

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ВРУБОВОЙ ПОЛОСТИ В ЗАБОЕ ВЫРАБОТКИ

Виконано чисельне моделювання геомеханічних процесів у вибої гірничої виробки, що проводиться буровибуховим способом з формуванням врубової порожнини за допомогою випереджаючої свердловини. Ураховано дію хвилі стискаючих напружень і напружень розтягу, що віддається від поверхні свердловини. Проаналізовано зміну розподілів значень геомеханічних параметрів при збільшенні відстані між свердловиною та шпуром.

RESEARCH OF THE STRESS CONDITION AT THE GAIN CAVITY FORMATION IN THE WORKING FACE

Numerical modeling of geomechanical processes in a working face of opening, what is driving by blast-hole drilling with gain cavity creation by means of the leading hole, is executed. Action of a wave of compression stresses and stresses of tension which are reflected from a hole surface is considered. The analysis of values of geomechanical parameters during increase of distance between the leading hole and the blast-hole.

Изучение напряженно-деформированного состояния призабойного массива горных пород имеет большое значение для определения рациональных параметров ведения буровзрывных работ, управления взрывом, повышения темпов проходки выработки. Как известно, одним из способов достижения высоких темпов проведения горных выработок является выбор типа вруба. Наиболее перспективными являются врубы с центральной незаряжаемой скважиной. Для выбора оптимального расстояния между врубовым шпуром и опережающей скважиной решим задачу об определении напряженного состояния пород в забое выработки при взрыве шпурового заряда вблизи скважины в упруго-пластической постановке с помощью численных методов.

В момент взрывания заряда во врубовом шпуре в массиве начинает распространяться волна сжатия, накладывая на существующее поле напряжений дополнительные напряжения, вызванные взрывом.

Для расчета радиальной $s_r(r, t)$ и тангенциальной $s_j(r, t)$ составляющих волны напряжений при взрыве сосредоточенного заряда, в диапазоне расстояний $r = (20, 100)R_0$, где R_0 – радиус заряда, Боровиков В.А. и Ванягин И.Ф. [1] предлагают использовать зависимости, полученные для крепких горных пород на основании лабораторных и натуральных экспериментальных данных:

$$s_r(r, t) = s_r^{\max} e^{-a(t-t_n)} \frac{\sin bt}{\sin bt_n} [e_0(t) - e_0(t - t_+)],$$

$$s_j(r,t) = s_r^{\max} \frac{1}{3} \sin \frac{\pi}{2} \left[\frac{a}{c} (t - t_n) \right] e_0(t) - e_0(t - t_n) - e^{-a(t - 2t_n)} \frac{\sin b(t - t_n)}{\sin bt_n} [e_0(t - t_n) - e_0(t - t_n - t_+)]$$

где $t = t - t_{np}$ – время с момента прихода волны напряжения в заданную точку r ; t – текущее время с момента взрыва ВВ; t_{np} – время прихода волны в заданную точку r ; $t_n = (a_1 + a_2 \bar{r}) R_0$ – время нарастания амплитуды напряжения до максимального значения, c ; $\bar{r} = \frac{r}{R_0}$ – относительное расстояние;

$t_+ = p/b$; $s_r^{\max} = 545 \frac{r_n c_n}{r^{-1,1}}$ – максимальное радиальное напряжение в заданной точке r ; r_n – плотность породы; c_n – скорость звука в породе; $s_j^{\max} = (c_1 + c_2 r) s_r^{\max}$ – максимальное тангенциальное напряжение в заданной точке r ; $a = b \operatorname{ctg}(bt_n)$ – коэффициент, характеризующий крутизну нарастания и спада амплитуды волны напряжений во времени; $b = \frac{b_1 + b_2 \bar{r}}{R_0}$ – коэффициент, характеризующий продолжительность положительной фазы волны напряжений;

$a_1 = (0,02 + 0,87 \times 10^{-8} r_n c_n) \times 10^{-3}$,
 $a_2 = (0,19 + 0,122 \times 10^{-7} r_n c_n) \times 10^{-4}$,
 $b_1 = 150 + 27 \times 10^{-6} r_n c_n$,
 $b_2 = -0,2 \times 10^{-7} r_n c_n$, – размерные коэффициенты, зависящие от типа породы;
 $e_0(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } t \geq 0, \\ 0, & \text{при } t < 0, \end{cases}$ – разрывная функция нулевого порядка.

Когда волна сжатия подходит к открытой поверхности, она отражается от нее, превращаясь в волну растяжения, центром которой является точка, симметричная центру взрыва относительно поверхности забоя.

Нестационарное напряженно-деформированное состояние породного массива в окрестности горной выработки описывается системой уравнений [2, 3]:

$$s_{ij,j} + X_i(t) + Y_i(t) + T_i(t) + P(t) = r_n \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad i, j = x, y \quad (1)$$

где $s_{ij,j}$ – производные от компонент тензора напряжений по x, y ; t – время; $X_i(t)$ – внешние силы; $Y_i(t)$ – сила воздействия взрывной волны; $T_i(t)$ – силы, вызванные внутренним трением, $T_i(t) = -c_g \frac{\partial u_i}{\partial t}$; c_g – коэффициент демпфирования, определяемый экспериментально; $P(t)$ – сила образованного при взрыве газа, действующая на массив; u_i – перемещения; r_n – плотность породы.

Для математического описания процесса перехода горных пород в нарушенное состояние применяется условие прочности Кулона-Мора, которое учитывает возможность возникновения разрушения как в результате сдвига, так и в результате отрыва [4, 5].

Начальные и граничные условия для данной задачи:

$$\begin{aligned} s_{yy}|_{t=0} &= gH; \\ s_{xx}|_{t=0} &= l gH; \\ s_{zz}|_{t=0} &= l gH; \\ u_x|_{W_1} &= 0; \\ u_y|_{W_2} &= 0; \end{aligned} \quad (2)$$

где g – усредненная плотность вышележащих горных пород; H – глубина разработки; l – коэффициент бокового распора; $W_1(t)$ – вертикальные границы внешнего контура; W_2 – горизонтальные границы внешнего контура.

Для моделирования действия взрыва в нашей задаче необходимо задать давление газов p_0 в точке взрыва. Давление на стенки шпура [6]:

$$p_0 = p_d/2,$$

где p_d – детонационное давление, определяющее величину импульса и бризантное действие ВВ.

Детонационное давление – один из основных параметров ударных волн. Значения давления детонации были измерены авторами [6] для трех типов промышленных ВВ. Исходя из полученных данных, можно сказать, что $p_d = 1500, 24000 \text{ МПа}$. То есть, к начальным условиям (2) добавится следующее:

$$p|_{t=t_{взр}, x=x_{взр}, y=y_{взр}} = \frac{p_d}{2}, \quad (3)$$

где $t_{взр}$ – момент взрыва; $x_{взр}, y_{взр}$ – координаты центра взрыва.

Чтобы получить решение уравнения (1) с начальными и граничными условиями (2), (3) на определенном временном промежутке, применяется конечно-разностный метод. При этом считается, что в начальный момент времени $t = 0$ распределение напряжений задано, и для достаточно малых значений Δt с помощью итерационных соотношений получаем распределение напряжений на момент времени $t + \Delta t$. Этот процесс продолжается от исходного состояния до любого текущего момента времени.

Для оценки напряженного состояния используются геомеханические параметры $Q = (s_1 - s_3)/gH$ и $P = s_3/gH$, характеризующие степень разнокомпонентности поля напряжений и возможность хрупкого разрушения горных пород.

Рассмотрим забой выработки, в котором пробурена опережающая скважина диаметром 400 мм. Диаметр шпура для взрывания заряда – 40 мм ($R_0 = 20$ мм). Глубина проведения выработки – 1000 м. Вмещающая порода – аргиллит, его свойства приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристики породы

Порода	Модуль упругости, E , МПа	Коэффициент Пуассона, μ	Сцепление, C , МПа	Угол внутреннего трения, j °	Прочность на растяжение, s_p , МПа	Плотность, kg/m^3	Скорость звука в породе, m/s
Аргиллит	10^4	0,2	3,5	30	-2	$2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$

Расчеты проводятся с применением метода конечных элементов. В расчетах учитывается эффект отражения волны от свободной поверхности. Конечнo-элементная сетка показана на рис. 1. Выполним расчет для случаев, когда расстояние l между врубовым шпуром и скважиной равно 200 мм; 400 мм; 600 мм и 800 мм.

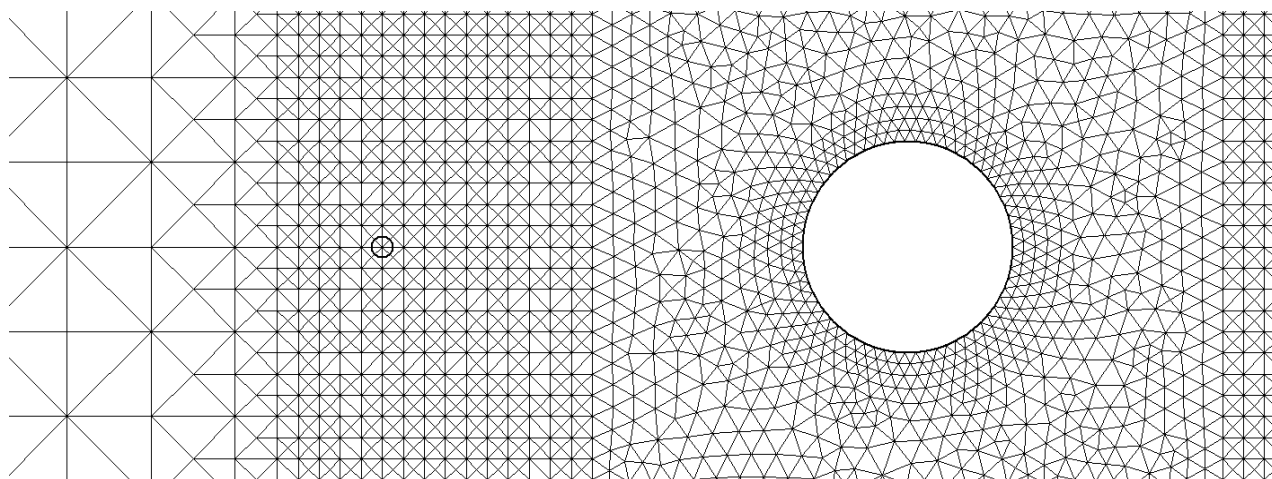
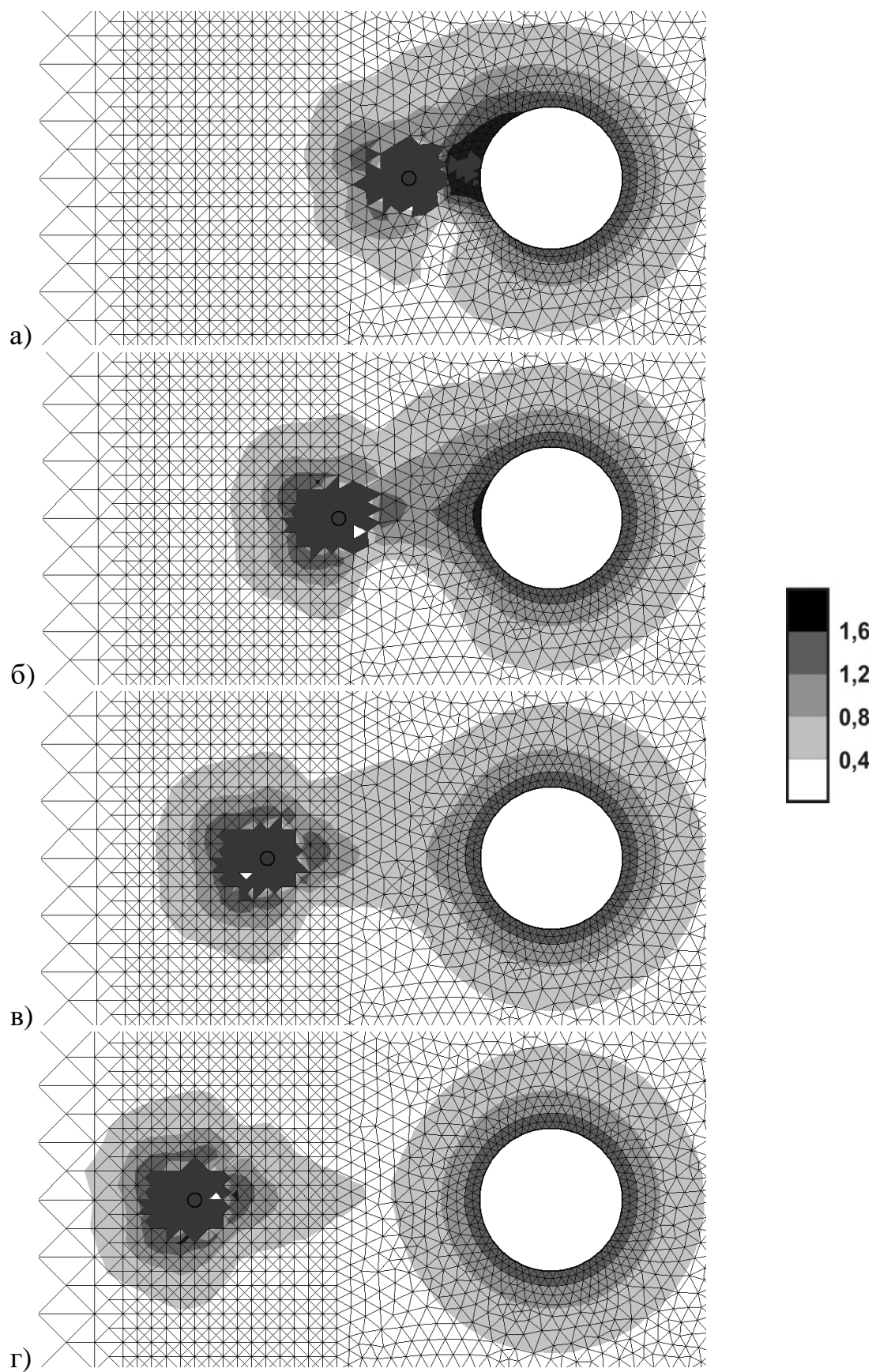


Рис. 1 – Фрагмент конечно-элементной сетки со скважиной и врубовым шпуром

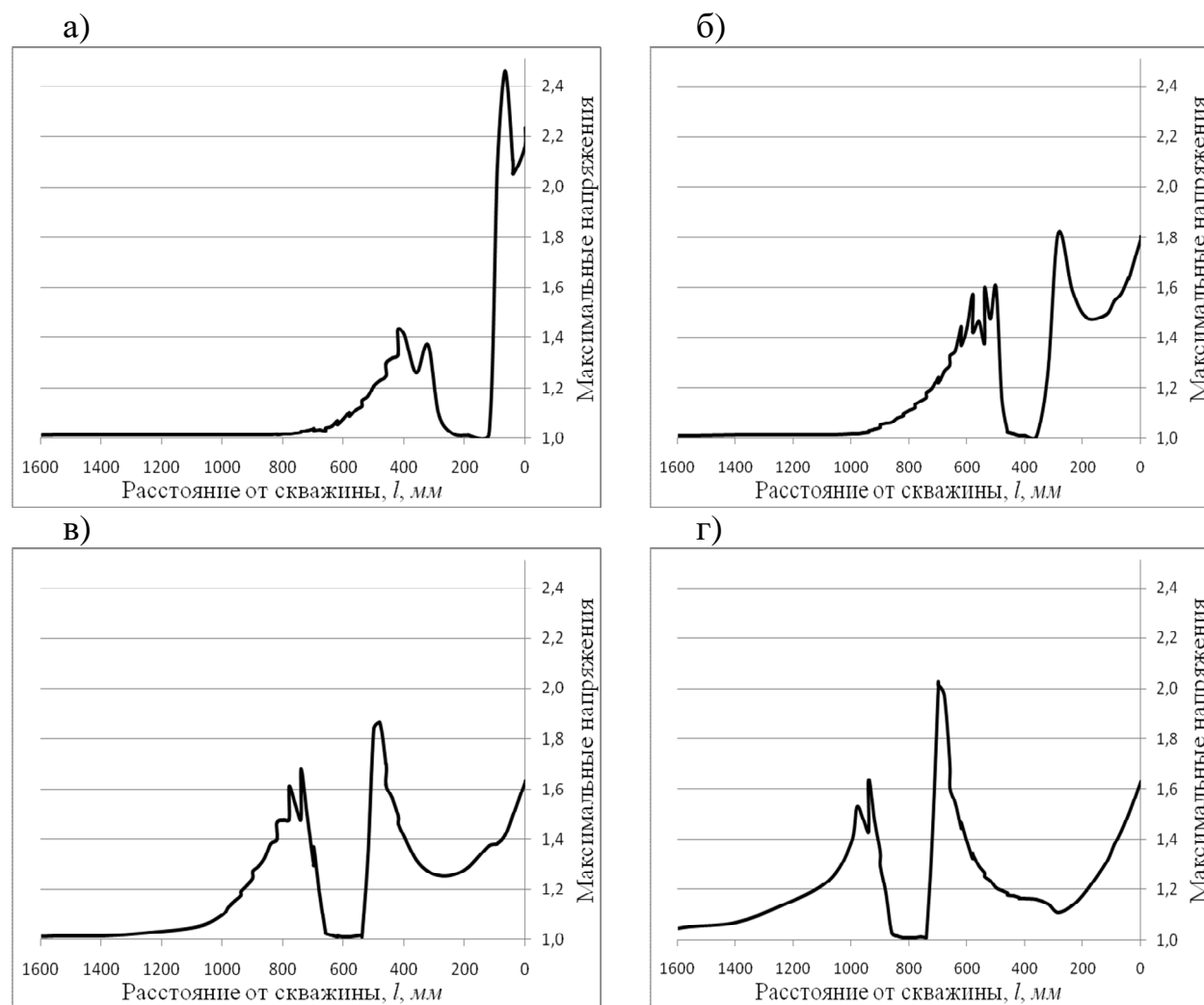
При выполнении расчета получим распределение значений компонент тензора главных напряжений и параметры зоны неупругих деформаций. На рис. 2 показано распределение значений параметра Q для четырех рассматриваемых случаев.



а) $l = 200$ мм; б) $l = 400$ мм; в) $l = 600$ мм; г) $l = 800$ мм

Рис. 2 – Распределение значений параметра Q и зона неупругих деформаций

Из рисунков видно, что вокруг скважины расположена зона разгруженных горных пород. В результате действия взрыва изменяется распределение напряжений в забое выработки. Вокруг заряда образуется зона полностью разрушенных пород, далее расположены зона сильно нарушенных пород (темно-серый цвет, $0,8 < Q < 1,2$) и зона повышенной трещиноватости (светло-серый цвет, $0,4 < Q < 0,8$). Ближний к врубовому шпuru участок поверхности опережающей скважины (черный цвет, $Q > 1,6$), рис. 2а и 2б, разрушается в результате действия отраженной от свободной поверхности волны растяжения.



а) $l = 200$ мм; б) $l = 400$ мм; в) $l = 600$ мм; г) $l = 800$ мм

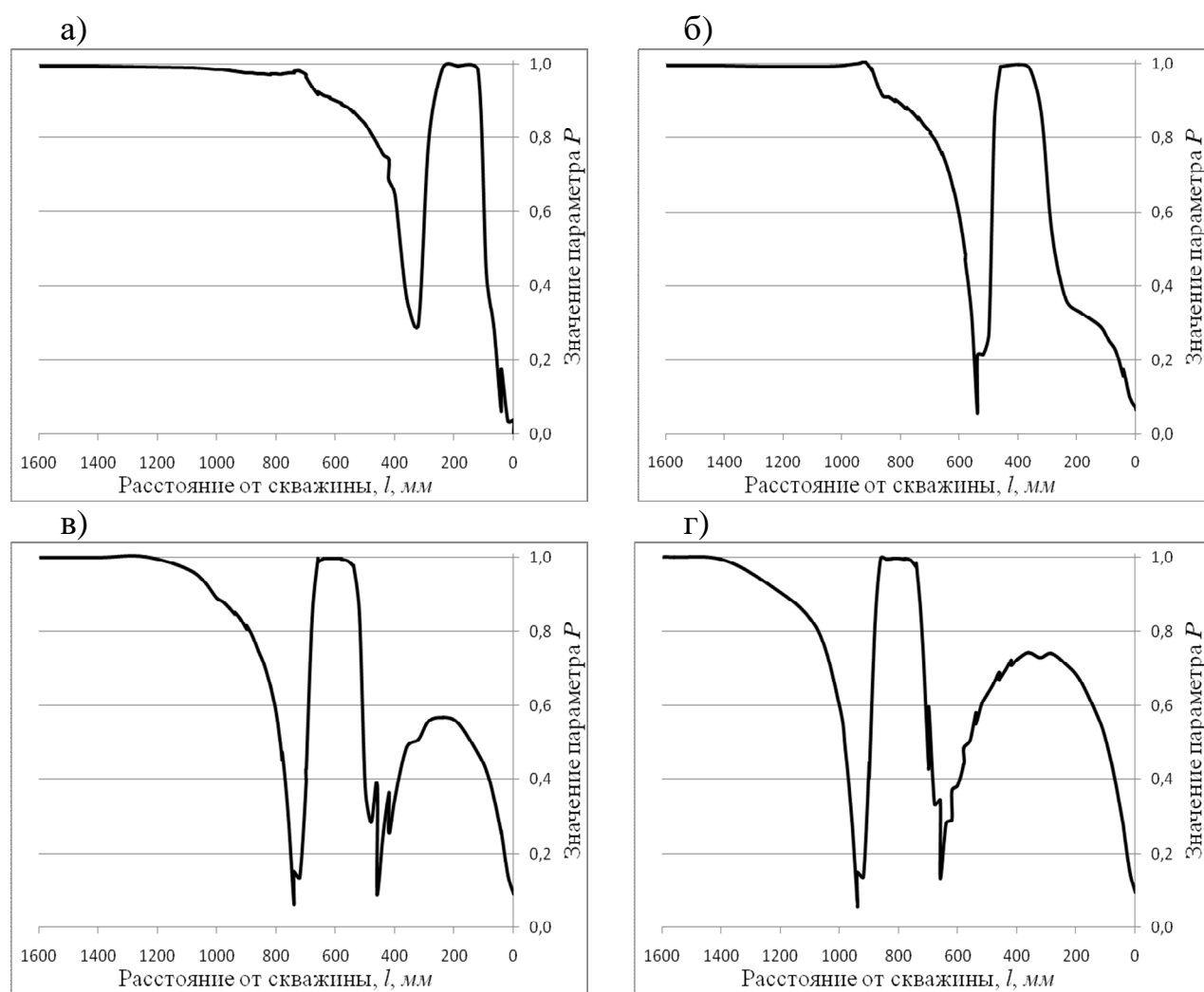
Рис. 3 – Распределение значений максимальных напряжений вдоль оси, проходящей через центры скважины и шпура

В случае, когда заряд находится близко от опережающей скважины $l = 200$ мм, зона полностью разрушенных пород выходит на свободную поверхность, рис. 2а, полость от взрыва и полость скважины образуют единую область. Во втором случае, рис. 2б, объединяются зоны сильно нарушенных по-

род вокруг скважины и взорванного заряда. Это дает основание для предположения, что и для $l = 400$ мм область разрушения выйдет на свободную поверхность. При $l = 600$ мм, рис. 2в, полость взрыва отделяется от поверхности скважины перемычкой из трещиноватых, но не разрушенных полностью горных пород. В последнем случае действие взрыва никак не сказывается на состоянии пород, непосредственно примыкающих к поверхности опережающей скважины, рис. 2д.

На рис. 3 приведены распределения значений максимальной компоненты тензора главных напряжений S_1 , отнесенных к \mathcal{H} , вдоль оси, проходящей через центры опережающей скважины и врубового шпура.

Видно, что при увеличении расстояния между опережающей скважиной и врубовым шпуром пик сжимающих напряжений отодвигается от свободной поверхности, уменьшая вероятность разрушения поверхности скважины.



а) $l = 200$ мм; б) $l = 400$ мм; в) $l = 600$ мм; г) $l = 800$ мм

Рис. 4 – Распределение значений параметра P вдоль оси, проходящей через центры окружностей

На рис. 4 приведены распределения значений минимальной компоненты тензора главных напряжений S_3 , отнесенных к gH , вдоль оси, проходящей через центры опережающей скважины и врубового шпура. На этих рисунках показано перемещение волны разгрузки от центра взрыва. Видно, что участок между скважиной и шпуром наиболее разгружен в первых двух случаях, рис. 4а и 4б.

Приведенный выше алгоритм расчета можно применять и для решения других подобных задач – когда дополнительная свободная поверхность в забое выработки имеет более сложную форму, при различном количестве и расположении взрывааемых шпуровых зарядов. Время и порядок их детонации также при необходимости можно варьировать. Разработанный пакет программ дает возможность учитывать слоистость и газонасыщенность горных пород, в которых проводится выработка, что способствует выявлению условий, при которых действие взрыва приводит к нежелательным газодинамическим последствиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боровиков В.А. Моделирование действия взрыва при разрушении горных пород. / В.А. Боровиков, И.Ф. Ванягин – М.: Недра, 1990. – 231 с.
2. Круковская В.В. Изучение параметров процесса выброса угля и газа с использованием компьютерного моделирования // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Матер. XVII Межд. науч. школы. – Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2008. – С. 152-154.
3. Круковская В.В. Компьютерное моделирование процесса выброса угля и метана вблизи тектонических нарушений различных типов./ В.В. Круковская, А.П. Круковский // Метан угольных месторождений Украины. Материалы пятой международной научно-практической конференции // Геотехническая механика: Сб. научн. тр./НАН Украины ИГТМ. – Днепропетровск, 2008. - № 80. – С. 238-250.
4. Баклашов И.В. Механика подземных сооружений и конструкций крепей./ И.В. Баклашов, Б.А. Картозия – М.: Недра, 1984. – 415 с.
5. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. – М.: Мир, 1969. – Т. 1. – 648 с.
6. Ефремов Э.И. Взрывное разрушение выбросоопасных пород в глубоких шахтах./ Э.И. Ефремов, В.Н. Харитонов, И.А. Семенюк – М.: Недра, 1979. – 256 с.