

УДК 622.832

В.М. Серяков, А.В. Серяков, В.А. Штирц

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ
ПОРОДНОГО МАССИВА ПРИ ОТБОЙКЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ БЛОКОВ НА ГЛУБОКИХ
ГОРИЗОНТАХ ТАШТАГОЛЬСКОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ***

Семинар № 4

Данные инструментальных наблюдений, относящиеся к величинам энергетических, геометрических и временных параметров динамических явлений в шахтных полях после осуществления массовых взрывов на рудных месторождениях, показывают, что от 50 до 75 % их количества приходится на зоны контакта разномодульных горных пород и районы расположения тектонических нарушений [1]. Мощное взрывное воздействие на массив горных пород приводит к его деформированию, трансляционному и вращательному движению составляющих массив блоков. После взрывная реакция горных пород на динамическое воздействие проявляется в процессе их сравнительно медленного — квазистатического, деформирования: от эпицентра взрыва начинает распространяться фронт деформационной волны, инициирующий динамические явления [2]. В [3] для Таштагольского железорудного месторождения в предположении однородности массива горных пород на основе теории временного накопления повреждений была выполнена оценка скорости распространения и получена конфигурация фронта деформа-

ционной волны в зависимости от времени, прошедшего с момента обрушения блока.

Однако пространственно-временной анализ распределения динамических явлений в шахтном поле месторождения говорит о существенном влиянии на его характер особенностей строения породного массива. Так, оценка относительной скорости распространения динамических явлений и их энергетического класса в различных геологических структурах показала, что наибольшие значения этих параметров достигаются в областях расположения тектонических напряжений, даек, контактов руд и пород. Это говорит о необходимости учета неоднородности массива горных пород при теоретических и практических исследованиях геодинамического состояния районов отработки удароопасных рудных месторождений.

В данной работе выполнено теоретическое моделирование геомеханического состояния породного массива для условий отбойки блока № 13 в этаже -210 ÷ -280 м Восточного участка Таштагольского месторождения (рис. 1). Процесс перераспределения напряжений и обра-

* Работа выполнена при поддержке молодежного гранта им. академика М.А. Лаврентьева СО РАН

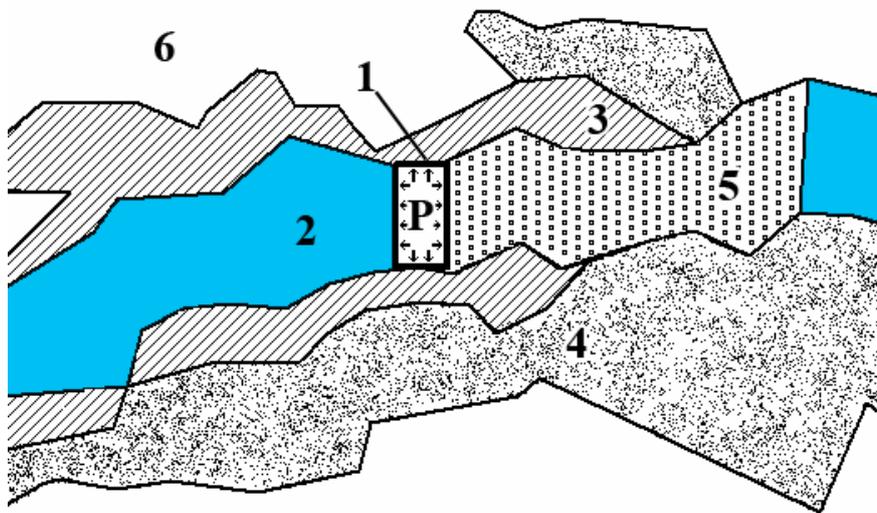


Рис. 1. План горизонта -210 м в районе отработки блока № 13 Восточного участка Таишагольского месторождения: 1 — Контур блока; 2 — Рудное тело; 3 — Скарны; 4 — Сиениты; 5 — Обрушенные породы; 6 — Сланцы

зования областей разрушения в неоднородной горной среде инициировался путем задания нагрузки на границах взрываваемого блока. Особенности протекания волновых процессов в упругой среде при воздействии интенсивных импульсных нагрузок были определены численно с помощью явной разностной схемы Уилкинса [4, 5]. Для построения замкнутой модели выписаны разностные аналоги основных законов сохранения, дополненные уравнениями связи напряжений и деформаций. Поскольку этап, в котором проводилась отработка блока, имеет достаточно большую высоту, то задача рассмотрена в двумерной постановке в условиях плоской деформации, при этом плоскость XU считается горизонтальной проходящей через центр блока. Поведение материалов предполагается упругое, используется лагранжево описание движения сплошной среды. Расчетная область покрывается равномерной треугольной разностной сеткой,

компоненты векторов перемещений и скорости определяются в узлах сетки, компоненты тензоров напряжений и скоростей деформации относятся к ячейкам и считаются постоянными внутри треугольников. Определение вектора скорости перемещения точек (u, v) осуществлялось с помощью интегральных уравнений движения

$$\dot{u} \iint_S \rho ds = \oint_L (\sigma_{xx} dy - \sigma_{xy} dx) dl$$

$$\dot{v} \iint_S \rho ds = \oint_L (\sigma_{xy} dy - \sigma_{yy} dx) dl$$

записанных для дискретного контура L , проходящего по всем ячейкам, включающим узел i (рис. 2).

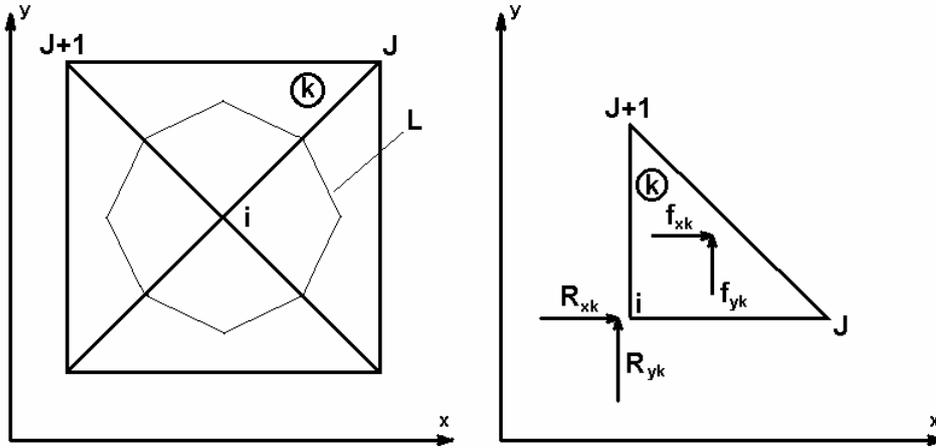


Рис. 2. Контур интегрирования для определения скоростей узла i и разложение узловых сил на внутренние f и внешние R

В результате интегрирования получены конечно-разностные уравнения для определения ускорений:

$$\dot{u}_i = \sum_k \left[\sigma_{xx}(y_{j+1} - y_j) - \sigma_{xy}(x_{j+1} - x_j) \right] / 2\varphi_i$$

$$\dot{v}_i = \sum_k \left[\sigma_{xy}(y_{j+1} - y_j) - \sigma_{yy}(x_{j+1} - x_j) \right] / 2\varphi_i$$

где $\varphi_i = \sum_k \frac{m_k}{3}$ — приведенная масса i -го узла, m_k — масса k -ой ячейки.

С учетом того, что на граничный узел могут действовать внешние силы, это уравнение можно записать в виде:

$$\dot{u}_i = \left[\sum_k F_{xi}^k + \sum_k R_{xi}^k \right] / 2\varphi_i$$

$$\dot{v}_i = \left[\sum_k F_{yi}^k + \sum_k R_{yi}^k \right] / 2\varphi_i$$

где F_{xi} , F_{yi} — компоненты вектора сил, действующих на узел i ячейки за счет внутренних напряжений, R_{xi} , R_{yi} — компоненты вектора внешних сил, причем

$$R_{xi} = \sum_k R_{xi}^k = 0, \quad R_{yi} = \sum_k R_{yi}^k = 0 \quad \text{для}$$

внутренних узлов i ,

$R_{xi} = 2\psi_{xi} ds_i$, $R_{yi} = 2\psi_{yi} ds_i$ для граничных узлов, ψ_x, ψ_y — плотности внешних сил, ds_i — длина контура интегрирования вдоль границы расчетной области для данного граничного узла (рис. 3).

Тензор напряжений представлен в виде:

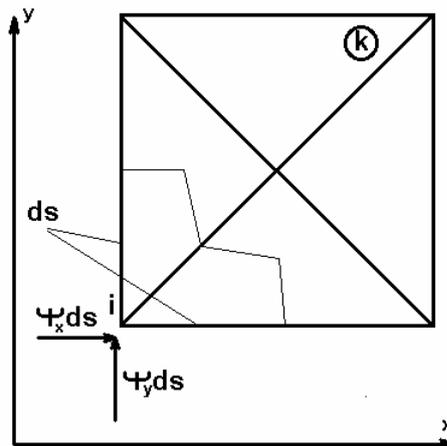


Рис. 3. Контур интегрирования при нагружении тела внешними силами

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & 0 \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P & & \\ & -P & \\ & & -P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s_{xx} & s_{xy} & 0 \\ s_{xy} & s_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & s_{zz} \end{bmatrix}$$

ензор скоростей деформации:

$$d = \begin{bmatrix} d_{xx} & d_{xy} & 0 \\ d_{xy} & d_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d & & \\ & d & \\ & & d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d'_{xx} & d'_{xy} & 0 \\ d'_{xy} & d'_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & d'_{zz} \end{bmatrix}$$

где $d_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}$, $d_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$,

$$d_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad d = \frac{1}{3} (d_{xx} + d_{yy})$$

Для определения шаровой части тензора напряжений используется уравнение состояния $P = K \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right)$, где K —

модуль объемного сжатия, ρ_0 , ρ — начальная плотность и плотность на шаге n . Частные производные функции F ($F=u$ или $F=v$) по пространственным переменным находятся с помощью формулы Гаусса-Остроградского

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} = \lim_{V \rightarrow 0} \left(\frac{1}{V} \iint_S F(\vec{n} \cdot \vec{i}) ds \right),$$

для контура треугольной ячейки с вершинами (x_i, y_i) и значениями в них функции F_i :

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{[(F_1 + F_2)(y_2 - y_1) + (F_2 + F_3)(y_3 - y_2) + (F_1 + F_3)(y_1 - y_3)]}{2S}$$

$$\frac{\partial F}{\partial y} = - \frac{[(F_1 + F_2)(x_2 - x_1) + (F_2 + F_3)(x_3 - x_2) + (F_1 + F_3)(x_1 - x_3)]}{2S}$$

Здесь S — площадь ячейки, $S = 0.5[x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2)]$

Плотность ρ на шаге n определялась из закона сохранения массы

$$\rho_0 V_0 = \rho V$$

где ρ_0, V_0 — начальная плотность и объем, V — объем на шаге n .

Девидоры тензора напряжений и тензора скоростей деформации связаны законом Гука:

$$\dot{s}_{xx} = 2Gd'_{xx}, \quad \dot{s}_{xy} = 2Gd'_{xy}, \quad \dot{s}_{yy} = 2Gd'_{yy},$$

$$\dot{s}_{zz} = 2Gd'_{zz}.$$

В этих формулах G — модуль сдвига, $d'_{ij} = d_{ij} - \delta_{ij}d$ — компоненты девидора тензора скоростей деформации.

Расчеты проводились по явной разностной схеме, путем перехода от известного деформированного состояния в момент времени t^n к состоянию в момент времени t^{n+1} до получения полной картины движения на заданном интервале по времени. Шаг по времени выбирался из условия Куранта для явной разностной схемы [5].

На основе обработки геологических карт горизонта -210 м была получена информация о расположении контуров горных пород, составляющих массив. Данные вводились в компьютер, затем с помощью специальной программы в расчетной области отстраивались контуры рудных тел и вмещающих пород, и в ячейках сетки задавались соответствующие физико-механические свойства (таблица).

Таблица физических и прочностных свойств горных пород [6]

Горная порода	Плотность ρ_o , кг/м ³	Модуль Юнга E, $\cdot 10^{-4}$ МПа	Коэффициент Пуассона ν	Скорость звука а, м/с
Магнетитовая руда	3500	6.0	0.25	4140
Скарны	3380	6.7	0.19	4452
Сиениты	2600	3.5	0.16	3668
Сланцы	2600	2.0	0.14	2773
Обрушенные породы	3500	0.6	0.25	1309

Взрыв блока моделировался заданием на его контуре нормального давления, изменяющегося со временем по экспоненциальному закону:

$$P_n = P_o \exp(-kt),$$

где $k=70$, $P_o=170$ МПа [7].

В соответствии с теорией размерностей [8] для удобства ввода, хранения и обработки информации, характеризующей напряженно-деформированное состояние среды в различные моменты времени был осуществлен переход от единиц системы СИ к эквивалентной системе единиц. Перевод базовых физических параметров (длина, время, масса) из одной системы в другую осуществлялся с помощью коэффициентов пересчета α , β и γ :

$$L = \alpha L', \quad T = \beta T', \quad M = \gamma M'$$

где L, T и M — единицы длины, времени и массы в системе СИ, L' , T' , M' — единицы длины, времени и массы в новой системе. В численных расчетах взрыва технологического блока значение пространственного коэффициента α было выбрано равным 200, то есть единица длины в новой системе соответствовала 200 метрам. Временной коэффициент β принят равным 100, то есть единица времени в новой системе равна 100 секундам. Значение коэффици-

ента γ было подобрано таким образом, чтобы единица давления в новой системе соответствовала 1 МПа. При указанных значениях α и β $\gamma = 2 \cdot 10^{12}$. Производные физические величины могут быть выражены через коэффициенты α , β и γ следующим образом:

$$v = \frac{\alpha}{\beta} v', \quad P = \frac{\gamma}{\alpha \beta^2} P', \quad \rho = \frac{\gamma}{\alpha^3} \rho',$$

$$F = \frac{\alpha \gamma}{\beta^2} F', \quad A = \frac{\alpha^2 \gamma}{\beta^2} A',$$

где v — скорость, P — давление, ρ — плотность, F — сила, A — работа.

На рис. 4, 5 приведены изолинии нормальных компонент тензора напряжений σ_{xx} и σ_{yy} для двух различных значений времени 0.037 и 0.056 с. Неоднородность строения массива предопределяет сложную картину распределения волновых полей. Из-за различия скоростей распространения продольных и поперечных волн в разных породах фронт движения волн сжатия имеет криволинейную конфигурацию. Наиболее быстро волновое возмущение распространяется в рудном теле (компонента σ_{xx}), медленнее всего — в обрушенных породах. Вследствие этого волновой фронт как бы обходит зону обрушенных пород по вмещающему массиву — скарнам и сиенитам.

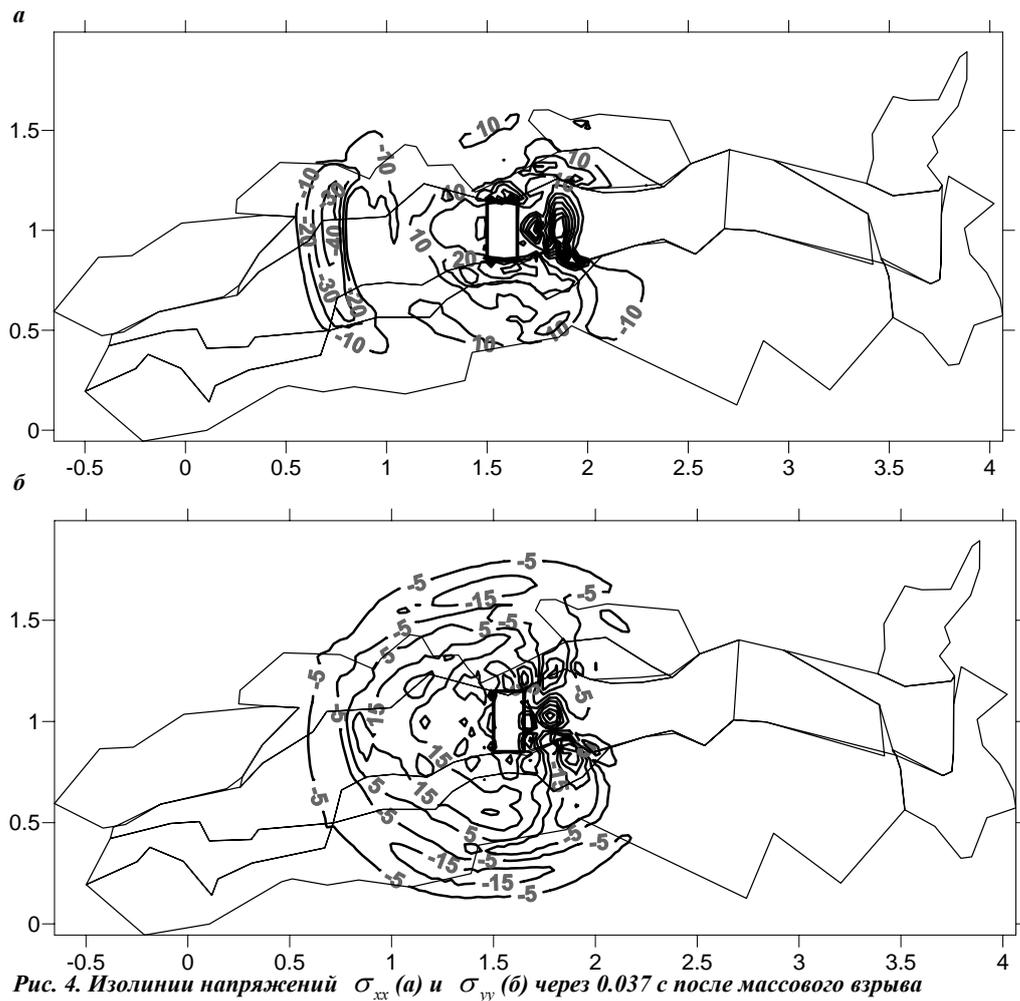


Рис. 4. Изолинии напряжений σ_{xx} (а) и σ_{yy} (б) через 0.037 с после массового взрыва

За волной сжатия формируются области действия растягивающих напряжений, причиной которых является кратковременность протекания процесса взрыва, дифракция и отражение волн напряжений от границ контакта разномодульных горных пород.

С течением времени абсолютные значения всех напряжений падают, подчиняясь общей закономерности уменьшения энергии взрыва, приходящейся на

единицу площади, по мере удаления от места приложения взрывной нагрузки.

Интегрально оценить особенности перераспределения и изменения областей растягивающих напряжений позволяет временной критерий разрушения [9]. Временной интеграл повреждаемости

$$F = \int_0^t \frac{dt}{\tau(\sigma(t))}, \quad \text{где}$$

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{KT}\right), \quad \sigma \text{ — главное}$$

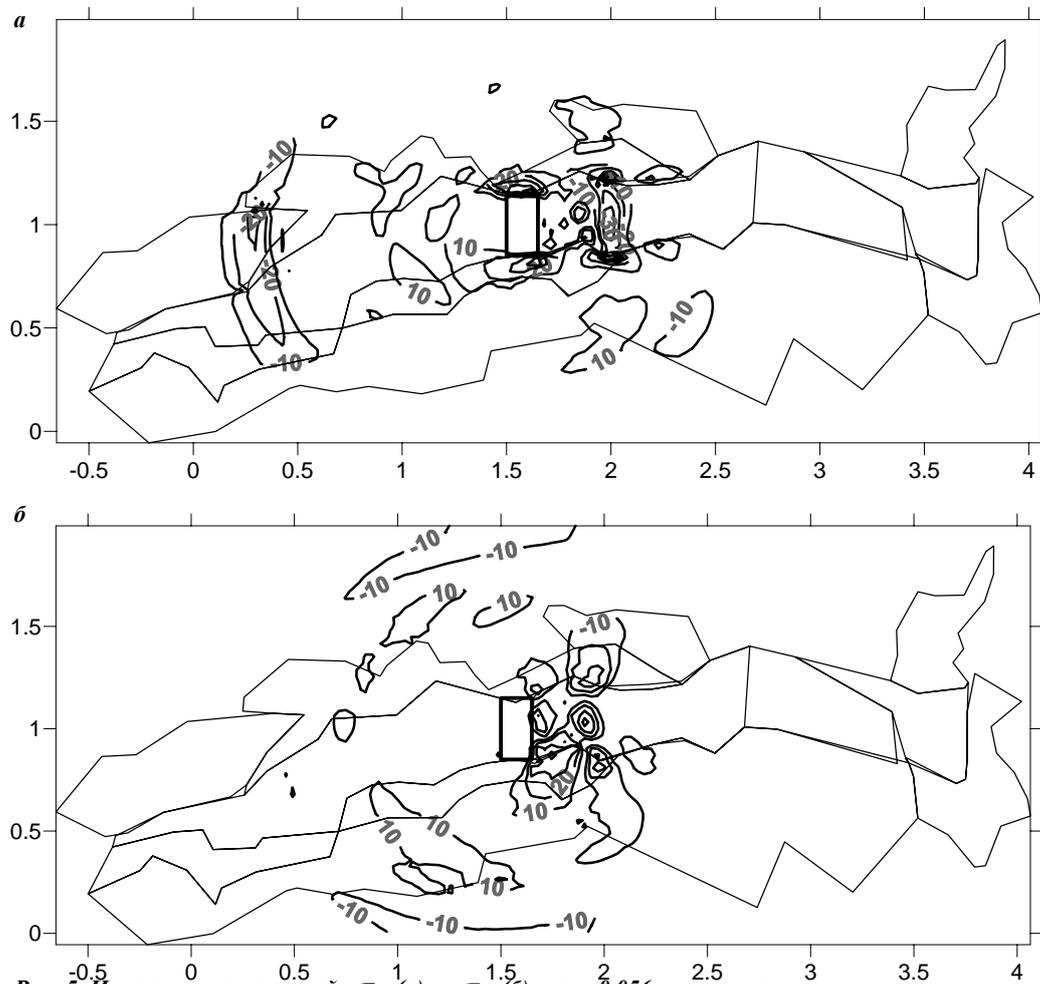


Рис. 5. Изолинии напряжений σ_{xx} (а) и σ_{yy} (б) через 0.056 с после массового взрыва

максимальное растягивающее напряжение, в рамках дискретной разностной схемы приобретает вид:

$$F = \sum \frac{dt^n}{\tau^n}, \text{ где } n \text{ — номер шага по времени.}$$

Значение констант U_o , γ и τ_o были выбраны следующими: $\tau_o = 8,1 \cdot 10^{-14} \text{ с}$, $U_o = 1,578 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, $\gamma = 2,3 \cdot 10^{-27} \text{ м}^3$ [10]. На рис. 6 для различных моментов времени при-

ведены контуры областей, в которых интеграл повреждаемости принимает единичное значение. Рис. 6, а-г. соответствуют времена 0.018 с, 0.056 с, 0.11 с и 3.7 с. Развитие зон нарушенности массива в сторону фронта ведения очистных работ в целом происходит так же, как и в однородном массиве. В направлении же обрушенных пород развитие зон повреждаемости происходит по вмещающим породам и контактам

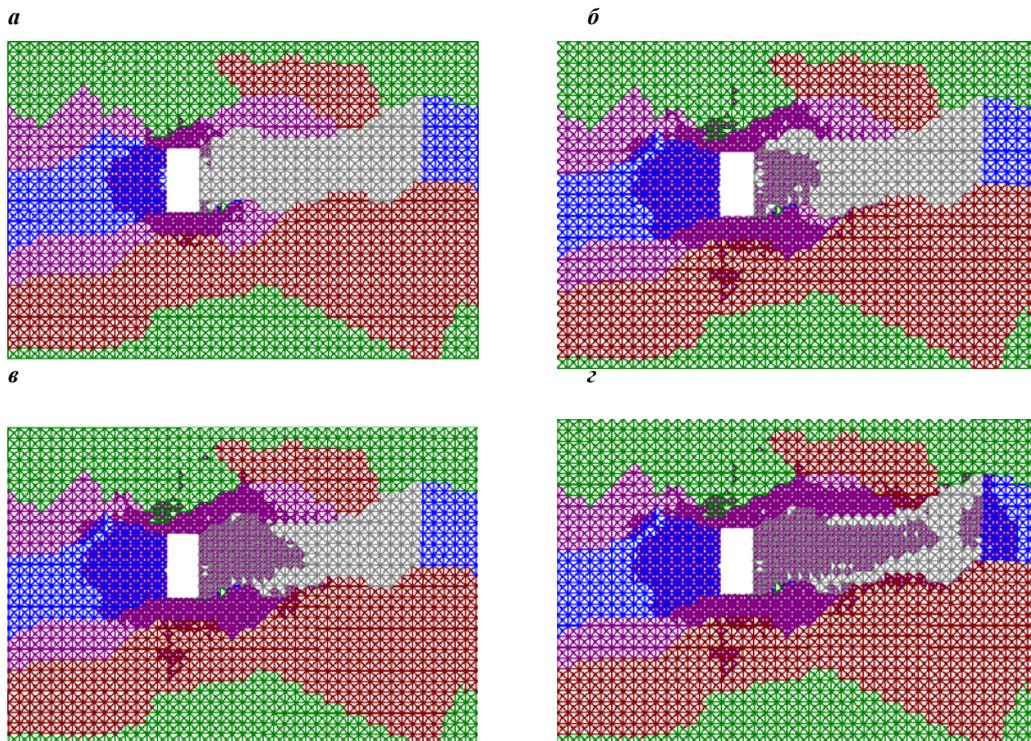


Рис. 6. Развитие зон подготовки массива к разрушению после взрыва с течением времени

разнородных пород, а лишь затем вновь отмечается в рудном теле.

Следует отметить незначительное расстояние распространения зон подготовки массива к разрушению во вмещающие породы в окрестности торцов рудного блока, а также примерно равную площадь этих зон с правой и левой стороны от обрушенного блока.

На основе оценки значений констант, входящих в выражение для определения скорости распространения деформационной волны, и полученной картины распределения полей напряжений в неоднородном массиве, была определена функция $t(\tau_{\max})$, позволяющая установить границу фронта деформационной волны в различные моменты времени (рис. 7).

Области, где наблюдается рост градиента этой функции, соответствуют незначительной скорости распространения волны. Напротив, там, где расстояния между изолиниями $t(\tau_{\max})$ велики, скорости деформационной волны более высокие. Характер полученного распределения $t(\tau_{\max})$ говорит о том, что наибольшая скорость распространения деформационной волны достигается в направлении, перпендикулярном к торцам рассматриваемого блока.

Фактические данные о пространственно-временном распределении динамических явлений в шахтном поле месторождения после обрушения блока №13 так же показывают, что наиболь-

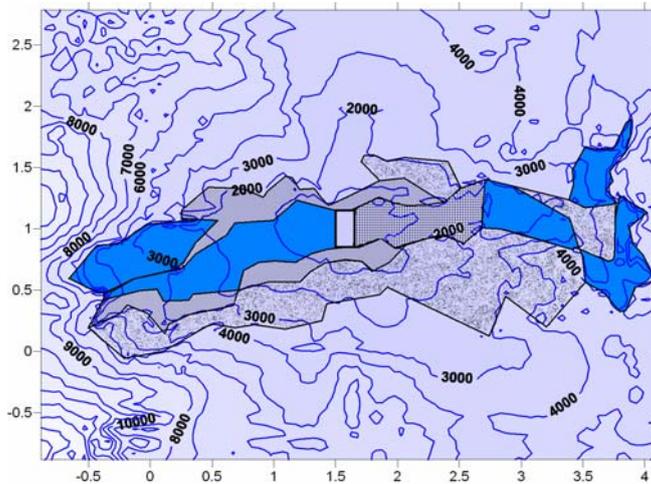


Рис. 7. Распределение функции $t(\tau_{\max})$, в массиве после технологического взрыва

шее их количество сосредоточено в областях, примыкающих к

торцам блока. Динамические явления в этих областях регистрируются в более ранние моменты времени после проведения взрыва. В тех же объемах шахтного поля, где скорости деформационных волн малы, время проявления динамических явлений более значительно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках. Под ред. И.М. Петухова, А.М. Ильина, К.Н. Трубецкого. Изд-во академии горных наук. Москва, 1997, 380 с.
2. Жадин В.В. Природа сейсмических проявлений на руднике «Таштагол» в 1981-1983 гг. // ФТПРПИ. — 1985. — № 1. — С. 52-59.
3. Серяков А.В. Влияние массовых взрывов на распределение динамических явлений и афтершоков Кочуринского землетрясения в Горной Шории. Автореф. диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Новосибирск, 2006. 24 с.
4. Фомин В.М., Гулидов А.И., Сапожников Г.А. и др. Высокоскоростное взаимодействие тел. — Новосибирск, издательство СО РАН, 1999, 600 с.
5. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений. // Вычислительные методы в гидродинамике. — М.: Мир, 1967.
6. Егоров П.В., Шевелев Ю.А., Матвеев И.Ф. и др. Управление состоянием массива горных пород на рудниках Горной Шории. — Кемерово: КузГТУ, АГН, 1999. — 257 с.
7. Адушкин В.В., Стивак А.А. Геомеханика крупномасштабных взрывов. — М.: Недра, 1993.
8. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. — М.: Наука, 1967.
9. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. — М., Наука, 1974.
10. Окатов Р.П., Низаметдинов Ф.К., Цай Б.Н., Бондаренко Т.Т. Учет временного и температурного факторов при построении критериев прочности горных пород // ФТПРПИ — 2003 — №2. **VIAS**

Коротко об авторах

Серяков В.М. — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, ИГД СО РАН,
 Серяков А.В. — кандидат технических наук, младший научный сотрудник, ИГД СО РАН,
 Штирц В.А. — аспирант, зам. начальника участка СППГУ Таштагольского филиала ОАО «Евразруда».

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 4 симпозиума «Неделя горняка-2007».
 Рецензент д-р техн. наук, проф. С.А. Гончаров.

