

## **ВАРИАЦИЯ СКОРОСТЕЙ УПРУГИХ ВОЛН В УГЛЕПОРОДНОМ МАССИВЕ ПРИ СЛОЕВОЙ ВЫЕМКЕ**

*Антон Владимирович Панов*

Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 111020, Россия, г. Москва, Крюковский тупик, 4, младший научный сотрудник, e-mail: anton-700@yandex.ru

*Леонид Анатольевич Назаров*

Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 111020, Россия, г. Москва, Крюковский тупик, 4, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геотехнологических процессов, тел. (383)217-24-46, e-mail: mining1957@mail.ru

*Лариса Алексеевна Назарова*

Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 111020, Россия, г. Москва, Крюковский тупик, 4, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геотехнологических процессов, тел. (383)217-24-46, e-mail: lanazaroval@ngs.ru

*Андрей Леонидович Карчевский*

Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 111020, Россия, г. Москва, Крюковский тупик, 4, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: karchevs@math.nsc.ru

Разработана и методом конечных элементов реализована модель углепородного массива горизонтально-слоистой структуры. С использованием данных лабораторных экспериментов по нагружению угольных образцов получены эмпирические зависимости скоростей распространения продольных и поперечных волн от среднего напряжения. На основе численных экспериментов выполнена оценка напряженного состояния при выемке угольных пластов и рассчитаны приращения скоростей упругих волн в угольных пластах и вмещающих породах, необходимые для томографических исследований.

**Ключевые слова:** углепородный массив, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, обработка, эволюция скорости акустических волн.

## **VARIATION OF ELASTIC WAVE VELOCITIES IN COAL-ROCK MASS UNDER SLICE CUTTING**

*Anton V. Panov*

Institute of Integrated Mineral Development, Russian Academy of Sciences, 111020, Russia, Moscow, 4 Kryukovsky tupik, Junior Scientific Researcher, tel. (383)217-06-36, e-mail: anton-700@yandex.ru

*Leonid A. Nazarov*

Institute of Integrated Mineral Development, Russian Academy of Sciences, 111020, Russia, Moscow, 4 Kryukovsky tupik, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Leading Researcher, Geotechnical Processes Laboratory, tel. (383)217-24-46, e-mail: mining1957@mail.ru

*Larisa A. Nazarova*

Institute of Integrated Mineral Development, Russian Academy of Sciences, 111020, Russia, Moscow, 4 Kryukovsky tupik, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Leading Researcher, Geotechnical Processes Laboratory, tel. (383)217-24-46, e-mail: lanazaroval@ngs.ru

**Andrey L. Karchevsky**

Institute of Integrated Mineral Development, Russian Academy of Sciences, 111020, Russia, Moscow, 4 Kryukovsky tupik, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Leading Researcher, Geotechnical Processes Laboratory, tel. (383)217-24-46, e-mail: karchevs@math.nsc.ru

The authors have developed a model of horizontally bedding coal–rock mass and implemented the model using the finite-element method. Based on the data of laboratory compression tests of coal specimens, the empirical relations between  $P$ - and  $S$ -wave velocities and mean stress are obtained. The numerical experiments yield estimate of stress state of coal–rock mass under mining and increments in the velocities of elastic waves in coal and surrounding rock mass, required for tomographic research.

**Key words:** coal–rock mass, finite-element method, stress–strain state, mining, acoustic wave velocity evolution.

Одним из эффективных методов контроля состояния породного массива при ведении горных работ является активное и пассивное акустическое зондирование. Сложившаяся при этом практика интерпретации сейсмической информации ([www.cgg.com](http://www.cgg.com)) предусматривает построении карт распределения скоростей  $V$  продольных волн, а области с повышенными значениями  $V$  ассоциируются с зонами опасных напряжений. Между тем, если построить обоснованную референтную скоростную модель и воспользоваться подходом [1], то появляется возможность не только качественного, но и количественного мониторинга напряженно-деформированного состояния. Настоящая статья – первый этап реализации такой программы применительно к углепородным массивам.

Рассмотрим типичную конфигурацию подземного пространства, возникающую при слоевой выемке угля. На рис. 1 показано вертикальное сечение исследуемого объекта: чередующиеся субгоризонтальные слои угля и песчаника. Отрабатываемый пласт вскрыт двумя штреками, поперечные размеры которых много меньше их протяженности. Поэтому для исследуемого участка в первом приближении принимается модель плоской деформации.

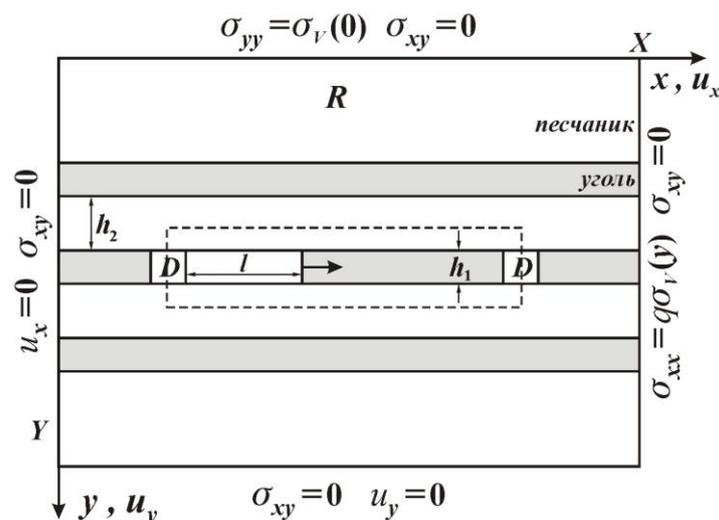


Рис. 1. Схема расчетной области и граничные условия

Напряженное состояние углепородного массива [2] описывается линейно-упругой моделью, включающей уравнения равновесия, закон Гука и соотношения Коши для малых деформаций. Расчетная область  $R$  и условия на  $\partial R$  представлены на рис. 1: где  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{xy}$  и  $\sigma_{yy}$  – компоненты тензора напряжений;  $u_x$ ,  $u_y$  – смещения;  $q$  – коэффициент бокового отпора, характеризующий величину горизонтальной компоненты поля напряжений вне зоны ведения горных работ;  $H$  – их глубина;  $\sigma_v(y)=\rho g(H+y)$  – литостатическое напряжение;  $h_1$  и  $h_2$  – мощности пластов и междупластьев;  $X$  и  $Y$  – размеры  $R$ .

Расчеты проводились МКЭ с использованием оригинального кода [3], шаг дискретизации по горизонтали 1 м, по вертикали 0.125 м. Геометрические параметры модели:  $H = 500$  м;  $X = 600$  м;  $Y = 46$  м;  $l$ -положение забоя при ведении очистных работ;  $h_1=2$  м;  $h_2=5$  м; размеры штреков  $D 10 \times 2$  м; длина панели 200 м. Физические свойства ( $E$ -модуль Юнга,  $\nu$ -коэффициент Пуассона,  $\rho$ -плотность) слагающих массив пород приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физические и акустические свойства пород

Порода	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$E$ , ГПа	$\nu$	$A$ , м/с	$B$ , м/с	$\alpha$	$s$ , МПа
Песчаник	2400	35	0.25	1700	2500	0.20	2
Уголь	1300	7	0.27	1700	2500	0.20	2

Моделировался процесс отработки панели (стрелкой на рис. 1 показано направление развития очистных работ). В качестве примера на рис. 2 при  $q = 0.7$  приведены изолинии нормальных компонент  $\sigma_{xx}$  и  $\sigma_{yy}$  (отнесены к  $\rho gH$ ) на различных стадиях отработки панели, иллюстрирующие известные факты, а именно, увеличение  $l$  ведет к повышению уровня растягивающих горизонтальных напряжений в кровле отработанного пространства и увеличению протяженности зоны опорного давления. Следует отметить высокий горизонтальный градиент напряжений в окрестности линии  $x = l$ .

Здесь основной интерес представляло распределение  $V$  перед началом выемки запасов, являющееся, по сути, референтной скоростной моделью при томографии среды, а также его эволюция в процессе развития горных работ. Воспользуемся данными лабораторных экспериментов о скоростях упругих волн при различном гидростатическом напряжении  $\sigma$  для углей [4] и песчаников [5]. Приведенные в этих публикациях данные с точностью порядка первых процентов аппроксимируются соотношением

$$V(\sigma)=B-(B-A)\exp(-\alpha\sigma/s), \quad (1)$$

где значения эмпирических параметров  $A$ ,  $B$ ,  $\alpha$  и  $s$  приведены в табл. 1.

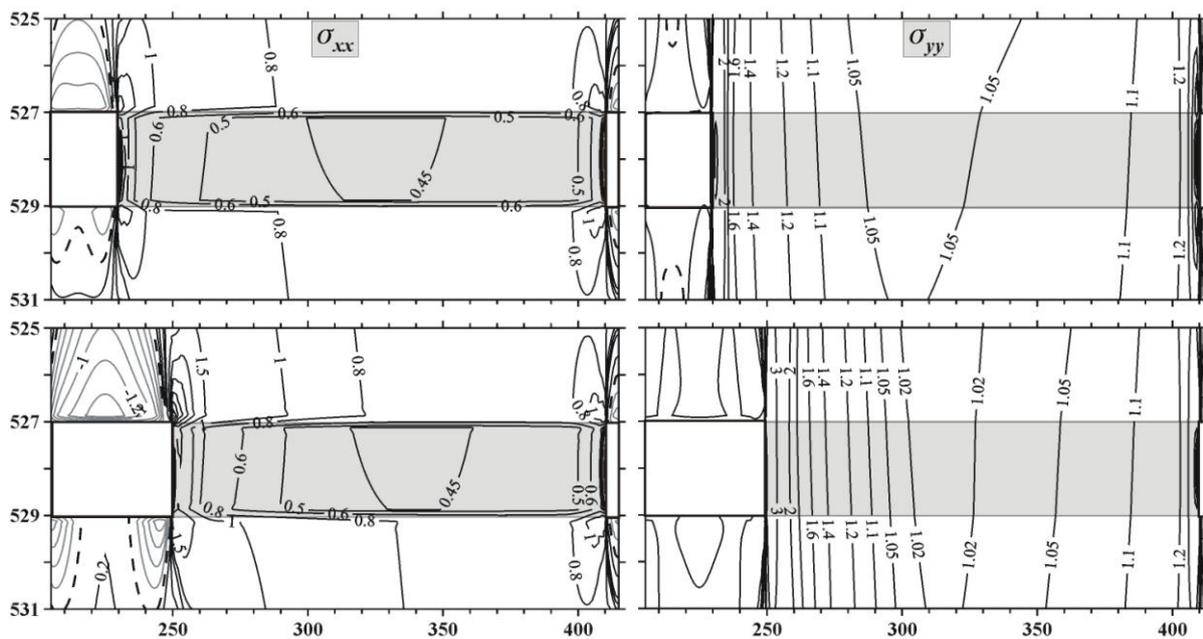


Рис. 2. Изолинии нормальных компонент тензора напряжений  $\sigma_{xx}$  и  $\sigma_{yy}$  при  $q = 0.7$  для  $l = 30$  и  $50$  м

Для модели плоского деформированного состояния  $\sigma = 0.5(1 + \nu)(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$ . Это выражение, рассчитываемое по найденному численно полю напряжений, и использовалось в (1). Рис. 3 (слева  $q = 0.4$ , справа  $q = 0.7$ ) демонстрирует изолинии скоростей продольных волн в окрестности обрабатываемого пласта при  $l = 30$  и  $50$  м.

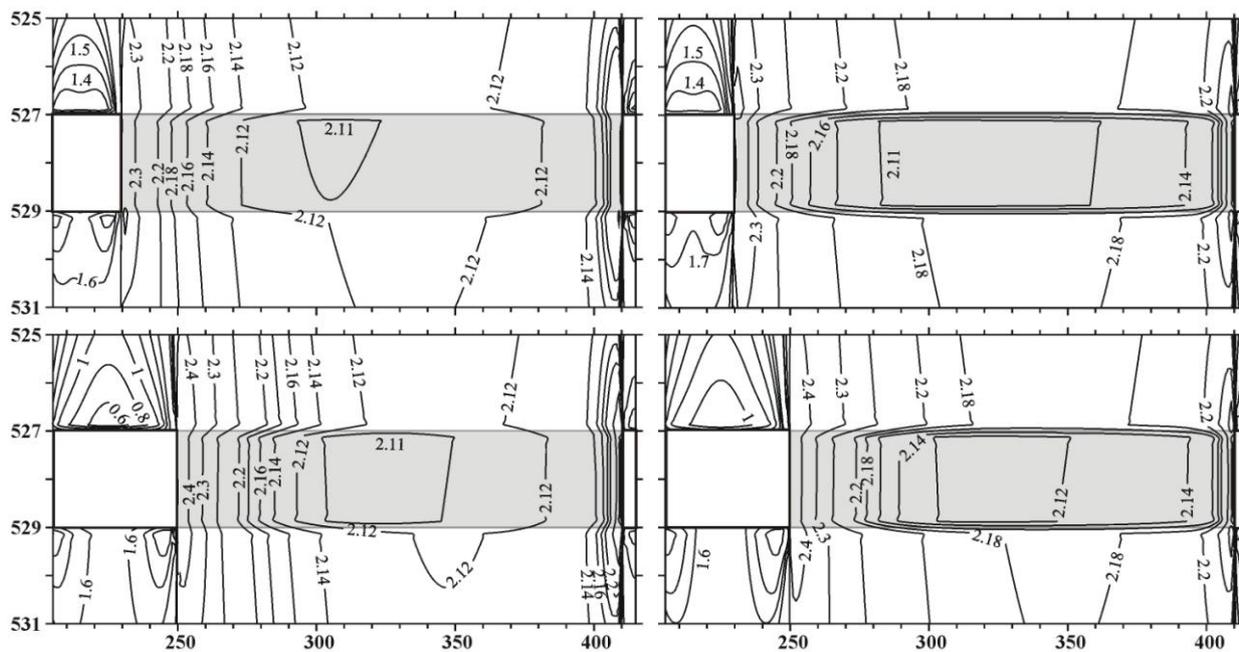


Рис. 3. Изолинии скорости продольных волн (км/с) при  $q=0.4, 0.7$  для различной протяженности выработанного пространства  $l$

Отметим основные особенности распределения  $V$ , которые необходимо принимать во внимание при создании алгоритма томографии пласта:

- ♦ граница пласта с вмещающими породами - контрастная;
- ♦ вследствие небольшой мощности пласта изменение скорости в вертикальном направлении незначительно;
- ♦ с увеличением  $l$  градиент скорости по простиранию пласта  $\Delta V/\Delta x$  уменьшается;
- ♦ возрастание коэффициент бокового отпора  $q$  приводит к снижению величины  $\Delta V/\Delta x$ .

Численные эксперименты показали, что распределение скоростей упругих волн в угольном пласте, обусловленное эволюцией поля напряжений при обработке последнего, имеет выраженную анизотропию: в горизонтальном направлении вариация  $V$  достигает 20-25%, в вертикальном  $V$  – практически не меняется. Этот результат обуславливает необходимость проведения лабораторных экспериментов, призванных выяснить степень влияния различных компонент тензора напряжений на скорость распространения упругих волн в углях.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-00029).*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Назаров Л. А., Назарова Л. А., Эпов М. И. и др. Акустический метод определения напряжений в массиве горных пород на основе решения обратной задачи // Доклады Академии наук. – 2016. – Т. 466. – № 6. – С. 718-721.
2. Назаров Л. А., Назарова Л. А. Некоторые геомеханические аспекты проблемы извлечения газа из угольных пластов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1999. – №. 2. – С. 35-44.
3. Дядьков П. Г., Назаров Л. А., Назарова Л. А. Численное моделирование напряженного состояния земной коры и условий возникновения динамической неустойчивости сейсмоактивных разломов при рифтогенезе // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. – №. 12. – С. 2001-2010.
4. Morcote A., Mavko G., Prasad M. Dynamic elastic properties of coal // Geophysics. – 2010. – Т. 75. – №. 6. – С. E227-E234.
5. Pervukhina M. et al. Applicability of velocity—stress relationships based on the dual porosity concept to isotropic porous rocks // Geophysical Journal International. – 2010. – Т. 181. – №. 3. – С. 1473-1479.

© А. В. Панов, Л. А. Назаров, Л. А. Назарова, А. Л. Карчевский, 2016