

УДК 622.831.1

АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В ПЕРЕХОДНЫХ ЗОНАХ

Грищенко Н.Н. (ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

На основі експериментальної залежності між головними напруженнями та деформаціями порід отримані графіки розрахункових максимальних дотикових напружень. Визначена область позаграничного стану гірських порід та проведений аналіз сумісного графіку цієї області з зонами опорного тиску та зонами розвантаження гірських порід.

The diagrams of calculated maximal tangential stresses have been received on the base of experimental relationship between main stresses and deformations. There have been defined the area of beyond-extreme rock state and have been made analysis of overlaid diagram for this area, areas of abutment pressure and areas of pressure unloading.

Традиционный подход к построению границ зон ПГД и зон разгрузки основан на критерии равенства начальных (геостатических) напряжений в нетронутом массиве и полных напряжений в горном массиве с учетом влияния очистных работ. При этом в расчет принимаются только напряжения, нормальные к напластованию пород, т. е. реализуется критерий $\sigma_y = \sigma_y^0$, где σ_y - нормальные к напластованию полные напряжения, а σ_y^0 - нормальные к напластованию геостатические напряжения. Известно, что $\sigma_y = \sigma_y^0 + \sigma_{yy}$, где σ_{yy} - нормальные к напластованию дополнительные напряжения, обусловленные влиянием очистных работ. С учетом этого, критерий $\sigma_y = \sigma_y^0$ эквивалентен критерию $\sigma_{yy} = 0$.

Результаты исследований, приведенные в работах [1, 2], указывают на необходимость изменения подхода к построению границ зон ПГД. При этом одним из главных факторов,

требующих учета, является влияние дополнительных напряжений σ_{xx} в плоскости напластования, вызванных влиянием очистных работ. Учесть это влияние при построении границ зон ПГД можно введением дополнительного критерия $\sigma_{xx} = 0$. Тогда границы зон ПГД следует строить на основе совместного комплексного критерия $\sigma_{yy} = 0 \wedge \sigma_{xx} = 0$ [2]. На рис. 1 показаны границы зон ПГД, построенные по указанному критерию для одиночной лавы.

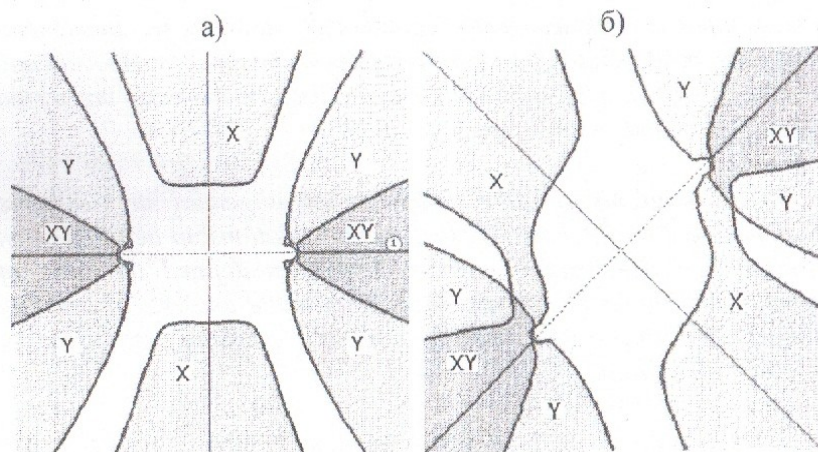


Рис. 1. Границы зон ПГД для одиночной лавы при горизонтальном и наклонном ($\alpha = 45^\circ$) залегании пластов

На рис. 1 темным цветом окрашены области зон ПГД, а светлым цветом - области разгрузки. Буквами Y обозначены области зон ПГД для напряжений нормальных к напластованию, а буквами X - области зон ПГД для напряжений в плоскости напластования. Буквами XY обозначены области зон ПГД, общие для этих двух критериев, т.е. области, где проявление действия горного давления будет наибольшим. Введем для образовавшихся четырех типов зон ПГД и разгрузки следующие обозначения: $X^{(+)}Y^{(+)}$, $X^{(-)}Y^{(+)}$, $X^{(+)}Y^{(-)}$, $X^{(-)}Y^{(-)}$. В этих обозначениях знак "плюс" в верхнем индексе указывает на повышенные

напряжения соответствующей компоненты по сравнению с геостатическими напряжениями, а знак "минус" - соответственно пониженные напряжения. Таким образом, область $X^{(+)}Y^{(+)}$, закрашенная темно-серым цветом, указывает зону опорного давления, где обе компоненты напряжений выше геостатических напряжений. Область $X^{(-)}Y^{(-)}$ представляет собой область разгрузки, где обе компоненты напряжений ниже геостатических напряжений. Области $X^{(-)}Y^{(+)}$ и $X^{(+)}Y^{(-)}$ представляют собой переходные зоны, в которых одна из компонент напряжений выше соответствующих геостатических напряжений, а другая - ниже.

С практической точки зрения целесообразно рассмотреть вопрос о соотношении границ зон опорного давления, построенных по новому критерию, с зонами запредельного состояния горных пород, в которых наиболее вероятны деформации пород вмещающей толщи. Серьезные исследования вопросов прочности горных пород и устойчивости выработок на больших глубинах были выполнены во ВНИМИ (г. Ленинград), в особенности следует отметить работы Ставрогина А.Н. и Протасени А.Г. [3, 4].

В работе [3] описаны эксперименты, проведенные на жестких установках в камерах высокого давления, где исследовались прочностные свойства горных пород в условиях сжатия при боковом давлении. На рис. 2 приведены результаты исследований, выполненных для невыбросоопасных песчаников Донбасса. По оси ординат отложены величины главных осевых напряжений σ_1 , по оси абсцисс вправо отложены главные осевые деформации ε_1 , а влево - поперечные деформации ε_2 . На графике приведены кривые зависимости деформаций ε_1 и ε_2 от напряжений σ_1 при различных значениях боковых напряжений σ_2 (0, 5, 10, 25, 50 и 100 МПа).

Приведенные на рис. 2 данные позволяют оценить пространственное расположение зон запредельного состояния горных пород, т.е. таких зон, которых породы подвергнутся гарантированному разрушению. Согласно теории Кулона-Мора разрушение материала происходит тогда, когда действующие

касательные напряжения τ_{\max} превышают максимально допустимые касательные напряжения $\tau_{\max}^{\text{доп}}$. Имея данные о величинах главных осевых напряжений σ_1 и σ_2 для предельного состояния горных пород, можно вычислить максимально допустимые касательные напряжения по формуле

$$\tau_{\max}^{\text{доп}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (1)$$

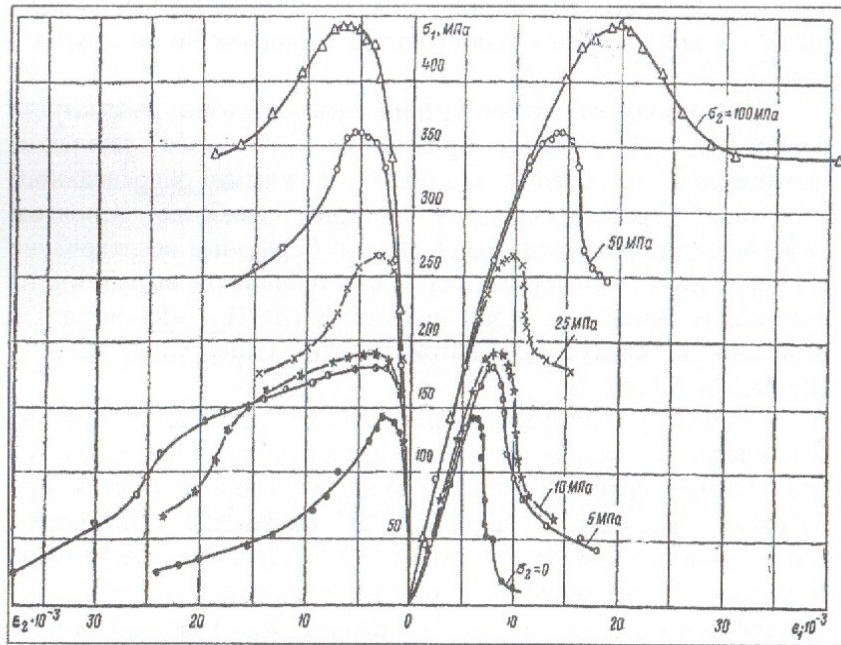


Рис. 2. Зависимость между главными напряжениями и деформациями при разных напряженных состояниях для невыбросоопасных песчаников Донбасса

Для получения пространственной картины распределения максимально допустимых касательных напряжений $\tau_{\max}^{\text{доп}}$ необходимо иметь количественные характеристики главных

осевых напряжений σ_1 и σ_2 . С этой целью графики кривых деформаций на рис. 2 были оцифрованы, полученные результаты оцифровки приведены на рис. 3 и 4.

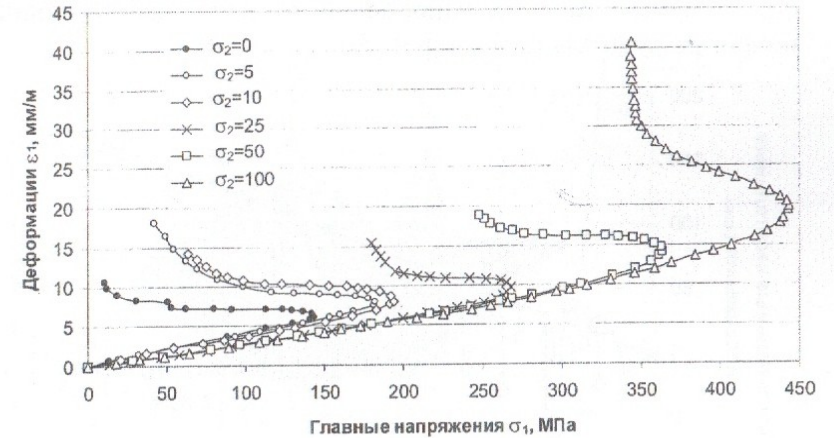


Рис. 3. Зависимости осевых деформаций ϵ_1 от главных напряжений σ_1 и σ_2

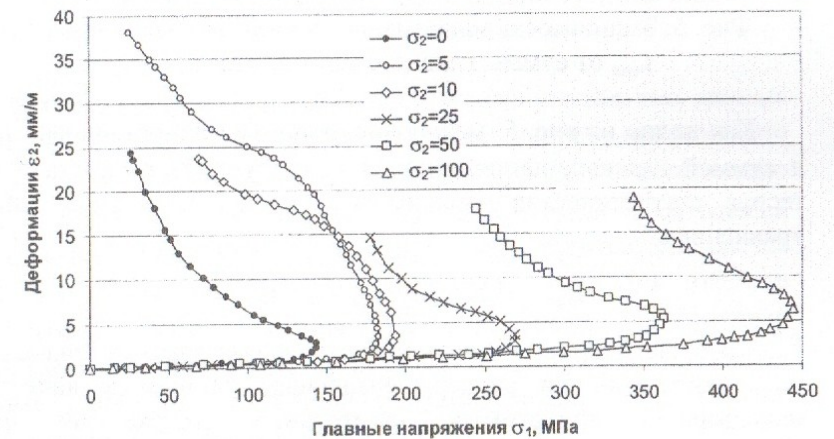


Рис. 4. Зависимости боковых деформаций ϵ_2 от главных напряжений σ_1 и σ_2

Из формулы (1) следует, что между максимальными касательными напряжениями τ_{\max} и главными напряжениями σ_1 и σ_2 существует линейная зависимость. Для проверки экспериментальных данных был построен график зависимости τ_{\max} от суммы главных напряжений σ_1 и σ_2 , действующих в момент разрушения породы (рис. 5).

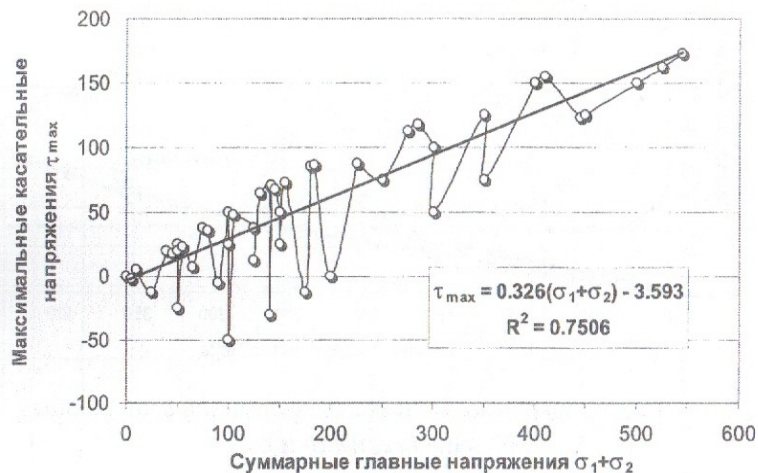


Рис. 5. Зависимость максимальных касательных напряжений τ_{\max} от суммы главных напряжений σ_1 и σ_2

Как видно из рис. 5, между касательными напряжениями τ_{\max} и суммой главных напряжений σ_1 и σ_2 существует достаточно тесная статистическая зависимость, описываемая следующим уравнением

$$\tau_{\max} = 0,326 \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) - 3,593. \quad (2)$$

Это подтверждает возможность использования значений τ_{\max} , найденных по экспериментальным данным в качестве максимально допустимых касательных напряжений при оконтуривании зон запредельного состояния горных пород.

Далее был проведен следующий вычислительный эксперимент. Для условий отработки одиночной лавы был

произведен расчет максимальных касательных напряжений τ_{\max} . Длина лавы принималась равной 200 м, средняя глубина разработки – 800 м, угол падения пласта – 0°. Результаты расчета приведены на рис. 6.

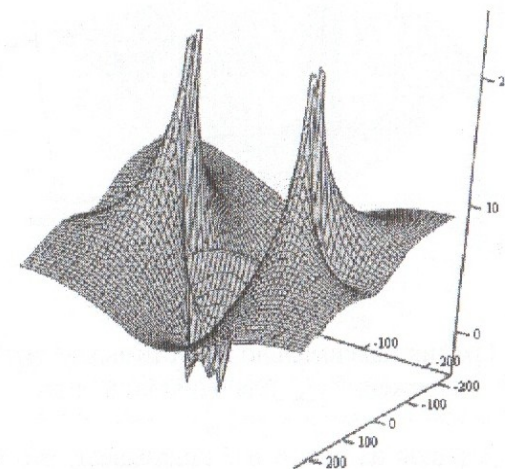


Рис. 6. График расчетных максимальных касательных напряжений τ_{\max} для одиночной лавы

Затем по результатам оцифровки экспериментальных данных (рис. 2) в системе MathCAD были вычислены максимально допустимые касательные напряжения $\tau_{\max}^{\text{доп}}$. Далее необходимо было найти значения максимально допустимых касательных напряжений для точек, в которых был произведен расчет касательных напряжений для отработки лавы. Для этого в расчетных точках значения $\tau_{\max}^{\text{доп}}$ находились с помощью аппроксимирующей функции по формуле (2). График найденных таким образом максимально допустимых касательных напряжений $\tau_{\max}^{\text{доп}}$ приведен на рис. 7.

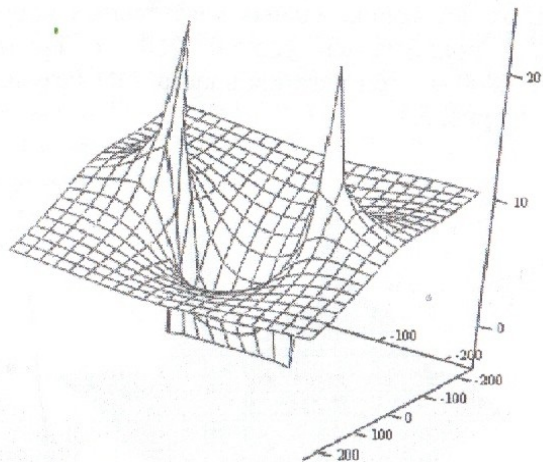


Рис. 7. График максимально допустимых касательных напряжений τ_{\max} для одиночной лавы

Анализ графиков на рис. 6 и 7 показывает, что между ними существует некоторое сходство, но вместе с тем имеются и отличия в конфигурации полученных поверхностей. Для того, чтобы зафиксировать эти отличия, был построен совмещенный график расчетных и максимально допустимых касательных напряжений (рис. 8). Расчетные касательные напряжения заштрихованы на рисунке темно-серым цветом.

Из рис. 8 следует, что существует область, в которой расчетные касательные напряжения превышают максимально допустимые значения. Это область запрдельного состояния горных пород. Исходя из прочностных свойств горных пород, в этой области следует ожидать разрушения пород массива. Видно, что эта область приурочена к краевым частям отрабатываемой лавы и к зоне разгрузки. Уточненное положение этой области, построенное в системе MathCAD по всем расчетным точкам, приведено на рис. 9.

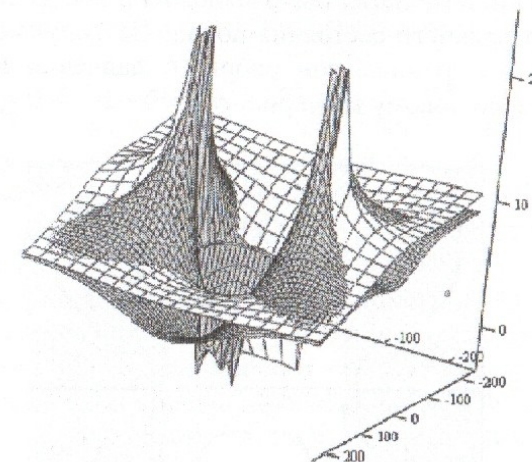


Рис. 8. Совмещенный график расчетных τ_{\max} и максимально допустимых $\tau_{\max}^{\text{доп}}$ касательных напряжений

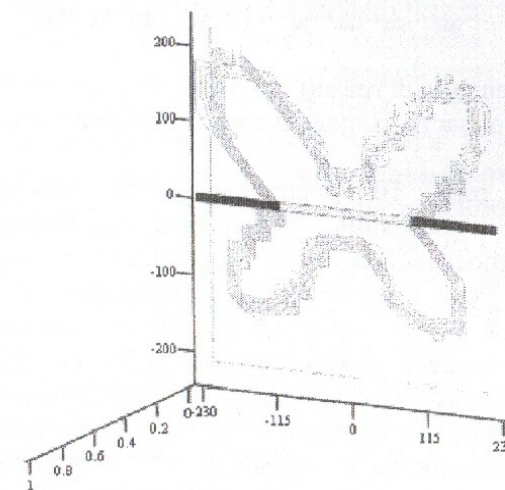


Рис. 9. График границы области запрдельного состояния горных пород

Далее в системе Surfer было выполнено построение границы области запредельного состояния пород. На полученный график были наложены границы зон опорного давления и разгрузки, определенные по новому критерию $\sigma_{yy} = 0 \wedge \sigma_{xx} = 0$ (рис. 10).

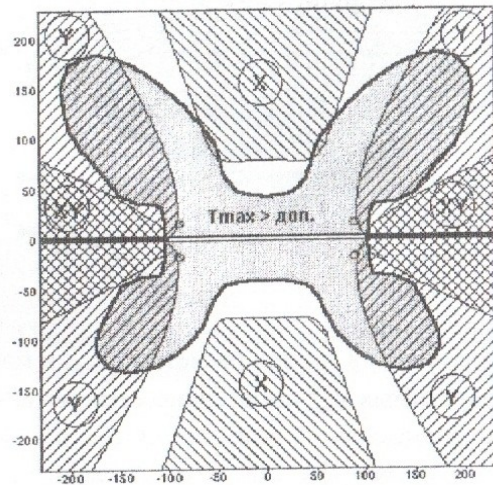


Рис. 10. Совмещенный график зон опорного давления и разгрузки и области запредельного состояния пород

Анализ рис. 10 показывает, что контуры области запредельного состояния пород накладываются на зону разгрузки, непосредственно примыкающую к выработанному пространству лавы, а также на переходные зоны $X^{(-)}Y^{(+)}$ и $X^{(+)}Y^{(-)}$. В переходных зонах повышение горного давления в одном направлении (вкрест напластования либо по напластованию пород) сочетается с разгрузкой в другом направлении.

Характерно, что контуры области запредельного состояния пород не пересекаются с зонами $X^{(+)}Y^{(+)}$ опорного давления, в которых обе компоненты напряжений (σ_y и σ_x) являются повышенными по сравнению с соответствующими геостатическими напряжениями σ_y^0 и σ_x^0 . В зонах $X^{(+)}Y^{(+)}$ горные породы находятся в состоянии объемного сжатия и не имеют

возможности деформироваться, однако нарастание напряжений σ_y и σ_x может спровоцировать газодинамические явления в этих зонах.

Следует также отметить, что участки области запредельного состояния пород, совпадающие с переходными зонами, всегда располагаются между зонами полной разгрузки $X^{(-)}Y^{(-)}$ и зонами опорного давления $X^{(+)}Y^{(+)}$. Это говорит о необходимости дифференцировать меры по управлению горным давлением в переходных зонах.

В проведенных расчетах для оконтуривания области запредельного состояния пород использовались экспериментальные данные о прочностных свойствах невыбросоопасных песчаников Донбасса. Аналогичный подход целесообразно использовать и для других горных пород вмещающей толщи. Проведенное компьютерное моделирование показало, что изменение прочностных свойств влияет в определенной степени на размеры области запредельного состояния пород, но конфигурация этой области остается примерно постоянной. При этом сохраняется отмеченное выше наложение области запредельного состояния пород на переходные зоны $X^{(-)}Y^{(+)}$ и $X^{(+)}Y^{(-)}$ и зону полной разгрузки $X^{(-)}Y^{(-)}$.

Области запредельного состояния горных пород формируются в результате очистной выемки и относятся к массиву пород вмещающей толщи. Оконтуривание этих областей производилось на основе фундаментального положения теории прочности Кулона-Мора, согласно которому разрушение материала происходит при превышении касательными напряжениями их предельных значений, определяемых по главным напряжениям σ_1 и σ_2 . Возникающие под действием очистной выемки дополнительные напряжения создают в этих областях касательные напряжения, превышающие предельные значения. Значительные размеры пролета выработанного пространства очистной выработки определяют возможность деформирования горных пород вмещающей толщи в этих областях. Таким образом, области запредельного состояния пород характеризуют те участки горного массива, где вследствие

очистной выемки следует ожидать деформаций разрушения горных пород.

СПИСОК ССЫЛОК

4. Грищенко Н.Н. Многокритериальный подход к построению зон опорного давления // Проблемы гірського тиску. Зб. наук. праць, №5. – Донецк, 2001. – с.133–140.
5. Сабынин А.В., Грищенко Н.Н., Мирумян А.Г. Дифференцированная оценка зон опорного давления // Проблемы гірського тиску. Зб. наук. праць, №6. – Донецк, 2001. – с.83–92.
6. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. – М.: Недра, 1985. – 271 с.
7. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Механика деформирования и разрушения горных пород. – М.: Недра, 1992. – 224 с.: ил.

Здано до редакції 22.10.2007

Рекомендував до друку д.т.н. Садовенко І.О.