УДК 642.042

**В.В. КАРПЕНКО,** *канд. техн. наук, доцент, agapita@inbox.ru*
**Г.А. КОЛТОН,** *канд. физ.-мат. наук, доцент, gakoltun@gmail.com*
*Санкт-Петербургский государственный горный институт* (*технический университет*)

**V.V. KARPENKO,** *PhD in eng. sc., associate professor, agapita@inbox.ru*
**G.A. KOLTON,** *PhD in phys. and math. sc., associate professor, gakoltun@gmail.com*
*Saint Peterburg State Mining Institute* (*Technical University*)

# ОЦЕНКА МАССОВЫХ СКОРОСТЕЙ В СЛОИСТОЙ КРОВЛЕ И РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЦЕЛИКАХ СИСТЕМЫ ВЫРАБОТОК ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЗРЫВНЫХ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ

Рассматривается трансформация эпюр массовых скоростей в слоистом приконтурном массиве системы горных выработок при воздействии на них взрывных волн напряжений. Предполагается, что фронт взрывной волны параллелен границам раздела сред непосредственной кровли. При сделанных допущениях исследуется трансформация эпюр массовых скоростей в непосредственной слоистой кровле системы выработок и разделительном целике.

***Ключевые слова*:** системы выработок, целик, взрывные волны, массовые скорости.

# THE ESTIMATION OF MASS VELOCITIES IN A LAYERED ROOF AND DIVIDING PILLARS OF THE MINING SYSTEM IN THE TIME OF INFLUENCE OF SHOCK STRESS WAVES

The mass velocity diagrams transformation in the layered border zone of the mining system in the time of tension explosion waves influence is considered. The explosion wave front is suggested to be parallel to the proximate handing roof environs discontinuity. Under the admitted assumption the mass velocity epures transformation is investigated in the layered roof stone of the mining system and in the dividing pillar.

***Key words*:** system of excavations, pillar, explosion waves, mass velocity.

В применяемой на шахтах СУБРа камерно-столбовой системе добычи руды целики являются одним из элементов поддержания кровли и управления горным давлением. Слоистая кровля в системе целики – камеры влияет на напряженное состояние приконтурного массива. В качестве рудной залежи и непосредственной кровли системы выработок и разделительных целиков была выбрана слоисто-однородная среда, состоящая из 21 слоя мощностью 500-600 м.* Осреднение кинематических и упругих параметров непосредственной кровли позволило представить ее двумя слоями упругих фиктивных сред мощностью $h_1 = 2{,}3$ м и $h_2 = 1{,}2$ м, причем более тонкий слой примыкал к потолочине выработок [5, 6].

* Механические свойства пород основной кровли и почвы взяты из таблицы, представленной в предыдущей статье настоящего сборника.

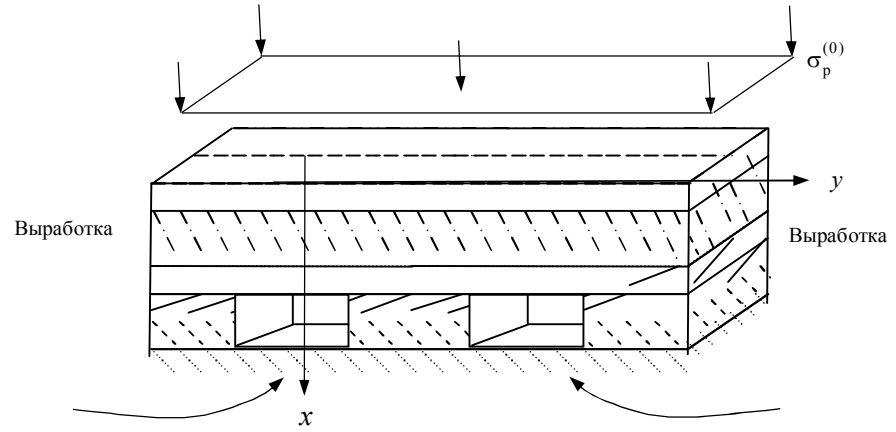



Рис.1. Схема натекания взрывной волны на систему горных выработок

При построении математической модели совместного действия на систему горных выработок горного давления и динамического напряжения от взрывных волн $\sigma_p^{(0)}$ принято, что горная порода вокруг выработки является идеально упругой слоистой средой (рис.1). Боковая поверхность выработок аппроксимирована цилиндрической поверхностью произвольного поперечного сечения. Для описания характерных особенностей напряженного состояния породы вокруг выработок воспользуемся моделью плоского деформированного состояния массива.

Динамическая задача об определении напряженно-деформированного состояния (НДС) массива с системой цилиндрических полостей, состоит в определении компонентов 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 напряжений $\sigma_{xx}^{(1)}$, $\sigma_{yy}^{(1)}$, $\sigma_{xy}^{(1)}$ удовлетворяют условиям динамического равновесия [4]:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}^{(1)}}{\partial y} = \rho U_x^{\bullet\bullet};$$

$$\frac{\partial \sigma_{xy}^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}^{(1)}}{\partial y} = \rho U_y^{\bullet\bullet}. \qquad (1)$$

На контуре поперечного сечения полости нормальный и касательный компоненты суммарного тензора напряжений равны нулю:

$$(\sigma_{nn}^{(0)} + \sigma_{nn}^{(1)})\,\big|_\Gamma = 0;\ \ (\sigma_{nt}^{(0)} + \sigma_{nt}^{(1)})\,\big|_\Gamma = 0. \qquad (2)$$

На бесконечности при $\sqrt{x^2 + y^2} \to \infty$ компоненты тензора отраженных и дифракционных волн удовлетворяют условиям

$$\sigma_{xx}^{(1)} \to 0;\ \ \sigma_{yy}^{(1)} \to 0;\ \ \sigma_{xy}^{(1)} \to 0; \qquad (3)$$

начальные условия для них и параметров движения среды в невозмущенной области примем нулевыми.

Компоненты тензора напряжений отраженной и дифракционной волн связаны с компонентами тензора плоской деформации законом Гука [4].

Алгоритм численного решения упругой динамической задачи основан на ее редукции к конечно-разностному аналогу [2, 3].

При расчетах напряженного состояния кровли выработок и разделительных целиков выработок предполагалось, что выработки имеют высоту 4 м и ширину 5 м, ширина целика принималась равной 6 м. Предварительные расчеты показали, что при таких размерах целика выработки будут находиться в зоне взаимного влияния, которая в боковом направлении простирается на 8-10 м.

Модели совместного действия горного давления и динамических волн напряжений, генерируемых взрывами и горными ударами, разработаны в работе [2]. При расчете совместного действия взрывных волн напряжений ($\sigma_{xx}^{(p)}$, $\sigma_{yy}^{(p)}$) и статического ($\sigma_{xx}^{(h)}$, $\sigma_{yy}^{(h)}$) горного давления параметры эпюр взрывных волн напряжений определялись предложенным в работе [1] методом. В качестве прямой продольной взрывной волны напряжений принималась волна с амплитудой 11,9 МПа, длительностью фаз сжатия и растяжения 1,2 и 1,25 мс соответственно. Волна напряжения генерировалась взрывом цилиндрического заряда с эквивалентным радиусом 0,0276 м.

Результаты расчетов массовых скоростей $U_x^{\bullet}$ в кровле выработки в точках, расположенных на вертикальной оси симметрии выработки и вертикальной оси симметрии целика (рис.2), показывают, что отражение преломленной волны от свободной поверхности (потолочины выработки) сопровождается увеличением массовых скоростей в 2 раза (кривая 6 на рис.2, *а*). При преломлении продольной волны из более плотной в менее плотную среду, какой является слоистая непосредственная кровля над целиком, массовые скорости $U_x^{\bullet}$ растут примерно на 25 % (кривая 4 на рис.2, *б*). Отражение преломленной волны от обнаженной поверхности выработки происходит практически так же, как от свободной поверхности, за исключением участков, расположенных в окрестности угловых точек контура выработки, вблизи которых существенны дифракционные процессы. Об этом свидетельствуют изображенные на рис.3 и 4 результаты расчетов массовых скоростей $U_x^{\bullet}$, определенных в точках, расположенных вдоль потолочины и над целиком и отстоящих от них на 0,1 м.

Массовые скорости $U_y^{\bullet}$ в приконтурном слоистом массиве пород непосредственной кровли не столь значительны как массовые скорости $U_x^{\bullet}$. В первом приконтурном слое мощностью 1,2 м максимальные величины массовых скоростей $U_y^{\bullet}$ по абсолютной величине не превосходят 0,35 м/с. Однако во втором приконтурном слое непосредственной кровли мощностью 2,3 м максимальная величина массовых скоростей $U_y^{\bullet}$ примерно в 2 раза больше, чем в первом, но при дальнейшем увели-

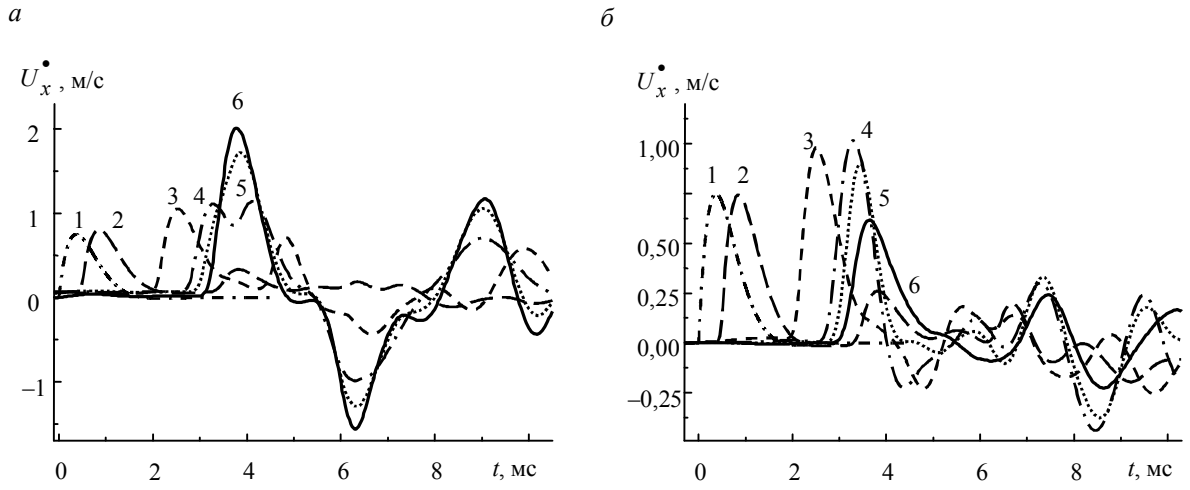



Рис.2. Эпюры проекций массовых скоростей $U_x^{\bullet}$ в прямой продольной взрывной волне (кривая 1) и слоистом приконтурном массиве выработки (кривые 2-6) в точках вертикальной оси выработки (*а*) и целика (*б*) на расстоянии *x* соответственно от потолочины и составляющих целик пород

2 – $x$ = 12 м; 3 – $x$ = 3 м; 4 – $x$ = 1 м; 5 – $x$ = 0,5 м; 6 – $x$ = 0,1 м

чении расстояния от потолочины они уменьшаются.

Расчеты массовых скоростей $U_x^{\bullet}$ в преломленной в целик продольной волне (рис.5 и 6) позволяют сделать вывод, что эпюры и максимальные значения массовых скоростей по ширине и высоте целика изменяются незначительно. Их максимальные значения меньше максимальных значений в прямой волне в среднем на 15-25 %.

Результаты расчетов эпюр массовых скоростей $U_y^{\bullet}$ в целике изображены на рис.7 и 8.

Массовые скорости $U_y^{\bullet}$, возникающие в приконтурном массиве системы выработок в результате дифракции на них прямой про-

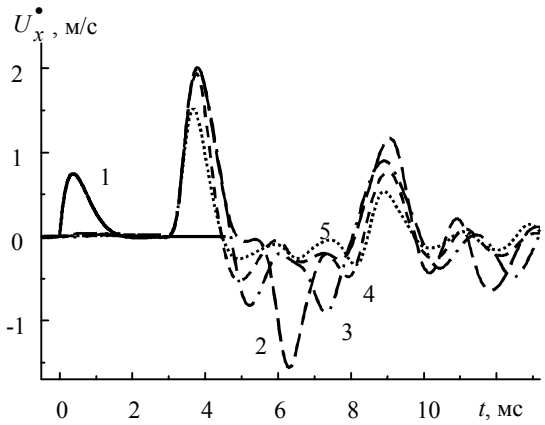



Рис.3. Эпюры массовых скоростей $U_x^{\bullet}$ в прямой волне (кривая 1) и слоистом приконтурном массиве в точках, отстоящих от потолочины выработки на 0,1 м и от ее вертикальной оси (кривые 2-5) на расстояние $x$

2 – $x$ = 0; 3 – $x$ = 1,2 м; 4 – $x$ = 2 м; 5 – $x$ = 2,4 м

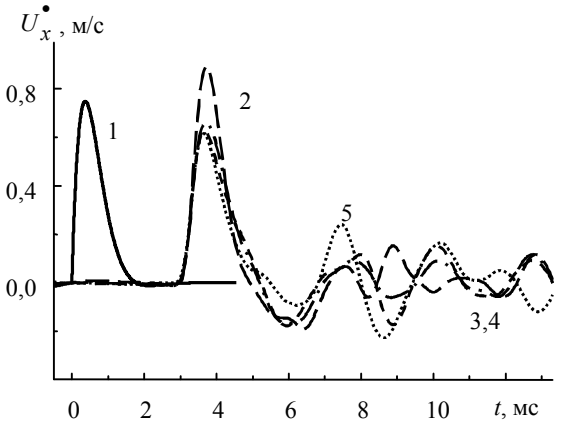



Рис.4. Эпюры массовых скоростей $U_x^{\bullet}$ в прямой волне (кривая 1) и слоистом приконтурном массиве над целиком в точках, отстоящих от потолочины выработки на 0,1 м и от ее вертикальной оси (кривые 2-5) на расстояние $x$

2 – $x$ = 2,6 м; 3 – $x$ = 3 м; 4 – $x$ = 3,4 м; 5 – $x$ = 5,5 м

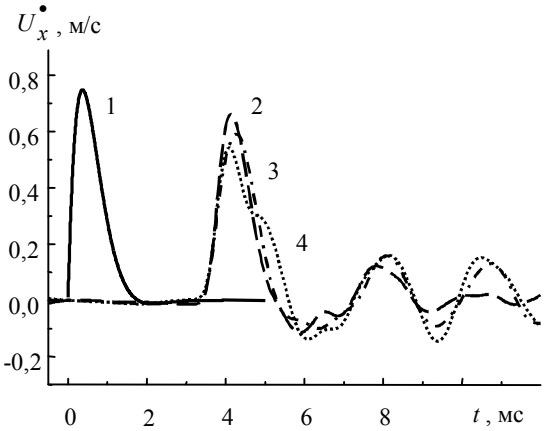



Рис.5. Эпюры массовых скоростей $U_x^{\bullet}$ в прямой волне (кривая 1) и в преломленных и отраженных волнах в целике в точках, отстоящих от потолочины выработки на 2,0 м и от боковой ее стенки на расстояние $x$

2 – $x$ = 0; 3 – $x$ = 1,5 м; 4 – $x$ = 3 м

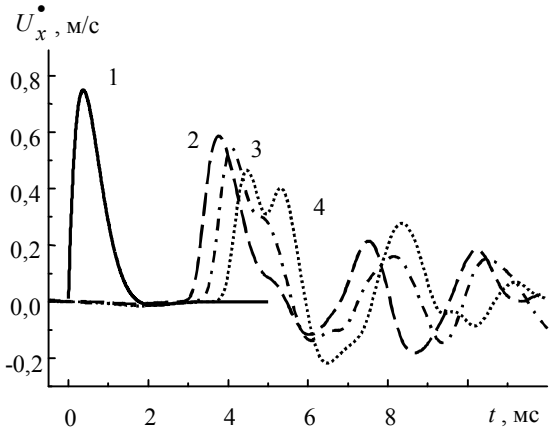



Рис.6. Эпюры массовых скоростей $U_x^{\bullet}$ в прямой волне (кривая 1) и в преломленных и отраженных волнах в целике в точках, отстоящих от боковой стенки выработки на 3,0 м и от ее потолочины на расстояние $x$

2 – $x$ = 0,1 м; 3 – $x$ = 2 м; 4 – $x$ = 4 м

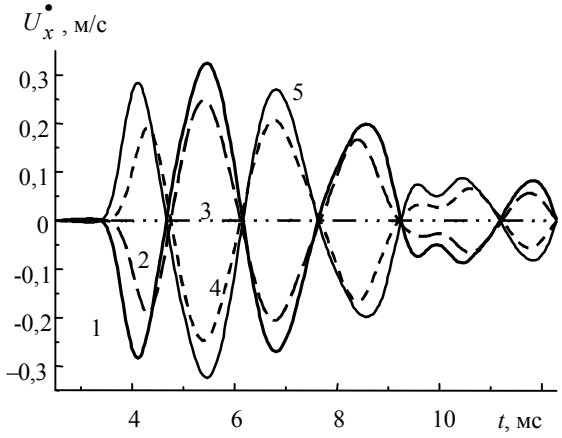



Рис.7. Эпюры массовых скоростей $U_y^{\bullet}$ в целике в точках, отстоящих от потолочины выработки на 2,0 м и от боковой ее стенки на расстояние $x$

1 – $x$ = 0; 2 – $x$ = 1,5 м; 3 – $x$ = 3 м; 4 – $x$ = 4,5 м; 5 – $x$ = 6 м

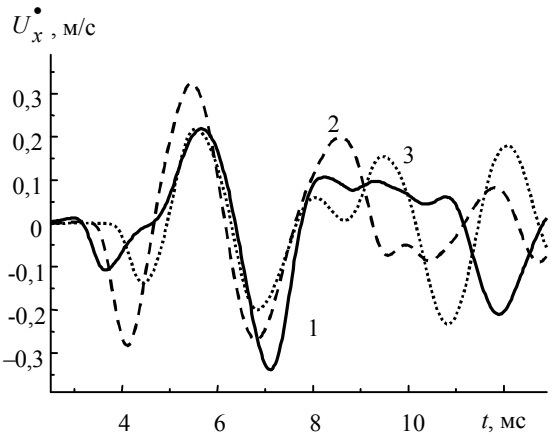



Рис.8. Эпюры массовых скоростей $U_y^{\bullet}$ в целике в точках, отстоящих от боковой стенки выработки на 0,1 м и от ее потолочины на расстояние $x$

1 – $x$ = 0,1 м; 2 – $x$ = 2 м; 3 – $x$ = 4 м

дольной волны, распространяются в целике с затуханием амплитуды, максимальные значения которой достигаются на боковых стенках выработок и не превосходят 0,35 м/с.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Волны напряжений в обводненном трещиноватом массиве / В.А.Боровиков, И.Ф.Ванягин, М.Г.Менжулин, С.В.Цирель. Л., 1989.

2. *Карпенко В.В.* Математическое моделирование совместного действия горного давления и взрывных волн напряжений на выработки / В.В.Карпенко, А.В.Карпенко // Записки Горного института. СПб, 2005. Т.163.

3. *Карпенко В.В.* Метод расчета напряженного состояния массива вокруг горных выработок / В.В.Карпенко, Г.А.Колтон // Изв. Тульского ун-та. Серия: Геомеханика. Механика подземных сооружений. 2004. Вып.2.

4. *Новожилов В.В.* Теория упругости. Л., 1958. 372 с.

5. *Протосеня А.Г.* Методы осреднения параметров, характеризующих пакет тонкослоистых упругих и упругопластических сред / А.Г.Протосеня, В.В.Карпенко // Труды 6-й межрегиональной науч.-практ. конф. «Освоение минеральных ресурсов Севера: проблемы и решения». Воркута, 2008.

6. *Сибиряков Б.П.* Анизотропия и дисперсия упругих волн в периодических структурах / Б.П.Сибиряков, Л.А.Максимов, М.А.Татарников. Новосибирск, 1980.

### REFERENCES

1. *Borovokov V.A., Vanyagin I.F., Menzhulin M.G., Tsirel S.V.* Waves of stress in a watered fractured massive. Leningrad, 1989.

2. *Karpenko V.V., Karpenko A.V.* Mathematical modelling of joint action of mountain pressure and blast waves of stress on minings // The Proceedings of the Mining Institute. Saint Petersburg, 2005.Vol.163.

3. *Karpenko V.V., Kolton G.A.* Method of calculation of the stress state of a massive around of mine roadways // TulGU news. A series: Geomechanics. Mechanics of underground constructions. 2004. Release 2.

4. *Novozhilov V.V.* Theory of elasticity. Leningrad, 1958.

5. *Protosenya A.G., Karpenko V.V.* Methods of averaging of the parameters characterizing a package of thin-layer elastic and elasticoplastic structures. Works of the sixth inter-regional scientifically-practical conference // Development of mineral resources of the North: problems and decisions. Vorkuta, 2008.

6. *Sibiryakov B.P., Maksimov L.A., Tatarnikov M.A.* Elastic waves' anisotropy and dispersion in periodic structures. Novosibirsk, 1980.