

## КОНЦЕПЦИЯ РАСЧЕТА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ГОРНОМ МАССИВЕ

Общие геомеханические закономерности изменения напряжений в горном массиве являются основой прогнозной оценки его состояния при обосновании способов управления горным давлением и расчете параметров систем разработки месторождений полезных ископаемых. Оценка напряженного состояния массива осуществляется преимущественно по соотношению напряжений, действующих по взаимно перпендикулярным направлениям - главным осям тензора напряжений. Отношение горизонтальных напряжений к вертикальным принято называть коэффициентом бокового распора горного массива. Этот коэффициент во многих случаях имеет аномальную особенность - превышение единицы его численных значений. В литературе приведено множество результатов, полученных многими исследователями (Н. Гей, Г.Ф. Паллистер, Н.Хаст, Г.А. Крупенников и др.), экспериментальных измерений напряжений в горных массивах различных стран и континентов, подтверждающих эту особенность [1,2].

Однако исследователям до сих пор в полной мере не ясно, чем объяснить природу превышения горизонтальных напряжений над вертикальными, их порождающими. Для расчета напряжений в массиве выдвинуто несколько гипотез, и исследователи используют для каждой совокупности численных значений коэффициента бокового распора определенную гипотезу, например, Г.А. Маркова, А.Н. Динника и др. Для объяснения фактов превышения горизонтальных напряжений над вертикальными выдвинута гипотеза, которой утверждается, что это явление заключается в осложнениях залегания горных пород, обусловленных действием тектонических сил. Однако эта гипотеза исследователей не вооружена конкретным аналитическим методом расчета коэффициента бокового распора. Попытаемся восполнить этот пробел, ссылаясь на мнения геофизиков. Будем исходить из общего положения, что в горном массиве постоянно происходят физические процессы, например, тепловые, диффузивные и др., веледствие этого - и тектонические, которые порождают очаги возмущения или движения слоев горных пород друг относительно друга. Добавим к этому, что скважина, через которую осуществляется доступ к зоне замеров напряжений, сама является источником возбуждения к перемещению

элементов околоскважинной области. Не оспаривая возможности порождения очагов концентраций напряжений вблизи тектонических зон, покажем, что превышение горизонтальных напряжений над вертикальными может быть обусловлено особенностями перехода слоистых (блочных) горных пород в предельное состояние, которые формируются сочетанием характеристик физико-механических свойств деформируемого материала.

Горные породы, как правило, залегают слоями и блоками, характеризующимися различными значениями деформационных характеристик (модуля упругости и коэффициента поперечной деформации). При деформации слоев породы, характеризующейся внутренним трением, по плоскостям контакта возникает их проскальзывание друг относительно друга. В результате этого возбуждаются силы трения, направленные в сторону, противоположную скольжению, и достигающие существенных величин. Контактное трение ведет к возникновению неоднородности деформации. Силы трения конкретных поверхностей распространяются в глубины деформируемого тела, и возникают зоны затрудненной деформации, что, в конечном итоге, обеспечивает повышение несущей способности массива. Все эти обстоятельства приводят к мысли, что метод расчета коэффициента бокового распора горного массива, основанный на теории предельного состояния твердых тел, усовершенствованной с учетом не только внутреннего, но и внешнего трения, будет справедлив для решения широкого класса задач деформирования горных пород. На основании этого разработан аналитический метод, позволяющий с единых позиций описать весь спектр численных значений коэффициента бокового распора, включая и аномальную особенность.

Для разработки метода используем элементы теории перехода в предельное состояние материала, обладающего внешним и внутренним трением [3]. В предшествующих теоретических разработках показано, что внешнее и внутреннее трение играют огромную роль при формировании значений предельных нагрузок. Из равновесия элементарного треугольника (рис. 1) получено

$$\frac{\sigma_v - \sigma_r}{2} \sin 2\alpha - \tau \cdot \cos 2\alpha = k + \mu \left( \frac{\sigma_v + \sigma_r}{2} + \frac{\sigma_v - \sigma_r}{2} \cos 2\alpha + \tau \cdot \sin 2\alpha \right), \quad (1)$$

где  $\sigma_v$  и  $\sigma_r$  - вертикальные и горизонтальные напряжения;  $\tau$  - касательные напряжения на границе контакта слоев породы, равные  $f \cdot \sigma_v$ ;  $\mu$  и  $f$  - коэффициенты внутреннего и контактного (внешнего) трения;

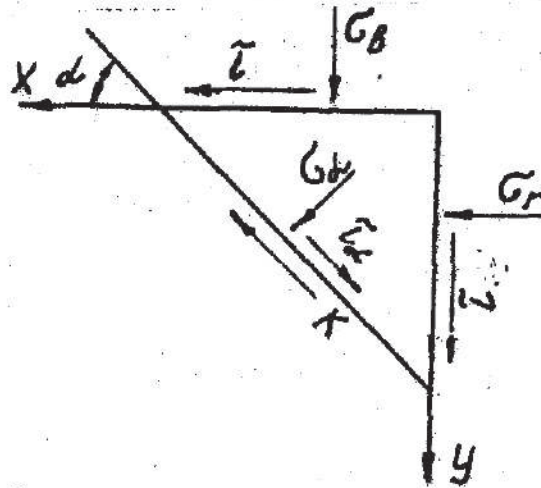


Рисунок 1 – Схема равновесного элементарного треугольника

$k$  - сопротивляемость материала на сдвиг,  $\alpha$  - угол наклона площадки скольжения.

Углы наклона линий скольжения определим с помощью уравнения [3]

$$\alpha = -\frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\sigma_b - \sigma_r - 2\mu\tau}{\mu[(\sigma_b - \sigma_r) - 2\tau]} \quad (2)$$

Используя выражение (2), находим тригонометрические функции выражения

(1)

$$\sin 2\alpha = \frac{\sigma_b - \sigma_r - 2\mu\tau}{\sqrt{(1+\mu^2)[(\sigma_b - \sigma_r)^2 + 4\tau^2]}} \quad (3)$$

$$\cos 2\alpha = -\frac{\mu(\sigma_r - \sigma_b) - 2\tau}{\sqrt{(1+\mu^2)[(\sigma_b - \sigma_r)^2 + 4\tau^2]}} \quad (4)$$

После подстановки функций (3) и (4) в равенство (1) и приведения подобных членов, определим уравнение предельного состояния материалов с внутренним трением

$$- [2k \cos \rho + (\sigma_b + \sigma_r) \sin \rho] = \sqrt{(\sigma_b - \sigma_r)^2 + 4\tau^2} \quad (5)$$

где  $\rho = \operatorname{arctg} \mu$  - угол внутреннего трения.

Решая уравнение (5) относительно  $\sigma_r$ , получаем

$$\sigma_r = \frac{(1 + \sin^2 \rho) \sigma_b}{\cos^2 \rho} + 2k\mu \frac{2(k + \mu\sigma_b) \sqrt{1 - b_c^2}}{\cos \rho} \quad (6)$$

где  $b_c = \frac{\tau}{k + \mu\sigma_b} = \frac{f \cdot \sigma_b}{k + \mu\sigma_b}$

Преобразуем выражение (6) к более удобному виду

$$\sigma_r = 2 \left( \mu^2 \cdot \sigma_b + k \cdot \mu - \frac{k + \mu \cdot \sigma_b}{\cos \rho} \sqrt{1 - b_c^2} \right) + \sigma_b. \quad (7)$$

Принимаем в качестве напряжения  $\sigma_b$  величину горного давления, равную  $\gamma H$  ( $\gamma$  - плотность пород;  $H$  - глубина залегания угольного массива) и в качестве коэффициента внешнего трения  $f$  величину коэффициента контактного трения слоев породы.

Тогда, учитывая, что коэффициент бокового распора равен  $\eta = \frac{\sigma_r}{\sigma_b}$ , имеем

$$\eta = 1 + 2 \mu^2 + \frac{2k \cdot \mu}{\gamma \cdot H} \frac{2}{\gamma \cdot H \cos \rho} \sqrt{(k + \mu \cdot \gamma \cdot H)^2 - f^2 \cdot \gamma^2 \cdot H^2}. \quad (8)$$

Таким образом, получена новая формула расчета коэффициента бокового распора угольного массива.

Теперь проведем сопоставление теоретических формул с экспериментальными данными. Наиболее полное обобщение и анализ экспериментальных данных по изменению напряжений от глубины породных массивов земной коры было выполнено Айтматовым И.Т. [1]. Им утверждается, что исследованиями Н. Хафта, И.А. Турчанинова, Г.Л. Маркова, В.И. Иванова и др. было показано, что массивы пород Балтийского щита находятся под действием высоких горизонтальных сжимающих напряжений, превосходящих горизонтальные напряжения Каледонского хребта в 5 раз на глубине 1000 м, и более, чем в 10 раз, на глубине 100 м.

Айтматов И.Т. считает, что механизм формирования горизонтальных напряжений в Каледонском хребте хорошо объясняется теоретической моделью Н.А. Динника, согласно которой главным фактором формирования напряжений в породах является их собственный вес и горизонтальная реакция массива, а в коноллицированных стабильных щитах (Балтийском, Канадском и др.) - денудационно-тектонической концепцией Г.А. Маркова. Общей особенностью горных массивов, упомянутых хребта и щита является то, что суммы напряжений (горизонтальных и вертикальных) от глубины залегания пород описываются линейными зависимостями. В последующем покажем, что эта особенность также вытекает из наших теоретических построений. Возьмем в качестве примера наиболее полные экспериментальные данные по горным массивам Африканской платформы, где в разных местах ряд исследователей (Н. Гей, Г.Ф. Паллистер, Н. Хафт и др.) провели большой объем работ по измерению напряжений в интервале глубины от 20 до 2500 м. Позаимствуем обобщенную совокупность экспериментальных данных по этой платформе

из работы И.Т. Айтматова. В докембрийских образованиях Южной Африки, представленных кварцито-песчаниками, метаморфическими сланцами и другими породами высокой прочности, в интервале глубин до 500 м коэффициент бокового распора изменяется от 2,0 до 1,0, то есть с глубиной отношение  $\sigma_r/\sigma_v$  уменьшается. Уменьшение этого коэффициента происходит приблизительно до глубины около 1,0 км, а далее его значение практически стабилизируется и становится равным 0,6-0,7. Для проверки формулы (8) проведем расчет горизонтальных напряжений в горном массиве, задаваясь взаимоувязанными значениями сопротивляемости на сдвиг, коэффициентов контактного и внутреннего трения, учитывая при этом, что численные значения вертикальных напряжений соответствуют весу залегающих пород. Значения заданных параметров, соответствующие согласно расчету по формуле (8) экспериментальным значениям вертикальных и горизонтальных напряжений (незатемненные кружочки) в зависимости от глубины залегания породы, нанесен на рис. 2. Также подсчитаны и нанесены на рисунок данные (крестиком) суммы вертикальных и горизонтальных напряжений. Соответственно расчетным значениям параметров построены аппроксимирующие зависимости в виде кривых и прямых линий. Из рисунка видно, в какой степени изменяются напряжения и характеристики физико-механических свойств горных пород с глубиной их залегания. Характер изменения свойств согласно расчетным данным соответствует известным натурным наблюдениям: по мере увеличения глубины залегания увеличивается прочность горных пород (повышается сопротивляемость на сдвиг), повышается пластичность (уменьшаются коэффициенты внутреннего и контактного трения между слоями пород). Общепринято, что с увеличением всестороннего давления, по мере увеличения глубины, увеличиваются площади контактов между зернами породообразующих минералов за счет закрытия щелевых пор и влияния температуры; уменьшается анизотропия материала и увеличивается его плотность, однородность и прочность. Этим объясняется изменение физико-механических свойств горных пород, способствующее уменьшению горизонтальных напряжений по мере увеличения глубины их залегания. Линейность расчетной зависимости (рис. 2; прямая 2) суммы вертикальных и горизонтальных напряжений подтверждается многочисленными натурными замерами [1,2].

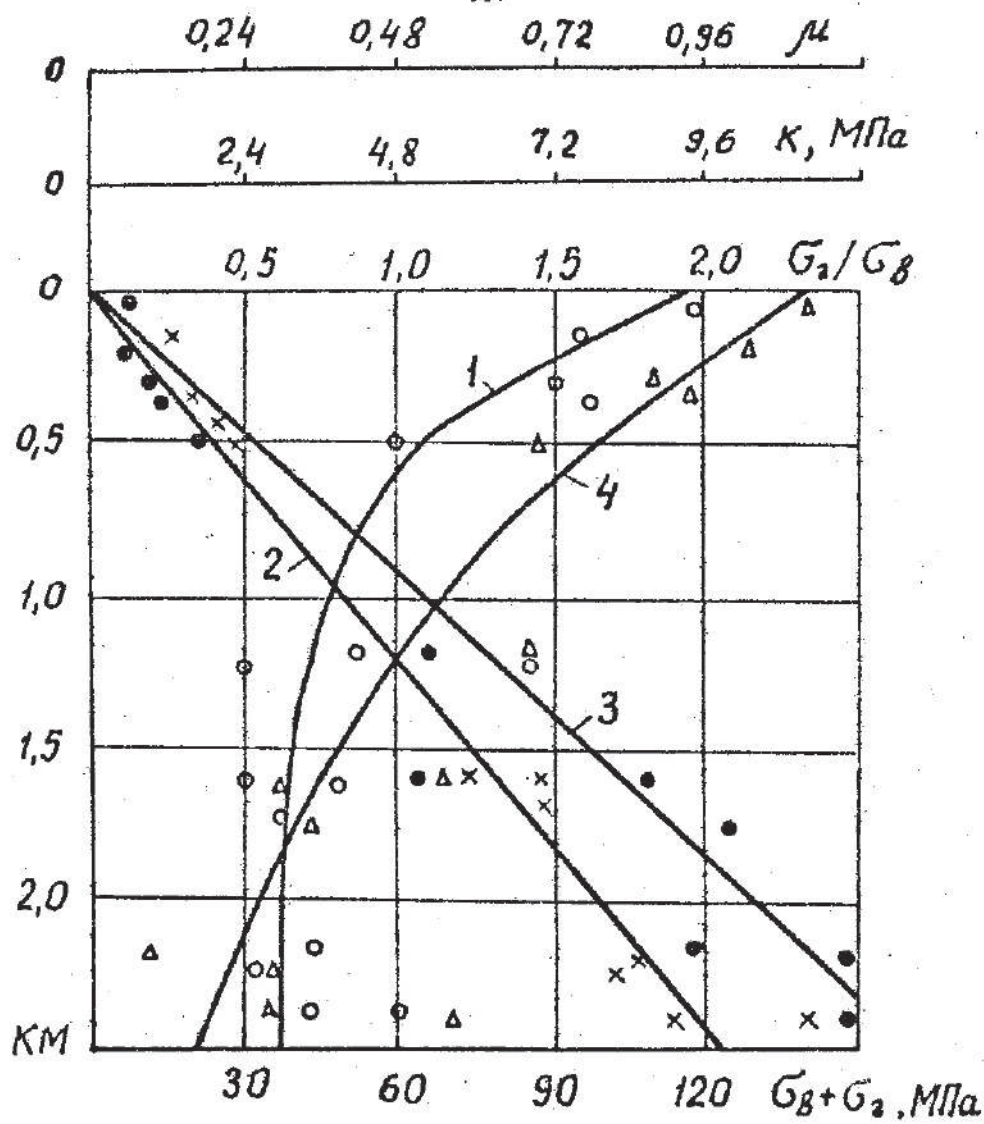


Рисунок 2 – Зависимости коэффициента бокового распора (1) от суммы напряжений (2), сопротивляемости сдвигу (3), коэффициента внутреннего и внешнего трения (4) от глубины залегания дексбийских пород Южной Африки

Таким образом, мы приходим к выводу, что весь спектр совокупности численных значений горизонтальных напряжений, в том числе и аномальных (превышающих вертикальные), может быть обусловлен определенным сочетанием показателей физико-механических свойств (сопротивляемостью на сдвиг, коэффициентами внутреннего и контактного трения) горных пород, и объяснен с единых позиций перехода в предельное состояние слоистых (блочных) породных массивов под действием гравитационных сил.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лйтматов И.Т. Научные основы геомеханической оценки рудных месторождений горноскладчатых областей. // Дис. докт. техн. наук. Новосибирск - 1986.-305с.
2. Крупенников Г.А., Филатов Н.А., Амусин В.З., Барковский В.М. - М.: Недра, 1972.-144с.

З. Васильев Л.М., Бычков О.Н. Метод расчета напряжений при внедрении плоского штампа в упругий материал, обладающий внешним и внутренним трением. // Новые методы разрушения и механика горных пород. - Киев: Наук. думка, 1981.-С.3-9.

УДК 551.24:550.44

В.В. Лукинов, Л.Л. Шкуро

### ВЛИЯНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН В УГЛЯХ И ПОРОДАХ

Анализ сложности тектоники отдельных участков Донбасса позволил выделить на площади бассейна Донбасса семь структурных зон и три подзоны, существенно различающихся по степени тектонической дислоцированности [ 1 ].

Наиболее сложная в тектоническом отношении - Центральная зона крупных линейных складок, к северу и югу от нее расположены северная и южная зоны мелкой складчатости. Они дислоцированы менее чем Центральная, но более чем периферийные (Новомосковско-Петропавловская, Красноармейская моноклинали).

Реакция углей и вмещающих пород на тектонические напряжения, сформировавшие современный структурный план Донецкого бассейна, была различна.

Под действием напряжений в углях интенсивно развивалась экзогенная трещиноватость, а во вмещающих породах увеличивалась объемная плотность, ухудшались коллекторские свойства, более интенсивно проходил процесс уплотнения.

Подтверждением этих выводов являются исследования изменения скорости распространения продольных волн в углях и во вмещающих породах, залегающих в различных структурно-тектонических зонах.

В качестве исходной информации использованы результаты определения скорости распространения продольных волн ( $V_p$ ), зарегистрированной приборами акустического каротажа "Парус-1" и "Парус-4" в углеразведочных скважинах.

Объектами исследования служили угли и вмещающие породы, представленные тремя литотипами: песчаниками, алевролитами и аргиллитами, которые вмещают пласты углей марок Г, Ж, К, ОС, Т, А.

Исследования проводились на участках разведки и шахтных полях, которые расположены в различных структурно-тектонических зонах: участки "Морозовский", "Свидовской" (зона Новомосковско-Петропавловской моноклинали-