

2. Справочник по прикладной статистике /Под ред. Э.Ллойда, У.Ледермана. М., 1990.
3. Berger J. Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis. New York, 1985.
4. Huber P. Robust Statistics. New York, 1981.
5. Geisser S. // Lecture Notes in Statistics. New York, 1992. Vol.75. P.289.
6. Kharin A. // Proc. of the V-th Int. Conf. «Comp. Data Analysis & Modeling». Minsk, 1998. P.112.
7. Galinskij V., Kharin A. // Proc. of the VII-th Int. Vilnius Conf. on Prob. Theory and Math. Statistics. Vilnius, 1998. P.209.

Поступила в редакцию 09.09.98.

УДК 539.3: 622.831

М.А.ЖУРАВКОВ

## ЕСТЕСТВЕННОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОРОДНОГО МАССИВА

The approach to evaluate a natural stress state (main stresses) of rock massif is described. Necessity to take into consideration of opportunity of existence of two various initial stress state of massif is denoted. The model of possible evolution of geodynamic massif condition is described.

Одним из показателей, отражающих состояние массива горных пород, является *уровень его напряженности*. Так, например, образование тектонических структур во многом определяется действующими геофизическими полями напряжений. В свою очередь, складчатые и разрывные нарушения являются причиной возникновения тектонической напряженности массива. Переход массива горных пород из одного напряженного состояния в другое сопровождается качественными изменениями: образованием новых структурных элементов с новыми свойствами. Переход массива горных пород в новое качественное состояние происходит под действием сил тектонической и техногенной природы и зависит от уровня *начального напряженного состояния*. Поле начальных напряжений может быть *естественным гравитационным* или *предельно-напряженным* уже вблизи поверхности земли вследствие действия сил тектонической природы.

При оценке регионального напряженно-деформированного состояния (НДС) участка породного массива необходимо учитывать ряд существенных факторов, как например: силовое воздействие со стороны более крупных участков земной коры (т.е. напряженное состояние более высокого ранга); тектоногенетические процессы и механизмы, обусловившие образование тектонических структур различного типа; строение массива; физико-механические свойства слагающих пород и эффективные характеристики массива в целом.

Поля напряжений являются динамическими, так как видоизменяются под воздействием геодинамических и техногенных процессов. Постоянное геодинамическое и техногенное воздействие на массив (например, вследствие обработки месторождения полезных ископаемых) влечет за собой дальнейшее накопление повреждений, которые в свою очередь определяют или даже формируют современные прорастающие магистральные разломы и трещины.

Изучение естественного напряженного состояния массива включает несколько этапов. Так, расчет силового поля существенным образом требует выполнения следующих действий.

А. Изучение блочной структуры массива и ее генезиса [1,2].

Для этого определяется иерархическая соподчиненность структурообразования в рассматриваемом регионе, воссоздаются физико-механические условия формирования тектонических структур, выявляется степень унаследованности современным полем напряжений тех полей, которые обусловлены предшествующим развитием региона. Полученные результаты используются для формирования граничных условий в модельных задачах.

**Б.** Реконструкция полей напряжений в массиве, повлекших образование тектонических нарушений, с помощью подходов механики деформируемого твердого тела и механики разрушения.

Для выполнения этих операций необходимо установить деформационные и прочностные свойства горных пород, определить механизм деформирования и модели разрушения массива на блоки.

Оценку начального поля напряжений можно производить, исходя из следующего [3,4]. Между напряжениями и деформациями, вплоть до разрушения пород, существуют определенные закономерности. Кроме того, момент и характер разрушения соответствуют выбранной гипотезе прочности (например, гипотезе Кулона—Мора). Поэтому поле напряжений можно восстановить, решив обратную задачу: по характеру нарушений в массиве горных пород, по виду входящих в него структурных блоков и по соотношениям, определяющим вид разрушения, реконструируется напряженное состояние массива, предшествовавшее разрушению. Если дополнительно рассмотреть формирующиеся разломы, то восстанавливается картина действующего поля напряжений.

Общий вид выражений для главных напряжений (фоновых) при образовании структур в процессе сброса, раздвига, взброса, надвига, сдвига пород может быть представлен в виде следующих зависимостей [4]:  $\sigma_i^{(j)} = \lambda_i^{(j)}(\rho, \mu, \alpha) \gamma H + C_i^{(j)}(\rho, \mu, \alpha) \sigma_0$ , где  $i = \overline{1,3}$  определяет компоненту главных напряжений;  $i = 4,5$  — соответственно касательное и нормальное напряжения в породах, находящихся в непосредственной близости от разрыва, ориентированного, в свою очередь, под углом  $\alpha$  к плоскости действия минимального напряжения  $\sigma_3$ . Индекс  $j = \overline{1,3}$  определяет тип структур, образованных соответственно при сбросах, раздвигах ( $j=1$ ), взбросах, надвигах ( $j=2$ ), и сдвигах ( $j=3$ ). Формулы для коэффициентов  $\lambda_i^{(j)}$  и  $C_i^{(j)}$  представлены в [4,13].  $\lambda_i^{(j)}$  и  $C_i^{(j)}$  — функции от коэффициента (угла) внутреннего трения  $\rho$ , предела прочности пород на одноосное сжатие  $\sigma_0$ , коэффициента поперечной деформации  $\mu$ , ориентации разлома (угол  $\alpha$ ).  $\gamma$  — средняя плотность пород для рассматриваемого участка массива на глубине  $H$ .

Ориентация главных напряжений может быть установлена с помощью методов тектонофизики и геофизических методов.

**В.** На следующем этапе, используя в качестве граничных условий полученные результаты, методами математического моделирования оценивается перераспределение напряжений собственно в блочном массиве и вдоль контактов отдельных блоков для исследуемого региона.

**Г.** И наконец, на данном этапе выполняется прогнозная оценка НДС массива на определенных этапах обработки месторождения (освоения подземного пространства).

Оценку напряженного состояния массива горных пород необходимо выполнять еще до начала ведения подземных работ (подземное строительство, разработка месторождения полезных ископаемых). Это можно выполнить, например, методом геодинамического районирования [1,5].

Оценка напряженного состояния горного массива выполняется в два этапа.

На **первом этапе** устанавливаются напряжения в массиве на основе отнесения того или иного его участка к зонам сжатия или растяжения земной коры.

В зонах растяжения и таких зонах, в которых в силу тектонических особенностей деформирования массива отсутствует воздействие активных горизонтальных сил, усредненные напряжения в массиве можно рассчитывать по А.Н.Диннику: наибольшее главное напряжение равно весу пород и действует вертикально, горизонтальные главные напряжения равны между собой и могут быть выражены через боковой отпор.

В зонах преобладающего горизонтального сжатия земной коры, в части ее, прилегающей к земной поверхности, создаются условия для возникновения предельно напряженного состояния [3].

*Замечание.* Внешним признаком наличия таких зон могут являться, например, проявления естественной сейсмичности.

В этом случае максимальную составляющую напряжений в массиве  $\sigma_1$  образует активная сила в горизонтальной плоскости. Действие этих напряжений уравнивается за счет влияния веса горных пород от рассматриваемой точки до земной поверхности. Промежуточное напряжение  $\sigma_2$ , действующее в горизонтальной плоскости, определяется как боковой отпор от  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ .

Величины горизонтальных главных напряжений в зоне предельно напряженного состояния массива не могут быть определены в настоящее время главным образом из-за отсутствия надежных закономерностей изменения показателей прочности горного массива по мере увеличения глубины. Вследствие этого могут быть приняты различные гипотезы относительно характера изменения напряжений по мере роста глубины.

Оценки в первом приближении главных напряжений в массиве.

Логично в первом приближении принять линейный характер нарастания напряжений с глубиной (корректность данного допущения согласуется с гипотезой Л.Гейма—А.Н.Динника).

При оценке главных напряжений необходимо выделить два случая: массив находится в допредельном напряженном состоянии и в предельно-напряженном состоянии.

Первый случай соответствует, например, действию в массиве лишь сил гравитации.

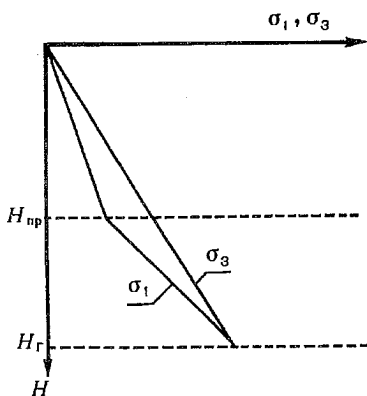


Рис.1. Оценка главных напряжений в массиве в первом приближении в случае действия гравитационных сил

Типовая приближенная картина распределения главных напряжений в этом случае может быть представлена в виде схемы (рис.1).

*Замечание.* Примем, что  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  — компоненты горизонтальных главных напряжений, а  $\sigma_3$  — компонента вертикальных главных напряжений.

Предельное напряженное состояние массива в компонентах главных напряжений в общем виде может быть записано как  $\psi(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0$ . (1)

Физически запись (1) характеризует переход пород из одного физического состояния в другое. Математически это означает условие применимости различных физических уравнений, описывающих эти состояния.

*Замечание.* На графике это выражается переходом на новую кривую.

Пусть для компонентов главных напряжений справедливы следующие соотношения:

$$\sigma_3 = \int_0^H \gamma(z) dz, \quad \sigma_2 = \sigma_x(z), \quad \sigma_1 = \sigma_y(z), \quad (2)$$

где  $H$  — глубина от поверхности земли до рассматриваемой точки массива. И пусть предельное напряженное состояние пород описывается уравнениями вида:

$$\sigma_3 - \frac{1 + \sin \rho}{1 - \sin \rho} \sigma_1 = \sigma_{press} \quad (3)$$

или

$$\sigma_3 - \frac{\sigma_{press}}{\sigma_{ext}} \sigma_1 = \sigma_{press} \quad (4)$$

Здесь  $\sigma_{press}$ ,  $\sigma_{ext}$  — пределы прочности на одноосное сжатие и растяжение соответственно;  $\rho$  — угол внутреннего трения пород.

*Замечание.* Записи (3) и (4) выписаны в соответствии с нашими обозначениями, т.е.  $|\sigma_3| \geq |\sigma_2| \geq |\sigma_1|$ . Наиболее распространенным в литературе является допущение  $|\sigma_1| \geq |\sigma_2| \geq |\sigma_3|$ .

$H_{np}$  — глубина, начиная с которой горные породы переходят в предельное напряженное состояние, а  $H_e$  — глубина, начиная с которой горные породы теряют прочность и устанавливается гидростатическое напряженное состояние.

*Замечание.* На глубинах, где горные породы переходят в предельное напряженное состояние, коэффициент внутреннего трения  $\sin \rho$  становится равным нулю. Следовательно, условие (4) принимает вид  $\sigma_3 - \sigma_1 = \sigma_{press}$ .

Рассмотрим **второй случай** — массив вблизи земной поверхности находится в предельном напряженном состоянии. В этом случае в соответствии с принятыми нами обозначениями  $|\sigma_1| \geq |\sigma_2| \geq |\sigma_3|$ .

*Замечание.* Этот случай моделирует состояние динамического равновесия, когда любые внешние дополнительные воздействия могут привести к нарушению устойчивости и дискретному характеру деформирования массива.

Для предельно-напряженного массива вблизи земной поверхности максимальное горизонтальное напряжение  $\sigma_1$  можно принять равным

$$\sigma_1 = k \sigma_{press} \quad (5)$$

где  $k$  — коэффициент структурного ослабления.

Предельное напряженное состояние в этом случае описывается уравнениями вида:

$$\sigma_1 - \frac{1 + \sin \rho}{1 - \sin \rho} \sigma_3 = \sigma_{press} \quad (6)$$

или

$$\sigma_1 - \frac{\sigma_{press}}{\sigma_{ext}} \sigma_3 = \sigma_{press} \quad (7)$$

С учетом (2) напряжения в (6) и (7) являются функциями координаты  $z$  (глубины):

$$\sigma_1(z) = \frac{1 + \sin \rho}{1 - \sin \rho} \sigma_3(z) + \sigma_{press}(z) \quad (8)$$

$$\sigma_1(z) = \frac{\sigma_{press}}{\sigma_{ext}} \sigma_3(z) + \sigma_{press}(z) \quad (9)$$

На основании (5), (8) и (9) кривая оценки главных напряжений в массиве, находящемся в предельном напряженном состоянии, представлена на рис.2 (обозначения такие же, что и на рис.1).

Из приведенных зависимостей следует, что важным является установление значения величин  $H_{np}$  и  $H_r$  для конкретных пород и уточнение приведенных зависимостей.

Факт существования режимов деформирования породного массива в допредельном и предельно-напряженном состоянии уже вблизи земной поверхности имеет важное значение для объяснения характера поведения массива в естественных условиях и под влиянием техногенных воздействий (инженерной деятельности людей).

Гипотеза о возможности нахождения толщ массива, прилегающей к земной поверхности, в предельно-напряженном состоянии позволяет объяснить многие процессы в массиве. Такой участок массива горных пород в каждый момент имеет предельное распределение напряжений и предель-

ный запас потенциальной энергии [6]. На любое изменение устойчивости данного участка в целом или его отдельных частей вследствие естественных или техногенных причин массив будет отвечать активными деформационными процессами, стремясь восстановить существовавшее до этого предельно-напряженное состояние.

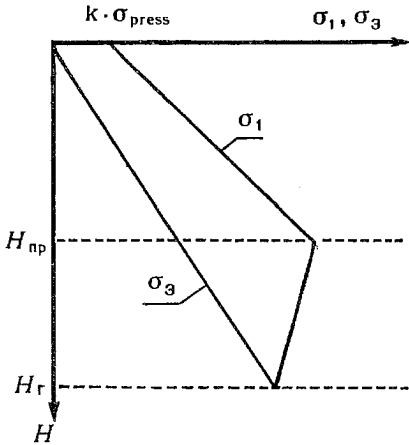


Рис.2. Оценка главных напряжений предельно-напряженного вблизи земной поверхности массива

которой ведет к проявлению хрупкого разрушения в массиве в виде толчков [6].

Еще одно важное заключение можно сделать из приведенных выражений для расчета напряжений: так как с увеличением глубины разработки дискретность распределения напряжений в массиве снижается, то роль блочного строения массива и его тектонической нарушенности (сдвигов, сбросов, надвигов и других дислокаций) затухает [6].

*Замечание.* Примером нарушения естественного предельно-напряженного состояния является проявление толчков при заполнении водохранилища и установление нового предельно-напряженного состояния.

На основании сказанного модель развития геодинамического состояния массива может быть представлена следующим образом [6]:

1. Все динамические процессы и явления в земной коре (землетрясения, толчки, горные удары, внезапные выбросы и др.) можно рассматривать с единой позиции закономерностей поведения массива, находящегося в предельном напряженном состоянии, т.е. такие явления проявляются в областях породного массива, находящегося в предельно-напряженном состоянии.

2. Деформирование массива в предельно-напряженном состоянии происходит дискретно “толчкообразным” образом до установления нового предельно-напряженного состояния. Данное обстоятельство имеет место вследствие дискретности распределения напряжений и потенциальной энергии упругого деформирования массива, вызванных, в свою очередь, различием физико-механических свойств горных пород, их литологического состава, форм и последовательностей залегания, блочностью иерархической ступени.

**Вторым этапом** оценки напряжений в нетронутом или нарушенном массиве является расчет напряжений в блочном массиве методами интегральных уравнений или конечных элементов, когда в качестве граничных условий используются усредненные главные напряжения [8,9].

В этом случае при проектировании и строительстве конкретных подземных сооружений можно иметь достоверные данные о напряженном состоянии блочного массива и принимать обоснованные решения по технологическим вопросам освоения подземного участка породного массива.

*Замечание.* Данный процесс деформирования может быть смоделирован с помощью подходов теории катастроф [7].

Так как такие деформационные процессы в блочном массиве происходят по неровным поверхностям ослабления, существующим в нем или вновь образующимся, то их можно охарактеризовать как “толчкообразный” (дискретный) процесс деформирования, происходящий с притоком энергии извне при каждом толчке, т.е. этот процесс является динамическим.

*Замечание.* В каждый момент времени и в каждом месте участка массива, находящегося в зоне предельно-напряженного состояния, существует своя скорость пластического деформирования и релаксации, превышение

Окончательное поле напряжений строится путем наложения естественного и техногенного полей напряжений. В результате можно строить прогнозные карты зон опасного напряженного состояния для решения вопросов безопасности ведения горных работ.

Так как поле техногенных напряжений является динамическим, т.е. изменяется в соответствии с развитием горных пород, то изучение и уточнение состояния блочного массива необходимо выполнять постоянно. Для этого можно закладывать специальные геодинамические полигоны для проведения мониторинговых исследований как на земной поверхности, так и в глубине массива (в шахтах) с использованием геодезических и геомеханических измерений, микросейсмических наблюдений, геофизических методов.

В частности, система геомониторинга должна включать следующие основные методики инструментальных измерений геомеханических характеристик горного массива [10]:

- сейсмический контроль за динамическими явлениями как естественного, так и техногенного происхождения;
- деформографические и наклономерные наблюдения за медленными деформациями и подвижками в массиве;
- контроль изменений гидрорежима в массиве;
- электрометрические и сейсмoeлектрические измерения;
- измерения напряжений в массиве в подземных выработках;
- нивелирования I класса по поверхностным и подземным полигонам;
- регистрацию проявлений горного давления в подземных выработках;
- диагностический контроль сооружений, конструкций и оборудования.

Следует иметь в виду, что целесообразность использования той или иной методики (в том числе и не вошедших в перечень) на данном конкретном объекте может быть установлена лишь опытным путем. Методики должны быть объединены в единый комплекс, с автоматизацией процессов регистрации и обработки данных в реальном времени. Такой комплекс позволит не только решить задачу получения необходимых знаний о массиве и режиме его деформирования, но на основе создания банка данных и разработанных с помощью расчетов критериев прогнозировать возникновение опасных и катастрофических ситуаций в процессе ведения горных работ и эксплуатации подземных сооружений.

*Замечание.* По современным представлениям геодинамический полигон (все месторождение или его часть) — это часть земной коры, где осуществляется совместное изучение современных движений земной коры и геофизических полей с целью прогноза проявления структуры для того, чтобы уметь различить природные и техногенные процессы в структурно неоднородной среде на основе расчетных моделей развития деформационных процессов во времени и системы натурных наблюдений.

Таким образом, оценку и прогноз напряженного состояния в породном массиве следует производить на основе представлений о напряженно-деформированном состоянии массива в естественных условиях и при техногенном воздействии на него, с учетом структуры и уровней предельного напряженного состояния последнего в совокупности с мониторинговыми исследованиями напряженного состояния.

1. Батугина И.М., Петухов И.М. Геодинамическое районирование месторождений при проектировании и эксплуатации рудников. М., 1988.

2. Журавков М.А., Земсков А.Н., Смычник А.Д. Влияние природных и техногенных факторов на неодинамическое состояние литосферы в районах геологических нарушений. Мн., 1997.

3. Работа Э.Н., Батугина И.М. // Профилактика горных ударов при проектировании и строительстве шахт: Сб. науч. тр. / ВНИМИ. Л., 1985. С.11.

4. Работа Э.Н. // Геодинамика месторождений: Сб. науч. тр. / КузПИ. Кемерово, 1988. С.42.

5. Методические указания по профилактике горных ударов на основе геодинамики месторождений. М., 1983.

6. Петухов И. М. // Проблемы горной геомеханики при разработке полезных ископаемых. Л., 1989. С.97.

7. Zhuravkov M., Andreyko S., Zemskov A. // Computer applications and operations research in the mineral industries. Pub. By Moskow State Mining University, 1977. P.502.

8. Работа Э.Н., Комаров В.О. // Сб. научн. тр. ВНИМИ. Л., 1983. С.41.

9. Зубков В.В. // Проблемы теории трещин и механика разрушения (Исследования по упругости и пластичности. Вып.15). Л., 1986. С.39.

10. Сырников Н.М. // Контроль состояния скального массива при долговременной эксплуатации крупногабаритных подземных сооружений. Сб. науч. тр. Апатиты, 1993. С.49.

11. Журавков М.А., Смычник А.Д. Проектирование геомониторинговых систем для регионов крупномасштабного освоения подземного пространства. Мн., 1997.

Поступила в редакцию 28.05.98.