного сопряжения позволило установить параметры зон повышенной трещиноватости приконтурного массива пород. Полученные результаты позволяют обоснованно выбрать в качестве эффективного способа повышения устойчивости сопряжения анкерную крепь, с длиной анкеров, соответствующих параметрам установленных трещиноватых зон.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кошелев К.В., Игнатович Н.В., Полтавец В.И. Поддержание сопряжений горных выработок. – К.: Техника, 1991. – 176 с.
2. Минин В.А. О классификации сопряжений капитальных горных выработок и технологии их сооружения // Шахтное строительство. – 1988. – № 10. – С. 23-26.
3. Франкевич Г.С., Карпова Я.С. Крепление узлов сопряжений на шахтах Кузбасса // Горный информ.-аналит. бюллетень. – 2003. – № 4. – С. 223-225.
4. Руководство по составлению паспортов крепления сопряжений подготовительных выработок с металлической арочной и рамной трапециевидной крепями в условиях пологих пластов шахт Госуглепрома Украины. – Донецк, 1994. – 73 с.
5. Широков А.П., Писляков Б.Г. Расчет и выбор крепи сопряжений горных выработок. - М.: Недра, 1988. - 241 с.
6. Колокольцев Г.Ф., Широков А.П., Лидер В.А. Опыт применения анкерной крепи на шахте «Абашевская» // Уголь. – 1983. – № 5. – С. 3-4.
7. Широков А.П. Перспективы применения анкерной крепи в Кузбассе // Уголь. – 1983. – № 10. – С. 19-24.
8. Смирнов Г.Н. Применение анкерной крепи при проведении выработок на шахте «Юбилейная» // Уголь. – 1983. – № 10. – С. 14-15