УДК 624.042

В.В.КАРПЕНКО, А.В.КАРПЕНКО
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ ГОРНЫХ УДАРОВ НА ВЫРАБОТКИ

Рассматривается совместное воздействие статического и динамического полей напряжений на выработку. Исследование таких воздействий на горную выработку основывается на сформулированных ранее методических принципах математического моделирования физических процессов в сложных системах.

The combined effect of the static and dynamic stress field on the working is considered. The research of such effects on the working is bused on the previously formulated methodical principles of mathematical simulation of the physical process in compound systems.

Математическое моделирование совместного воздействия на горную выработку горного давления и сейсмических волн, генерируемых горным ударом, основывается на следующих положениях [1]. Горная порода вокруг выработки является идеально упругой средой, боковая поверхность выработки аппроксимируется цилиндрической поверхностью произвольного поперечного сечения, сейсмическая волна принимается плоской упругой продольной волной, фронт которой параллелен продольной оси выработки, а нормаль к фронту составляет угол α с отрицательным направлением оси *Oy*. После момента соприкосновения волны напряжений с контуром выработки изменение параметров, характеризующих эпюру волны, в расчетах не учитывается. Будем придерживаться классификации горных ударов, данной в статье [4]. Дополнительно примем гипотезу, в соответствии с которой горные удары можно рассматривать как слабые землетрясения, форму эпюр которых можно принять в виде, предложенном в [2], а параметры считать зависящими от энергетического класса явления (горного удара) lg*E*, где энергия *E* измеряется в джоулях.

Предполагая в дальнейшем рассматривать только воздействия продольных сейсмических волн на выработки, касательную $\sigma_{nt}^{(0)}$ компоненту тензора напряжений в возмущенной области за фронтом волны примем равной нулю, а компоненты нормальной $\sigma_{nn}^{(0)}$ и тангенциальной $\sigma_{tt}^{(0)}$ составляющих тензора напряжений считаем заданными.

Для описания характерных особенностей напряженного состояния породы вокруг выработки, находящейся под действием статических и динамических воздействий, воспользуемся моделью плоского деформированного состояния массива. Особенности такого состояния могут быть определены в результате решения двух плоских задач теории упругости. Первая из них – статическая и состоит в определении напряженно-деформируемого состояния (НДС) невесомого массива с цилиндрической полостью, нагруженного на бесконечности равномерными нормальными напряжениями, действующими в плоскости поперечного сечения выработки. Вторая задача – динамическая и заключается в определении НДС массива с цилиндрической полостью при воздействии на нее плоской продольной волны, фронт которой параллелен образующей выработки.

При отсутствии нарушения сплошности и выполнении условия совместности деформаций статическая задача об определении напряженного состояния среды состоит в интегрировании системы уравнений равновесия [3], дополненных граничными условиями отсутствия напряжений на контуре поперечного сечения полости и заданными значениями напряжений на бесконечности.

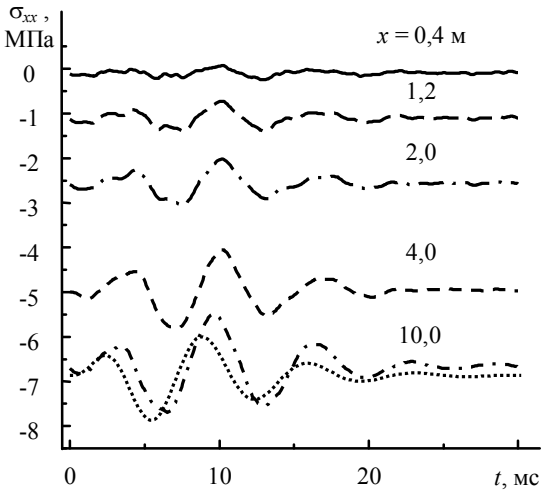


Рис.1. Эпюры прямой волны и суммарных напряжений σ_{xx} для lg$E$ = 4 на различных расстояниях от контура выработки

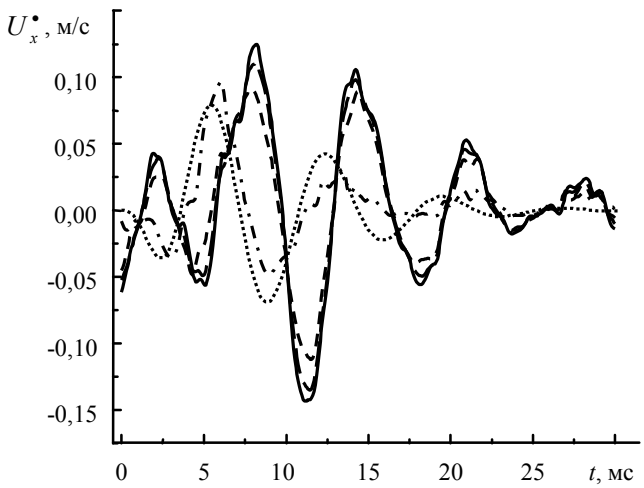


Рис.2. Эпюры массовых скоростей упругой среды для lg$E$ = 4 на различных расстояниях от контура выработки (условные обозначения см. на рис.1)

Динамическая задача об определении НДС массива с цилиндрической полостью состоит в определении компонент динамического тензора напряжений $\sigma_{xx}^{(1)}$, $\sigma_{yy}^{(1)}$ и $\sigma_{xy}^{(1)}$ отраженных и дифракционных волн, которые формируются в массиве в результате натекания плоской волны на выработку. Компоненты тензора $\sigma_{xx}^{(1)}$, $\sigma_{yy}^{(1)}$, $\sigma_{xy}^{(1)}$ напряжений удовлетворяют условиям динамического равновесия [3]. На контуре поперечного сечения полости нормальная и касательная компоненты суммарного тензора напряжений равны нулю, а на бесконечности при $\sqrt{x^2+y^2} \to \infty$ компоненты тензора отраженных и дифракционных волн стремятся к нулю. Начальные условия для этих компонент и параметров движения среды в невозмущенной области примем нулевыми.

Компоненты тензора напряжений отраженной и дифракционной волн связаны с компонентами тензора плоской деформации законом Гука [3].

Алгоритм численного решения упругой динамической задачи основан на ее редукции к конечно-разностному аналогу в декартовых координатах, основанному на методе крупных частиц. В настоящей статье для решения статической задачи предложен подход, основанный на переходе от статической задачи к динамической и определении предела компонент тензора динамических напряжений при $t \to \infty$. В таком случае для решения статической и динамической плоских задач теории упругости можно использовать единый алгоритм.

Расчеты напряженного состояния пород вокруг расположенной на глубине 250-750 м выработки с прямоугольной формой поперечного сечения шириной 4,2 м и высотой 3,8 м с закругленными углами (радиус закругления 0,5 м) выполнялись для горных ударов энергетических классов 10 и 100 кДж. За вмещающую породу принимался гранит с плотностью 2800 кг/м^3, скоростью продольных волн 4500 м/с и коэффициентом Пуассона 0,22. Эпюры суммарной статической и динамической компоненты тензора напряжений σ_{xx}, рассчитанные в точках оси симметрии Ox на расстояниях x, равных 0,4; 1,2; 2,0; 4,0 и 10,0 м от контура выработки (сейсмическая волна от горного удара с энергией 10 кДж распространяется вдоль оси Ox и имеет амплитуду 1 МПа) изображены на рис.1. Точками там же для сравнения изображена эпюра прямой волны с учетом действующего горного давления. Как следует из результатов расчета, для lg$E$ = 4 на расстоянии 10,0 м от контура влияние выработки на эпюру напряжений с ней взаимодействующей прямой волны практически несущественно.

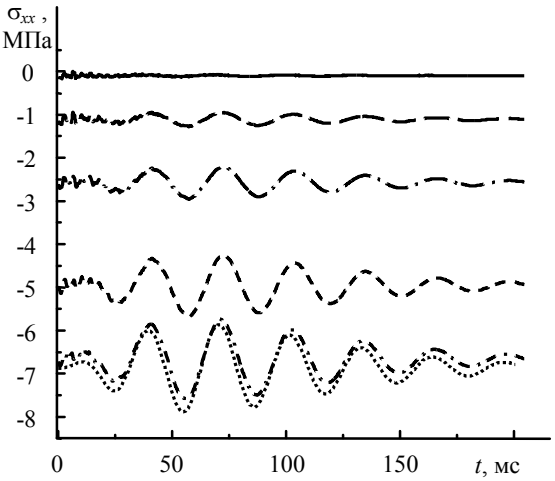


Рис.3. Эпюры прямой волны и суммарных напряжений σ_{xx} для lg$E$ = 5 на различных расстояниях от контура выработки (условные обозначения см. на рис.1)

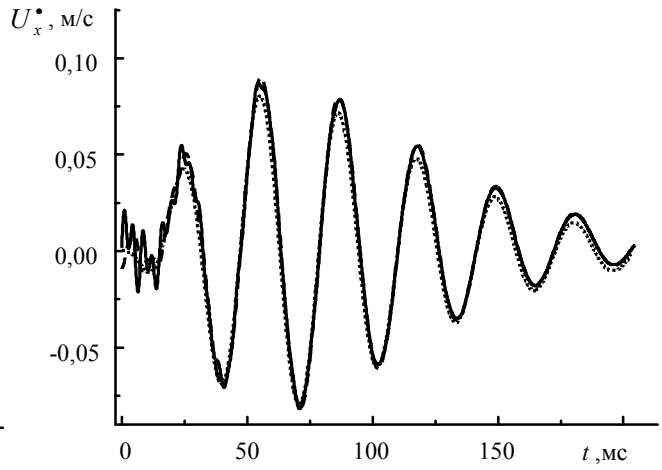


Рис.4. Эпюры массовых скоростей упругой среды для lg$E$ = 5 на различных расстояниях от контура выработки

Более существенно влияние выработки в приконтурной области на эпюры массовых скоростей (рис.2, на котором точками изображена эпюра массовых скоростей в прямой волне). Массовые ускорения в прямой волне по абсолютной величине не превышают 70 м/с^2 и меньше пиковых значений аналогичных ускорений в отраженных и дифракционных волнах примерно в 2,5 раза.

Аналогичные расчеты были выполнены для lg$E$ = 5 (рис.3 и 4). Точками изображена эпюра прямой волны горного удара с амплитудой 1 МПа при учете действующего горного давления. С увеличением энергетического класса динамического явления возрастают как его длительность, так и период колебания, что сопровождается снижением влияния дифракционных процессов на поля массовых ускорений, скоростей и напряженное состояние массива в приконтурной области.

Расчетами установлено, что массовые ускорения в прямой волне для горного удара с lg$E$ = 5 по абсолютной величине не превышают 20 м/с^2 и меньше пиковых значений аналогичных ускорений в отраженных и дифракционных волнах примерно в 2-4 раза.

Таким образом, в статье разработан универсальный алгоритм решения статических и динамических задач плоской теории упругости и с его помощью проанализировано совместное действие горного давления и горных ударов с энергией 10 и 100 кДж. В результате расчетов установлено, что увеличение энергетического класса горного удара при одновременном сохранении амплитуды прямой продольной волны сопровождается уменьшением влияния дифракционных процессов на суммарные компоненты тензора напряжений, компоненты вектора массовых скоростей и ускорений упругой среды в приконтурном массиве горной выработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бестужева А.Н.* Методические принципы математического моделирования физических процессов в сложных системах / А.Н.Бестужева, В.В.Карпенко, Г.А.Колтон // Новые технологии в образовательном процессе. 1998. № 5. С.95-100.

2. Динамические характеристики сейсмических волн в реальных средах / И.С.Берзон, А.М.Епинатьева, Г.Н.Парийская и др. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 576 с.

3. *Новожилов В.В.* Теория упругости. Л.: Судпромгиз, 1958. 372 с.

4. *Шемякин Е.И.* К вопросу о классификации горных ударов / Е.И.Шемякин, М.В.Курленя, Г.И.Кулаков // ФТПРПИ. 1986. № 5. С.3-11.