

## **Выводы**

1. В статье разработан алгоритм решения математической задачи моделирования взаимодействия между шахтным подъемным сосудом, представленным упругим деформируемым твердым телом с 5-тью степенями свободы, и проводниками жесткой армировки шахтного ствола с дефектами пространственного профиля.

2. Показано, что конфигурация дефекта влияет на форму граничных условий задачи в виде возникающих при контакте изгибающих моментов и поперечных сил на верхнем и нижнем поясах рамы сосуда.

3. Определены собственные числа и собственные функции колебательного процесса.

4. Получено общее решение задачи поведения шахтного подъемного сосуда при взаимодействии с локальным дефектом проводника произвольной конфигурации.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ильин, С.Р. Взаимодействие предохранительных башмаков подъемных сосудов с выступами на стыках проводников / С.Р.Ильин, Б.С. Послед // Геотехническая механика: Сб. научных трудов ИГТМ НАН Украины – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 2001 – вып. 29. – С.189-195.

2. Ильин, С.Р. Построение диагностической модели для автоматизированного определения мест наезда подъемных сосудов на уступы в стыках проводников жесткой армировки вертикальных стволов / С.Р. Ильин, Б.С. Послед // Геотехническая механика: Сб. научных трудов ИГТМ НАН Украины – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 2003 – вып. 40. – С.245-255.

**УДК 622.831**

Науч. сотр. Ю.Ю. Булич  
мл. науч. сотр. С.А. Головки  
(ИГТМ НАН Украины)

## **ВЛИЯНИЕ РАЗРЫХЛЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРЕДЕЛЬНО-НАПРЯЖЕННЫХ ПОРОД К СНИЖЕНИЮ МИНИМАЛЬНОГО ГЛАВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ЗА ПРЕДЕЛОМ ПРОЧНОСТИ**

У роботі проведено порівняльний аналіз стаціонарних траєкторій деформування порід за межею міцності зі сталими значеннями компонент бокових напружень із ділянками, де мінімальне напруження зменшувалося. Встановлено, що в умовах нерівно-компонентного стискування зниження мінімальної компоненти головних напружень за межею міцності поряд із розпушенням порід в напрямку цієї компоненти і крихким зниженням несучої здатності, супроводжується аномально високими значеннями коефіцієнта поперекових деформацій.

## **INFLUENCE OF DILATION ON PARAMETERS OF SENSITIVITY OF EXTREMELY STRESS OF ROCK MATERIAL TO DECREASE OF THE MINIMUM MAIN PRESSURE BEHIND PEAK OF STRENGTH**

The publication the comparative analysis of results stationary trajectories of deformation of rock materials behind peak strength where lateral pressure were supported by constants with sites where the minimum main pressure decreased is resulted. It is determine, that in conditions decrease minimum components of the main pressure behind peak strength simultaneously with dilation rock materials in a direction of this components, and by fragile decrease in bearing ability is accompanied is abnormal high values of factor of cross-section deformations.

С целенаправленным изменением свойств и состояния горных пород, в том числе за пределом прочности связываются перспективы развития новых ресурсосберегающих и безопасных технологий ведения горных работ и переработки минерального сырья.

Влияние пути нагружения на прочностные и деформационные свойства горных пород, в том числе за пределом прочности в условиях осесимметричного сжатия, исследовано на установках, осуществляющих нагружение по схеме Кармана [1, 2]. В области боковых давлений от 20 до 100 МПа за пределом прочности в [2] указывается на независимость от пути нагружения модуля спада, остаточной прочности и скорости дилатансии. В области малых боковых давлений подобные исследования не проводились. В условиях неравнокомпонентного сжатия, влияние пути нагружения на характеристики горных пород, различие характера разрушения путем пригрузки и разгрузки пород, в том числе в условиях газонасыщения, исследовано в [3,4]. В этих условиях эксперимента установлены существенные различия деформационных характеристик. Испытания за пределом прочности, из-за ограниченной жесткости нагружающего устройства, представлены недостаточно.

В [6] исследованы изменения поведения пород за пределом прочности при переходе на другие предельные поверхности, за счет независимого снижения минимального и промежуточных главных напряжений. Оценка чувствительности несущей способности пород в условиях объемного неравнокомпонентного сжатия к снижению минимального и промежуточного напряжений за пределом прочности приведена в [7].

Очевидно, что повышенная чувствительность предельно-напряженных пород к изменениям минимальной компоненты главных напряжений напрямую связана с деформациями по этой оси, ограничивающими или, наоборот, усиливающими разрыхление, по сравнению со стационарными траекториями деформирования. Поэтому, для более полного понимания процессов, происходящих в массиве напряженных пород вблизи обнажений и построения адекватных моделей, необходимо:

- исследовать, при снижении минимального напряжения за пределом прочности, взаимосвязь разрыхления и деформаций по оси минимального напряжения с уменьшением несущей способности пород;
- проверить, в условиях неравнокомпонентного сжатия, особенно в диапазоне малых (0-10МПа) величин минимального напряжения, инвариантность от пути нагружения характеристик запредельного деформирования.

Исследования производились в ИГТМ НАН Украины на испытательном комплексе, включающем пресс ПСУ-500 с повышенной жесткостью [5], установку объемного неравнокомпонентного сжатия с системой измерения и регистрации [6], активный элемент бокового подпора типа бустера с системой регулирования и индивидуальной насосной станцией, датчики непосредственного измерения боковых нагрузок. В качестве объекта испытаний, выбраны представители кальциевых пород: гипса V пласта Артемовского месторождения и мокрита (месторождение Новомрамор, Узбекистан), используемых в практике ме-

ханики горных пород в качестве тестовых пород, как и мрамор [7, 8, 9]. Испытывались образцы кубической формы со стороной 0,04 м.

В качестве примера приводятся испытания двух образцов мокрита. Образец мокрита № 27 испытывался при постоянном значении промежуточного напряжения  $\sigma_2 = \text{const} = 10,1$  МПа и изменении минимального главного напряжения от базового значения  $\sigma_3 = 4,7$  МПа.

За пределом прочности на участке постепенного снижения несущей способности проделано четыре последовательных импульса различной длительности и формы повышения  $\sigma_3$  от базового значения и последующего снижения  $\sigma_3$  к базовому значению. В конечный момент повышения минимального напряжения состояние приближалось к осесимметричному. Для того, чтобы исключить погрешности измерений деформаций на этапе предварительного нагружения образца по осям с элементами трения (пассивным), анализ экспериментальных данных произведен в приращениях по наклонам кривых на соответствующих участках диаграмм  $\sigma_1 - \varepsilon_1$ ;  $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ ;  $\varepsilon_1 - \varepsilon_3$  и представлен в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты испытаний образца мокрита № 27 при локальных сходах с предельной поверхности в область неопределенных состояний и возвратах к предельному состоянию

№	$\Delta\varepsilon_3/\Delta\varepsilon_1$	$\Delta\varepsilon_2/\Delta\varepsilon_1$	M, ГПа	-1 + $+\Delta\varepsilon_3/\Delta\varepsilon_1 +$ $+\Delta\varepsilon_2/\Delta\varepsilon_1$	Снижение несущей способности на процент деформации $\varepsilon_3$		Снижение несущей способности на процент объемной деформации	
					абсолютное, МПа/%	относительное	абсолютное, МПа/%	относительное
Стационарное деформирование на ниспадающей ветви при $\sigma_3 = \sigma_3^b = 4,7$ МПа								
1	+1,8	+1,1	1,7	1,9	9,4	10,7	8,9	10,2
Участки снижения $\sigma_3$ до $\sigma_3^b$ после его повышения на 4,7 МПа								
2	+9,5	+1,1	13,4	9,6	14,1	16,1	14,0	16,0
3	+13,1	+1,1	-	13,2	-	-	-	-
4	+10,4	+1,1	14,6	10,5	14,0	16,0	13,9	15,8
5	+10,4	+0,13	17,2	9,5	16,5	18,8	18,1	20,6
6	+18,7	+0,13	-	17,8	-	-	-	-
Участки разгрузки $\sigma_3$ от $\sigma_3^b$ до 0								
7	+12,8	+0,13	17,8	11,9	13,9	15,8	15,0	17,1
8	+33,2	+0,13	17,8	32,3	5,4	6,2	5,5	6,3

Первая строка таблицы относится к участкам ниспадающей ветви, на которых величина минимальной компоненты главных напряжений поддерживалась постоянной при базовом значении 4,7 МПа, до первого импульса изменения  $\sigma_3$ ; между импульсами изменения  $\sigma_3$ , а также после четвертого импульса до начала разгрузки минимального главного напряжения от базового значения. Исследу-

емые параметры на этих участках одинаковые. Это свидетельствует о независимости (инвариантности) стационарных траекторий деформирования горных пород за пределом прочности при постоянных значениях промежуточного и минимального главных напряжений к пути нагружения, при локальных изменениях минимального главного напряжения.

Строки 2 - 6 таблицы относятся к линейным участкам разгрузки минимальной компоненты главных напряжений от 9,4 МПа до базового значения 4,7 МПа, после локального повышения  $\sigma_3$  при импульсах воздействия  $\sigma_3 = \sigma_3^B + 4,7$  МПа – 4,7 МПа =  $\sigma_3^B$ . Строки 7, 8 таблицы относятся к линейным участкам разгрузки  $\sigma_3$  от базового значения 4,7 МПа до нуля.

Пропуски в строках таблицы связаны с отсутствием выраженных прямолинейных участков одной или нескольких диаграмм и невозможности проведения касательных, однозначно характеризующих изменение искомого параметра.

Данные колонок 2, 3 представляют коэффициенты поперечных деформаций по осям минимальной и промежуточной компонент главных напряжений при стационарном деформировании за пределом прочности и на участках снижения минимального главного напряжения. В колонке 4 представлены величины модуля спада на участках стационарного деформирования и снижения минимальной компоненты главных напряжений. В колонке 5 представлены величины объемной деформации образца, отнесенные к продольной деформации на соответствующих участках запредельного деформирования.

Деформация в направлении минимальной компоненты главных напряжений играла решающую роль в кинематическом ограничении деформаций по этой оси и разрыхления испытуемого образца в целом. Среднее значение коэффициента поперечных деформаций по оси  $\sigma_3$  при его снижении на начальных этапах составило 11,2. На завершающих этапах снижения минимального напряжения, особенно на завершающих этапах полной разгрузки  $\sigma_3$ , он составил 18,7 и 33,2 соответственно. Учитывая низкие значения коэффициента поперечных деформаций по оси  $\sigma_2$ , это указывает на преимущественное расслоение образца трещинами параллельно граням с минимальным напряжением, локализацию деформаций и разлет частей образца на завершающих этапах переходного процесса.

Анализ колонки 3 таблицы показывает, что за пределом прочности деформации по оси промежуточной компоненты напряжений в общем случае развивались независимо от изменений минимальной компоненты напряжений.

Данные колонок 2, 4 и 6 указывают на взаимосвязь текущей потери несущей способности горных пород с текущими деформациями и разрыхлением по оси минимальной компоненты напряжений, как при простых, так и сложных программах испытаний.

Среднее по строкам 2, 4, 5 снижение несущей способности на один процент деформации  $\varepsilon_3$  при снижении минимального напряжения (14,9 МПа/%), при данных условиях испытаний, приблизительно в 1,6 раза превышало таковое для

простого деформирования за пределом прочности(9,4 МПа/%), когда величина минимального и промежуточного напряжения поддерживалась постоянной.

Средняя по строкам 2, 4, 5 величина модуля спада на участках снижения минимального напряжения в 1,3 раза, а на участках полной разгрузки минимального напряжения (строки 7,8) соответственно в 1,5 раза больше модулей спада образцов испытанных в условиях одноосного сжатия.

Принципиально, что темпы падения несущей способности на участках снижения минимального напряжения, не смотря на большие, по сравнению со стационарными участками, средние величины минимального напряжения, превышали таковые на стационарных участках деформирования. Из общей закономерности выпали данные 8 строки, что связано с переходом процесса деформирования с ниспадающей ветви на участок остаточной прочности, с иными законами поведения предельно напряженных пород.

Сравним колонки 6 и 8, 7 и 9 таблицы 1. Очевидно, что при локализации деформации в направлении компоненты с минимальным напряжением отнесение потери несущей способности к деформациям именно этой компоненты, а не объемным деформациям образца, является достаточно информативным и удобным способом оценки связи чувствительности горных пород к разрыхлению при сложных траекториях деформирования за пределом прочности.

Представленные выше экспериментальные данные относятся к траекториям деформирования, при которых разгрузка минимальной компоненты напряжений производилась после локального ее подъема. Указанным условиям соответствует переход с предельной поверхности текущей несущей способности в неопредельное состояние с последующим возвратом на эту же или близкую к ней поверхность.

Данные о разгрузке минимальной компоненты непосредственно на ниспадающей ветви, то есть из предельного состояния, и влияние разрыхления на параметры чувствительности напряженных пород к внешним воздействиям, рассмотрим на примере испытаний мокрита № 26.

Образец мокрита № 26 испытывался при постоянном значении промежуточного напряжения  $\sigma_2 = \text{const} = 10,2$  МПа и снижении минимального главного напряжения от базового значения  $\sigma_3^B = 4,7$  МПа на ниспадающей ветви диаграммы  $\sigma_1 - \varepsilon_1$  (см. табл. 2). В таблице стационарным условиям испытаний на ниспадающей ветви соответствует первая строка, вторая - первому импульсу снижения минимальной компоненты, третья и четвертая - второму, пятая, шестая и седьмая строки - соответственно третьему импульсу снижения минимальной компоненты. Для стационарных условий на ниспадающей ветви, при постоянных величинах промежуточного и минимального главных напряжений, снижение несущей способности на % расширения по оси минимальной компоненты напряжений составляло для этого образца 8 МПа/%.

Таблица 2. Результаты испытаний образца мокрита № 26 при снижении  $\sigma_3$  непосредственно из предельного состояния

№	$\Delta\sigma_3$	$\Delta\varepsilon_3/\Delta\varepsilon_1$	$\Delta\varepsilon_2/\Delta\varepsilon_1$	$M$ , ГПа	-1 + $+\Delta\varepsilon_3/\Delta\varepsilon_1 +$ $+\Delta\varepsilon_2/\Delta\varepsilon_1$	Снижение несущей способности на процент деформации $\varepsilon_3$		Снижение несущей способности на процент объемной деформации	
						абсолютное, МПа/%	относительное	абсолютное, МПа/%	относительное
Стационарное деформирование									
1	-	1,5	0,8	1,2	1,3	8,0	9,1	9,2	10,4
Участки снижения $\sigma_3$ и разгрузки									
2	2,4	6,4	0,8	13,5	6,2	21,1	24,0	21,8	24,8
3	3,6	5,3	0,3	10,0	4,6	18,9	21,5	21,8	24,8
4	3,6	7,7	0,3	10,0	7,0	13,0	14,8	14,3	16,3
5	4,7	7,3	0	17,8	6,3	24,4	27,7	28,3	32,2
6	4,7	19,0	0	17,8	18,2	9,3	10,6	9,8	11,1
7	4,7	46,3	0	17,8	45,3	3,8	4,3	3,9	4,4

На участках снижения минимального напряжения излом траектории деформирования производится на предельной поверхности с более интенсивным, чем при стационарных внешних условиях, ее сжатием. В течение первого импульса снижения минимальной компоненты напряжений с 4,7 до 2,3 МПа, т.е. амплитудой 2,4 МПа текущая несущая способность образца снизилась на 9,6 МПа с модулем спада во время воздействия 13,5 ГПа. Для второго импульса  $\Delta\sigma_3 = 3,6$  МПа,  $\Delta\sigma_1 = 20,5$  МПа,  $M^B = 10$  ГПа. Для третьего импульса с полной разгрузкой минимального напряжения  $\Delta\sigma_3 = 4,7$  МПа,  $\Delta\sigma_1 = 34,8$  МПа,  $M^B = 17,8$  ГПа.

Снижение несущей способности образца мокрита № 26 на процент деформации расширения по оси  $\sigma_3$  во время первого импульса составило 21,1 МПа/%.

Снижение несущей способности во время второго и третьего импульсов происходило с затухающими темпами, поэтому оно представлено несколькими этапами. Соответственно во время второго импульса на первом этапе – 18,9 МПа/%, на втором – 13,0 МПа/%.

Снижение несущей способности во время третьего импульса: на первом этапе – 24,4 МПа/%, на втором – 9,3 МПа/%, на третьем, с приближением к остаточной прочности – 3,8 МПа/%.

Таким образом, при частичной или полной разгрузке минимальной компоненты напряжений на ниспадающей ветви на начальных этапах разгрузки, снижение несущей способности испытываемого образца на процент деформации разрыхления по оси минимальной компоненты напряжения приблизительно в 2,7 раза больше, чем при стационарных условиях деформирования.

Сравним анализируемые характеристики для разгрузки непосредственно с ниспадающей ветви (обр. № 26) и для разгрузки, после локального ее подъема с ниспадающей (обр. № 27).

Средние значения для образца № 26  $\Delta\sigma_1 / \Delta\varepsilon_1 = 21,5$  МПа/%, а для образца № 27 - 14,6 МПа/%.

Следовательно, монотонная подготовка разупрочнения и переход от менее активного к более активному разупрочнению закономерно сопровождается более интенсивной потерей прочности на процент разрыхления по оси  $\sigma_3$ , чем в случаях, когда ход разупрочнения предварительно прерывался локальным повышением минимальной компоненты и уходом с предельного состояния при продолжающемся продольном деформировании. Этот же вывод может быть получен при сравнении для рассматриваемых образцов величин коэффициентов поперечных деформаций по оси минимальных напряжений на участках воздействия.

Таким образом, получены экспериментальные данные о взаимосвязи текущей потери несущей способности с деформациями по оси минимального напряжения и объемными на различных участках переходных процессов при локальном снижении минимального напряжения за пределом прочности. Проведено сравнение с данными для участков ниспадающей ветви, где минимальное и промежуточное напряжения были постоянными. Установлено, что на начальных этапах снижения минимального напряжения в предельном состоянии темпы разупрочнения на единицу деформаций  $\varepsilon_3$  в 2-3 раза превышают таковые для деформирования за пределом прочности в стационарных условиях. В условиях неравно-компонентного сжатия и локальных изменений минимального напряжения за пределом прочности, получены результаты о независимости (инвариантности) от пути нагружения модуля спада и остаточной прочности для стационарных величин минимального и промежуточного напряжения. Это существенным образом расширяет область применимости выводов работы [2], которые были получены для условий осесимметричного сжатия и значительных величин бокового давления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасов, Б.Г. Влияние скорости нагружения и вида напряженного состояния на поведение горных пород в допредельной и запредельной областях // Сб. Физико-технические и технологические проблемы разработки и обогащения полезных ископаемых. – М. Ротапринт ИПКОН АН СССР, 1982. с. 111-117.
2. Зарецкий-Феокистов Г.Г., Танов Г.Н. Влияние пути нагружения на деформационные характеристики горных пород в запредельной области // Физ. техн. пробл. разраб. полезн. ископаемых, 1988. - №5. с. 7-14.
3. Алексеев А.Д., Недодаев Н.В., Стариков Г.П. Разрушение газонасыщенного угля, находящегося в объемном напряженном состоянии, при разгрузке. Моделирование выбросов угля и газа // Препринт №139. – М. Ротапринт Института проблем механики АН СССР, 1980. 32 с.
4. Алексеев А.Д., Рева В.Н., Рязанцев Н.А. Разрушение горных пород в объемном поле сжимающих напряжений // Донецкий физико-технический институт АН УССР. – Киев: Наук. думка, 1989. – 168 с.
5. Кирничанский Г.Т., Элементы теории деформирования и разрушения горных пород // Институт геотехнич. механики АН УССР. – Киев: Наук. думка, 1989. – 184 с.
6. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок // Институт геотехнич. механики АН УССР. – Киев: Наук. думка, 1989. – 192 с.
7. Булич Ю.Ю. К вопросу оценки чувствительности предельно-напряженных сред к дополнительным воздействиям с помощью силовых критериев // Управление состоянием предельно напряженных пород: Сб. науч. тр. АН Украины. – Киев: Наук. думка, 1992. – с. 127-132.

8. Wu H, Pollard D.D. Effect of strain rate on a set of fractures, Int. J. Rock Mech. Min. Ski. & Geomech. Abstr., Vol. 30, 1993. – pp. 869 -872.

9. Henry J.P., Paquet J., Tancrez J. Experimental study of crack propagation in calcite rocks, Int. J. Rock Mech. Min. ski. & Geomech. Abstr., Vol. 14, 1977. - pp. 85-91.

**УДК 622.281.74.04.001.57**

Инж. С.А. Лещинский  
(ИГТМ НАН Украины)

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АНКЕРНОЙ КРЕПИ И ПОРОДНОГО МАССИВА**

Розроблена кінцево-елементна модель взаємодії елементів анкерного кріплення із врахуванням нової інтерпретації контактної взаємодії. Проведена верифікація отриманої моделі із емпіричними даними стендових випробувань анкерної шайби. Наведена тестова модель анкерного кріплення в умовах навантаження. Отримана картина розподілу переміщень у тестовій моделі.

## **MATHEMATICAL MODEL FOR THE CALCULATION OF SYNERGY OF THE ELEMENTS OF ANCHORING AND ROCK MASS**

The finite element model of the synergy of elements of anchoring taking into account of new interpretations of the contact interaction was developed. The verification of the resulting model with empirical data of test bench of anchor shime was done. The test model of anchoring under loading was given . The resulting pattern of distribution of displacements in the test model was obtained.

Обеспечение устойчивости закрепленной анкерами горной выработки достигается оптимальным функционированием всех составляющих анкерной крепи в конкретных горно-геологических условиях.

Одним из важнейших элементов анкерной крепи является шайба, нормативные требования к которой определены в [1]. В соответствии с положениями этого документа, анкерная шайба предназначена для прижатия ограждения к поверхности выработки, нормализованной передачи предварительной и рабочей нагрузки между гайкой и горными породами, блокирования самопроизвольного развинчивания гайки, предупреждения свыше нормативного углубления анкерной гайки в шпур при эксплуатации анкерной крепи. Конструктивные элементы анкерной шайбы должны обеспечивать предупреждение ее продавливания гайкой на весь срок эксплуатации анкерного крепления выработки, восприятие рабочей нагрузки всей ее рабочей (контактирующей с горной породой) поверхностью без ее изгибания и без отклонения хвостовика анкера [1].

Однако, в процессе эксплуатации выработки с анкерной крепью, указанные требования к шайбе зачастую не обеспечиваются. Природой таких отклонений является потеря устойчивости приконтурных пород горной выработки вследствие малоизученного в настоящее время негативного влияния совокупности факторов, к которым относятся динамическая природа напряженно-деформированного состояния приконтурного массива, геометрические параметры анкерной шайбы и особенности принципов ее взаимодействия с приконтурной породой.

Поэтому актуальной является задача разработки математических моделей и методов исследования этих факторов в их совокупности с целью оптимизации