© В.Г. Хлопцов, И.В. Баклашов, В.А. Мастаков, 2007

УДК 550.3

В.Г. Хлопцов, И.В. Баклашов, В.А. Мастаков

ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД ПРОГНОЗА МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДРАБОТАННОГО ПОРОДНОГО МАССИВА

Семинар № 4

Современные численные методы решения геомеханических задач позволяют получить прогнозные оценки практически для любой, самой сложной геомеханической ситуации, возникающей в подрабатываемых породных массивах. Но, несмотря на все преимущества численного моделирования, этот метод исследований достаточно трудоемок, требует наличия соответствующего программного обеспечения и штата специалистов, способных не только эксплуатировать программный продукт, но грамотно сформулировать и поставить задачу исследований, что на уровне проектных организаций не всегда возможно. Кроме того, при численном моделировании анализируется геомеханическая ситуация в конкретных горно-геологических и горнотехнических условиях, что затрудняет получение обобщенных прогнозных оценок для других, отличных от анализируемых условий проектирования, строительства и эксплуатации подземных сооружений в условиях подработки. Очевидно, что для широкого использования в проектировании необходим достаточно простой, наглядный и доступный для инженеров-проектировщиков метод анализа возможных геомеханических ситуаций.

Если рассмотреть методические подходы к решению одной из основных задач геомеханики о деформировании земной поверхности при подработке и соответствующей инженерной задачи по проектированию зданий и сооружений на подрабатываемых территориях, такой метод анализа уже существует – это метод так называемых типовых функций, использованный при разработке целого ряда нормативных документов, например [1]. Основное идейное содержание этого метода заключается в том, что параметры сдвижения или деформирования земной поверхности в заданных точках определяются как функции безразмерных координат этих точек относительно образующейся на земной поверхности мульды сдвижения, т.е. координат, нормированных по размерам мульды в плане, и максимального оседания земной поверхности, определяемого исходя из глубины заложения выработанного пространства и его размеров в плане. В настоящей работе основная идея метода типовых функций использована для определения деформаций в подрабатываемом породном массиве и его дополнительного напряженного состояния, формирующегося при подработке.

Метод определения напряженно-деформированного состояния подрабатываемого породного массива с использованием типовых функций разработан по результатам многовариантного численного моделирования геомеханических ситуаций, возникающих при различных глубинах заложения и размерах

в плане выработанного пространства. В результате обработки данных численного моделирования методами нелинейного регрессионного анализа построены расчетные выражения для определения вертикальных и горизонтальных деформаций в массиве и соответствующих компонентов его дополнительного напряженного состояния, обусловленных подработкой.

При определении компонентов напряженно-деформированного состояния подрабатываемого породного массива принимается система координат X_1, X_2, Y, где начало координат совпадает с точкой мульды сдвижения на земной поверхности с максимальным оседанием η_{max}, X_1 и X_2 - горизонтальные координаты по главным осям мульды в направлениях соответственно наибольшего D_{max} и наименьшего D_{min} размеров выработанного пространства в плане, Y - вертикальная координата, отсчитываемая от земной поверхности, т.е. глубина расположения рассматриваемого горизонта подработки.

Горизонтальные деформации породного массива в точке рассматриваемого горизонта подработки на глубине Y с координатами в плане (X_1, X_2) определяются выражениями:

$$\varepsilon_{Y1} = \varepsilon_{Y1}(Z_{Y1}) \cdot S(Z_{Y2}) \quad ; \quad (1)$$

$$\varepsilon_{Y2} = \varepsilon_{Y2}(Z_{Y2}) \cdot S(Z_{Y1}), \quad (2)$$

где

$$\varepsilon_{Y1} = 0.05 \frac{\eta_{Y\,max}}{A_{Y\,max}} (1 - 8\frac{D_0}{H}) \frac{Y_0 - Y}{D_0} F'(Z_{Y1}); \quad (3)$$

$$\varepsilon_{Y2} = 0.05 \frac{\eta_{Y\,max}}{A_{Y\,min}} (1 - 8\frac{D_0}{H}) \frac{Y_0 - Y}{D_0} F'(Z_{Y2}); \quad (4)$$

$$\eta_{Y\,max} = \eta_{max} + (u_{max} - \eta_{max}) \cdot (\frac{Y}{H})^n ; \quad (5)$$

u_{max} - максимальные вертикальные смещения кровли выработанного пространства на глубине H ;

$$n = 10 \cdot (1 - \exp(-0.1 \cdot \frac{H}{D_0})); \quad (6)$$

$$D_0 = \sqrt{D_{max} \cdot D_{min}} ; \quad (7)$$

$$A_{Y\,max} = D_{max}(1.4 + \frac{0.5}{D_0/H}) + (H - Y)ctg60^\circ ; \quad (8)$$

$$A_{Y\,min} = D_{min}(1.4 + \frac{0.5}{D_0/H}) + (H - Y)ctg60^\circ ; \quad (9)$$

$$Y_0 = 0.5H \cdot (1 + \exp(-0.75 \frac{D_0}{H})); \quad (10)$$

$Z_{Y1} = \frac{X_1}{A_{Y\,max}}$, $Z_{Y2} = \frac{X_2}{A_{Y\,min}}$ - безразмерные горизонтальные координаты на глубине Y рассматриваемого горизонта подработки; $S(Z_{Y1})$, $S(Z_{Y2})$, $F'(Z_{Y1})$ и $F'(Z_{Y2})$ - типовые функции безразмерных координат Z_{Y1} и Z_{Y2}, численные значения которых приведены в таблице.

Вертикальные деформации породного массива в точке рассматриваемого горизонта подработки на глубине Y с координатами в плане (X_1, X_2)определяются выражением:

$$\varepsilon_{Y3} = n \frac{\eta_{Y\,max} - \eta_{max}}{Y} S(Z_{Y1}) \cdot S(Z_{Y2}) +$$

$$+ \eta_{Y\,max} S(Z_{Y2}) \cdot S'(Z_{Y1}) \frac{Z_{Y1}}{A_{Y\,max}} ctg60^\circ +$$

Значения типовых функций $S(Z)$ *и* $F'(Z)$

Z	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$S(Z)$	1.00	0.94	0.80	0.63	0.46	0.30	0.17	0.07	0.02	0.003	0.00
$S'(Z)$	0.00	-1.06	-1.56	-1.76	-1.71	-1.48	-1.12	-0.71	-0.34	-0.08	0.00
$F'(Z)$	7.8	3.8	1.9	0.4	-0.8	-1.7	-2.2	-2.3	-1.9	-1.0	0.0

$$+\eta_{Y\max} S(Z_{Y1})\cdot S'(Z_{Y2})\frac{Z_{Y2}}{A_{Y\min}} ctg60^{\circ}, \quad (11)$$

где $S'(Z_{Y1})$ и $S'(Z_{Y2})$- типовые функции безразмерных координат Z_{Y1} и Z_{Y2}, численные значения которых приведены в таблице.

Компоненты дополнительных напряжений в направлениях осей X_1, X_2 и Y в точке подрабатываемого породного массива с координатами (X_1, X_2, Y) могут быть определены по известным формулам обобщенного закона Гука после определения компонентов деформированного состояния:

$$\sigma_{Y1} = 2G\varepsilon_{Y1} + \lambda^{*}\theta;$$

$$\sigma_{Y2} = 2G\varepsilon_{Y2} + \lambda^{*}\theta; \quad (12)$$

$$\sigma_{Y3} = 2G\varepsilon_{Y3} + \lambda^{*}\theta,$$

где $G = \dfrac{E}{2(1+\mu)}$; $\lambda^{*} = \dfrac{2\mu G}{(1-2\mu)}$; E и μ - соответственно модуль деформации и коэффициент Пуассона подрабатываемого породного массива; $\theta_Y = \varepsilon_{Y1} + \varepsilon_{Y2} + \varepsilon_{Y3}$ - объемная деформация в рассматриваемой точке.

Проиллюстрируем изложенный выше метод оценки напряженно-деформированного состояния подрабатываемого породного массива результатами расчетов для условий разработки нефтяного пласта-коллектора, залегающего на глубине H = =4000 м, приняв эллиптическую форму Контура выработанного пространства (кон-тура водонефтяного контакта) с размерами в плане $D_{\max}$ = 8000 м и $D_{\min}$ = 5000 м и задавшись величиной максимального смещения кровли пласта-коллектора $u_{\max}$ = 1 м. Кроме того, примем для определенности деформационные характеристики перекрывающих пород равными E = 2·104 МПа и μ = 0.3.

На рис. 1 и 2 приведены расчетные распределения величин вертикальных σ_{Y3} и горизонтальных σ_{Y1} и σ_{Y2} напряжений в вертикальных сечениях подрабатываемого массива, проходящих через главные оси мульды сдвижения X_1 и X_2, совпадающие соответственно с максимальным и минимальным размерами выработанного пространства. При расчетах принято следующее правило знаков, учтенное в приведенных выше расчетных выражениях: вертикальные смещения в направлении выработанного пространства приняты положительными, а в направлении земной поверхности – отрицательными; деформации растяжения и растягивающие напряжения – положительными; деформации сжатии и сжимающие напряжения – отрицательными.

Анализ представленных на рисунках распределений позволяет сделать следующие выводы.

В центральной нижней части породного массива формируется область всестороннего растяжения с максимальным уровнем напряженного состояния вблизи кровли выработанного

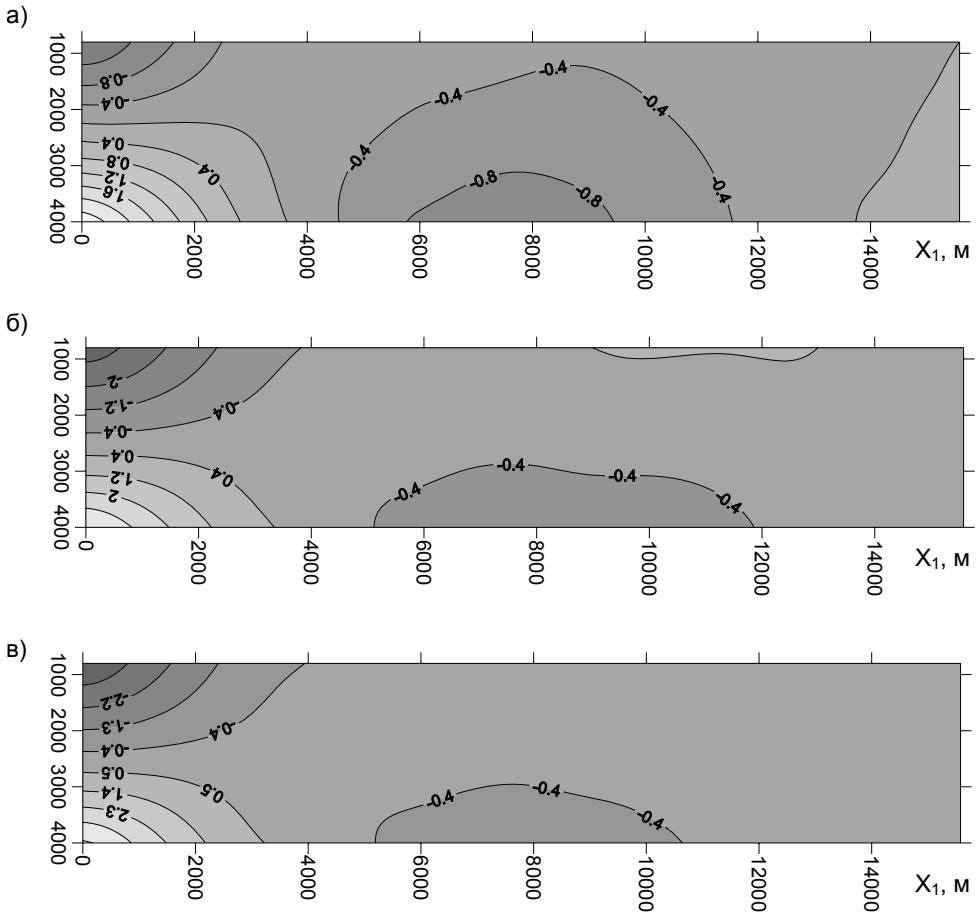

Рис. 1. Распределения вертикальных σ_{Y3} ***(а), горизонтальных радиальных*** σ_{Y1} ***(б) и горизонтальных тангенциальных*** σ_{Y2} ***(б) напряжений в подрабатываемом массиве в его вертикальном сечении, проходящем через главную ось*** X_1 ***(МПа)***

пространства, т.е. область разгрузки с разуплотнением перекрывающих пород.

Область всестороннего сжатия с переуплотнением перекрывающих пород оконтуривает область разгрузки. При этом максимальный уровень сжимающих напряжений достигается в центральной части подрабатываемого массива вблизи земной поверхности.

В верхних краевых частях подрабатываемого массива формируется область растягивающих горизонтальных напряжений.

В вертикальных сечениях подрабатываемого массива, ориентированных в направлении минимального размера выработанного пространства в плане, дополнительные напряжения больше по абсолютной величине, чем в сечениях, ориентированных в направлении макси-

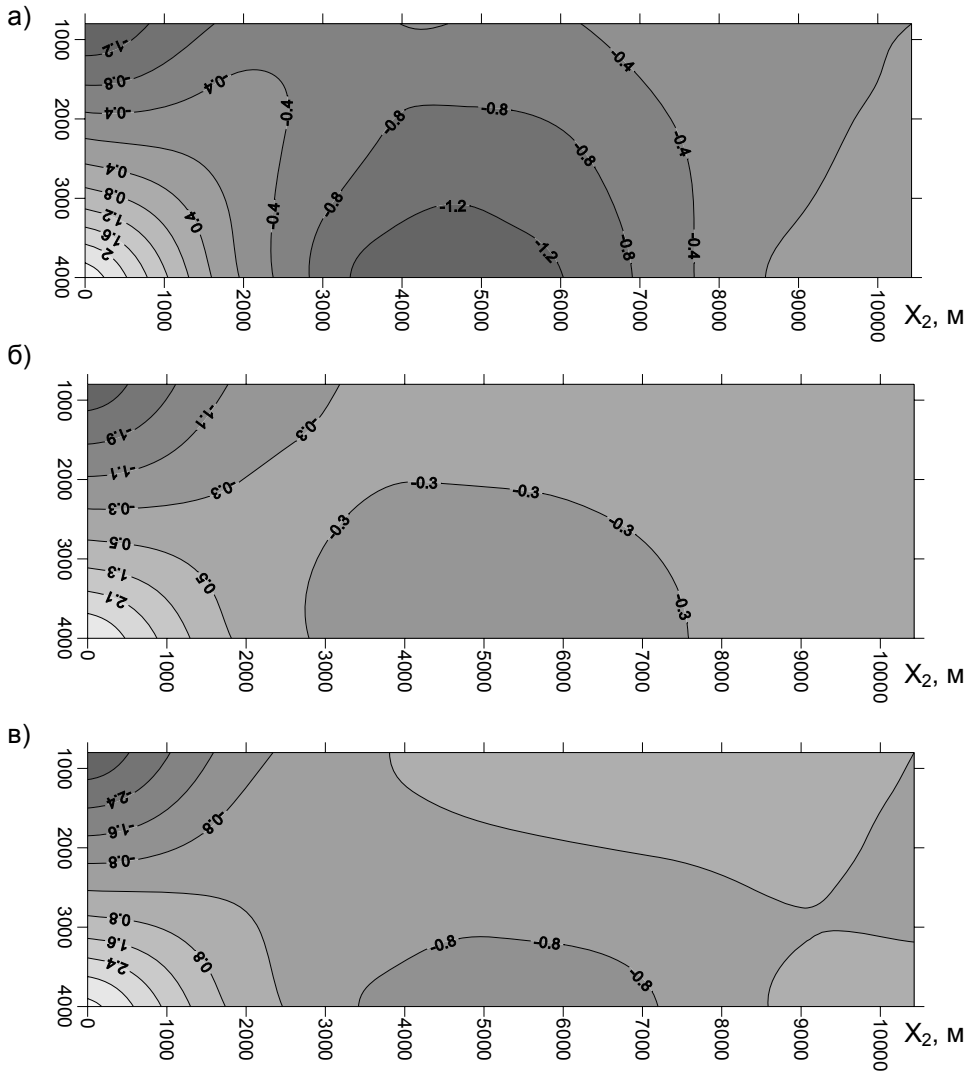

Рис. 2. Распределения вертикальных σ_{Y3} (а), горизонтальных радиальных σ_{Y2} (б) и горизонтальных тангенциальных σ_{Y1} (б) напряжений в подрабатываемом массиве в его вертикальном сечении, проходящем через главную ось X_2 (МПа)

мального размера выработанного пространства.

Сформулированные по результатам расчетов выводы о закономерностях формирования в подрабатываемом породном массиве дополнительного поля напряжений согласуются с закономерностями распределения характерных зон влияния горных работ на механическое состояние перекрывающего массива, установленными другими авторами и приведенными,

например, в работах [2, 3], что свидетельствует об обоснованности предложенного в настоящей работе метода оценки изменения напряженно-деформированного состояния массива при его подработке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Правила* охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. - М.: Недра, 1981.

2. *Кратч Г.* Сдвижение горных пород и защита подрабатываемых сооружений. Пер. с немецкого. - М.: Недра, 1978. - 494 с.

3. *Петухов И.М., Линьков А.М. и др.* Защитные пласты. – Л.: Недра, 1972. - 424 с. ГИАБ

Коротко об авторах

Хлопцов Валерий Геннадьевич – доцент,
Баклашов Игорь Владимирович – профессор,
Мастаков Владимир Аркадьевич – соискатель,

кафедра «Физика горных пород и процессов», Московский государственный горный университет.

ДИССЕРТАЦИИ

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА «ГЕОФИЗИКА»			
ХУЗИНА Лилия Булатовна	Повышение эффективности бурения наклонных и горизонтальных скважин с использованием комплекса виброусилителей	25.00.15	д.т.н.
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ПО БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТ В УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ВостНИИ			
ШИРЯЕВ Валерий Анатольевич	Совершенствование системы производственного контроля на угольных предприятиях Кузбасса	05.26.03	к.т.н.