

12. Yu Soumian, Yang Pihua, Yu Tian Resonance theory of elastic head waves propagating in a solid layer in tight contact with a thick solid base // *J. Vib. and Control*. — 1998. — 4(3). — С. 219–236.
13. Zheming Zhu, Xiaoliang Zhao, Gonghuan Du Theory of acoustic streaming generated by ultrasonic Lamb waves // *J. Acoust. Soc. Amer.* — 1998. — 104(1). — С. 89–90.
14. Авраменко О.В., Селезов И.Т. Распространение волн вдоль упругого неоднородного слоя в жидкости // *Изв. РАН. МТТ*. — 1996. — №6. — С. 172–182.
15. Hook J.F. Separation of the vector wave equation of elasticity for certain types of inhomogeneous, isotropic media // *J. Acoust. Soc. America*. — 1961. — 33, №3. — С.302–313.

Поступила в редколлегию 14.04.2000

УДК 539.3

И.Е.ШИПОВСКИЙ, канд. техн. наук,
Таврический нац. ун-т, НИИ Проблем геодинамики.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО – ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНОЙ ПОРОДЫ ПРИ ВЗРЫВНОМ РАЗРУШЕНИИ

В рамках механики сплошной среды (МСС) в двумерной плоской и осесимметричной постановках, с применением модифицированного метода конечных элементов (ММКЭ) [1,2] решена задача о динамическом нагружении массива горной породы (ГП) взрывом скважинного заряда (СЗ). Использование выбранной численной методики дает возможность исследовать волновые процессы, возникающие в массиве ГП при взрыве как одиночного, так и системы СЗ ВВ при различных условиях. К ним относятся: варьирование места инициирования заряда ВВ и учет скорости распространения детонации в ВВ, что позволяет рассчитать форму поля напряжений, создаваемого зарядом применяемой конструкции. Численное моделирование процесса взрыва расположенных рядом СЗ ВВ с задержкой подрыва один относительно другого позволяют подбирать из расчета оптимальное время задержки в инициировании зарядов и расстояние между ними. Полученные результаты дают возможность расширить представления о процессах, протекающих в массиве ГП при ее взрывном разрушении.

Проблемы динамического деформирования и разрушения упругопластических тел, к которым в МСС можно отнести горные породы, постоянно являются актуальными в практической деятельности исследователей и инженеров. Трудность их решения обусловлена большим разнообразием параметров, характеризующих физико-механические свойства ГП. Системы уравнений, описывающие поведение таких сред с учетом разрушения – существенно нелинейные, и

их решение, особенно в двух- и трехмерных случаях, может быть получено лишь с использованием численных методов. Применяемая в работе модель разрушения горной породы позволяет описывать эволюцию зон разрушения в массивах ГП с различными физико-механическими характеристиками в зависимости от действующих в них зарядов ВВ.

Решение многих практических задач, требующих расчета НДС и разрушения в массивах горных пород при их взрывном нагружении большей частью проводятся в рамках классических подходов МДГТ. При этом породные массивы, как правило, представляют изотропной средой. При интенсивной разработке месторождений полезных ископаемых актуален учет влияния на процесс взрывной рудоподготовки большого числа технологических факторов и физико-механических характеристик горной породы. В современных условиях, в связи со сложностью проведения натурных испытаний воздействия взрыва на горные породы и другие материалы, широкое распространение получили теоретические подходы, направленные на создание математических моделей горных пород и грунтов. Большое внимание в последнее время уделяется исследованиям процесса разрушения сплошных и пористых материалов, к которым, в известной степени, относятся и горные породы при динамических нагрузках. В настоящее время сложились достаточные предпосылки для успешного решения практически важных задач динамического разрушения.

В двумерной осесимметричной и плоской постановках основная система уравнений движения упруго-идеально-пластического пористого тела имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{r^n} \frac{\partial r^n v}{\partial r}, \\ r \frac{dv}{dt} &= \frac{\partial S_z}{\partial z} + \frac{1}{r^n} \frac{\partial r^n S_{rz}}{\partial r}, \\ r \frac{du}{dt} &= \frac{\partial S_{rz}}{\partial z} + \frac{1}{r^n} \frac{\partial r^n S_r}{\partial r} - n \frac{S_q}{r}, \\ \frac{dE}{dt} &= S \frac{dV}{dt} + V(S_r \&_r + S_z \&_z + S_{rz} \&_{rz} + S_q \&_q). \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь: u, v – компоненты вектора скорости по осям r и z соответственно; $V = r_0 / r$ – относительный объем; $r_0 = r_{0m} / a_0$ – начальная плотность первоначально пористого материала; r – текущая плотность пористого материала; r_{0m} – начальная плотность материала

матрицы горной породы; a_0 – начальная пористость материала; $a = r_m / r$ – текущая пористость материала; $S_r = S + S_r$; $S_z = S + S_z$; $S_q = S + S_q$ – компоненты тензора напряжений; S_r ; S_z ; S_q ; S_{rz} – компоненты девиатора тензора напряжений; $S = -P$ – первый инвариант тензора напряжений; P – гидростатическое давление; E – внутренняя энергия, отнесенная к единице начального объема; n – целочисленный параметр, принимающий значение 0 (плоская симметрия) и 1 (осевая симметрия $\mathcal{E}_r = \partial u / \partial r$; $\mathcal{E}_z = \partial v / \partial z$; $\mathcal{E}_q = (1/V \cdot dV / dt) - \mathcal{E}_r - \mathcal{E}_z$; $\mathcal{E}_{rz} = \partial u / \partial z + \partial v / \partial r$ – компоненты тензора скоростей деформаций. Все величины с индексом m относятся к материалу матрицы, без индекса m к пористому материалу.

Определяющие соотношения для идеально-упруго-пластического тела записываются в виде:

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{1}{a} P_m(r_m, E_m), \\
 2m \left(\mathcal{E}_r - \frac{1}{3V} \frac{dV}{dt} \right) &= \frac{D}{Dt} S_r + I S_r, \\
 2m \left(\mathcal{E}_z - \frac{1}{3V} \frac{dV}{dt} \right) &= \frac{D}{Dt} S_z + I S_z, \\
 m \mathcal{E}_{rz} &= \frac{D}{Dt} S_{rz} + I S_{rz},
 \end{aligned} \tag{2}$$

где $\frac{D}{Dt}$ – производная в смысле Яуманна. Параметр I определяется для случая пластического течения с помощью условия текучести Мизеса

$$S_r^2 + S_z^2 + S_{rz}^2 + S_r S_z = 1/3 S_s^2, \tag{3}$$

где $S_s = S_{ms} [1 - (a - a_0) / (a_k - a_0)]$ – предел текучести на растяжение пористого материала; $m = m_m [1 - (a - a_0) / (a_k - a_0)]$ – модуль сдвига пористого материала; m_m, S_{ms} – соответственно модуль сдвига и предел текучести материала матрицы горной породы; a_0, a_k – начальное и предельно допустимое значение пористости.

Уравнение состояния для горной породы и взрывчатого вещества (пентолит) берутся, соответственно, в виде [3]:

$$\begin{aligned}
 P_m &= K(r_0 / r - 1), \\
 P &= \Gamma_1 r^4 + \Gamma_2 \exp(-\Gamma_3 / r) + \Gamma_4 E r_0 / r,
 \end{aligned} \tag{4}$$

где K – коэффициент объемного сжатия, Γ_{1-4} – константы ВВ.

Для замыкания системы уравнений запишем выражение, устанавливающее связь между давлением P и пористостью a

$$\frac{da}{dt} = -\frac{(a_{00}-1)^{2/3}}{h} a(a-1)^{2/3} \left[|s| - \frac{a_s}{a} \ln\left(\frac{a}{a-1}\right) \right] \text{sign}(s), \quad (5)$$

$$\text{если } |s| < \frac{a_s}{a} \ln\left(\frac{a}{a-1}\right), \text{ то } \frac{da}{dt} = 0,$$

где a_0, a_s, h – константы материала.

Для замкнутой системы (1) – (5) ставится краевая задача с начальными и граничными условиями. Начальные условия отражают факт отсутствия напряжений и перемещений в массиве ГП до начала взаимодействия ВВ и горной породы. Граничные условия соответствуют отсутствию напряжений на свободной поверхности, а на поверхности контакта ВВ и горной породы ставятся условия непрерывности нормальных к контакту составляющих вектора скорости и напряжения.

При решении данной задачи применяются критерии разрушения материала горной породы, например, типа (3), характеризующего хрупкое разрушение. Разрушение "сдвигом" характеризуется достижением критического значения работы пластических деформаций

$$A_p = \int_0^{t_p} \frac{J_2}{m} \left(\sqrt{\frac{k^2}{J_2}} - \frac{k^2}{J_2} \right) dt, \quad (6)$$

где m – модуль сдвига материала; $J_2 = S_r^2 + S_z^2 + S_{rz}^2 + S_r S_z$ – второй инвариант девиатора тензора напряжений; $k = 1/3 \left(\frac{S_s}{a} \right)^2$ – динамический предел текучести при растяжении.

Сформулированная выше задача решается численно с использованием метода ММКЭ [1,2]. При этом среда разбивается на элементы треугольной формы. Из закона сохранения массы для треугольного лагранжева элемента имеем:

$$r_k^n = m_k / [(2pr_k^n)^n A_k^n], \quad (7)$$

где r_k^n – средняя по элементу плотность вещества; r_k^n – координата центра тяжести элемента с номером k , площадью A_k^n и массой m_k .

Следствие закона движения в узле w связанной модели, например, для компоненты скорости v имеет вид:

$$M^w (v_w^{n+1/2} - v_w^{n-1/2}) =$$

$$= -\frac{\Delta t^n}{2} \sum_{k=1}^L \left\{ (2pr_k^n) [s_r^n (z_2^n - z_3^n) + S_{rz}^n (r_3^n - r_2^n)] - \frac{2np}{3} A_k^n s_q^n \right\}_k \quad (8)$$

Уравнение для внутренней энергии на элементе с номером k :

$$m_k (E_k^{n+1} - E_k^n) = (2pr_k^n)^n \Delta t^n \sum_{abg} \{ s_r^n (z_a^n - z_b^n) v_g^n + S_{rz}^n [(z_b^n - z_a^n) v_g^n + (z_a^n - z_b^n) u_g^n + s_z^n (z_b^n - z_a^n) u_g^n] \}_k + \frac{2}{3} np \Delta t^n \sum_{q=1}^3 v_q^n A_k^n s_q^n. \quad (9)$$

Остальные кинематические и термодинамические переменные находятся методом ММКЭ как изложено в [1,2]. Детонация, подрыв и разлет продуктов детонации ВВ рассчитываются по методике Уилкинса [4].

Проведено тестирование как модели, так и выбранного численного метода путем сравнения с полученными разными исследователями

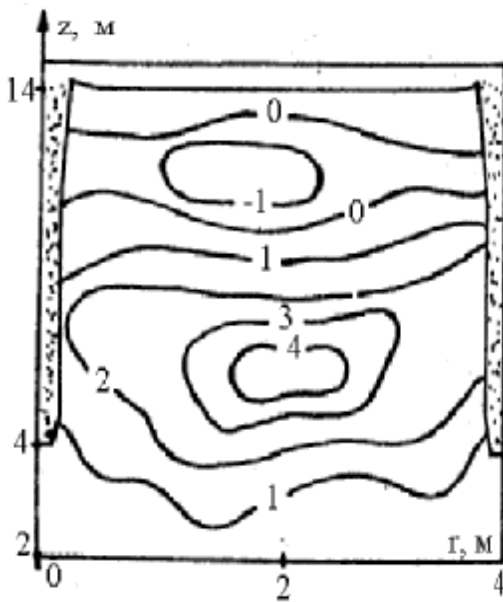


Рис.1

результатами. Сопоставление данных говорит об эффективности ММКЭ и достаточной для практики достоверности получаемых результатов. При помощи описанной выше методики проводились расчеты развития волновой картины для случая плоской геометрии в породном массиве при различных способах расположения и инициирования скважинных зарядов в массиве ГП. При этом рассмотрены задачи одновременного подрыва соседних зарядов при мгновенной детонации ВВ в заряде; подрыв зарядов с задержкой один относительно другого при этих же условиях и с учетом скорости детонации ВВ. Рассмотрены типичные случаи размещения зарядов в породном массиве. Подрыв соседних зарядов с задержкой в 100 мкс иллюстрирует рис. 1. Инициирование производится от верхних торцов зарядов. Изолинии давления показаны на момент $t = 1300$ мкс, когда вещество ВВ обоих зарядов полностью прордетонировало. Поле напряжений имеет сильную неравномерность, значительно большую, чем в случае одновременного подрыва зарядов

результатами. Сопоставление данных говорит об эффективности ММКЭ и достаточной для практики достоверности получаемых результатов.

При помощи описанной выше методики проводились расчеты развития волновой картины для случая плоской геометрии в породном массиве при различных способах расположения и инициирования скважинных зарядов в массиве ГП. При этом рассмотрены задачи одновременного подрыва соседних зарядов при мгновенной детонации ВВ в заряде; подрыв зарядов с задержкой один относительно другого при этих же условиях и с учетом скорости детонации ВВ. Рассмотрены типичные случаи размещения зарядов в породном массиве. Подрыв соседних зарядов с задержкой в 100 мкс иллюстрирует рис. 1. Инициирование производится от верхних торцов зарядов. Изолинии давления показаны на момент $t = 1300$ мкс, когда вещество ВВ обоих зарядов полностью прордетонировало. Поле напряжений имеет сильную неравномерность, значительно большую, чем в случае одновременного подрыва зарядов

при мгновенной детонации ВВ. Почти по всей области расчета выполнилось условие разрушения (3). Задержка в подрыве соседних зарядов позволяет создать существенно неоднородное поле напряжений, обусловленное интерференцией разных по амплитуде и направлению волн и, таким образом, усилить воздействие зарядов на породу в смысле ее измельчения. Рассматривая полученные при решении данной задачи результаты можно сделать вывод, что для сильного взаимодействия волн задержка в подрыве зарядов должна быть соизмерима со временем продвижения волны сжатия на расстояние между зарядами ВВ, что составляет 150... 300 мкс, тогда как в реальных условиях отбойки используются задержки на порядок больше в силу технологических особенностей оборудования. В этих случаях на породу заряды воздействуют последовательно, а значит, для разрушения не используется эффект интерференции волн сжатия.

На рис. 2 представлено поле давлений и скоростей в массиве при

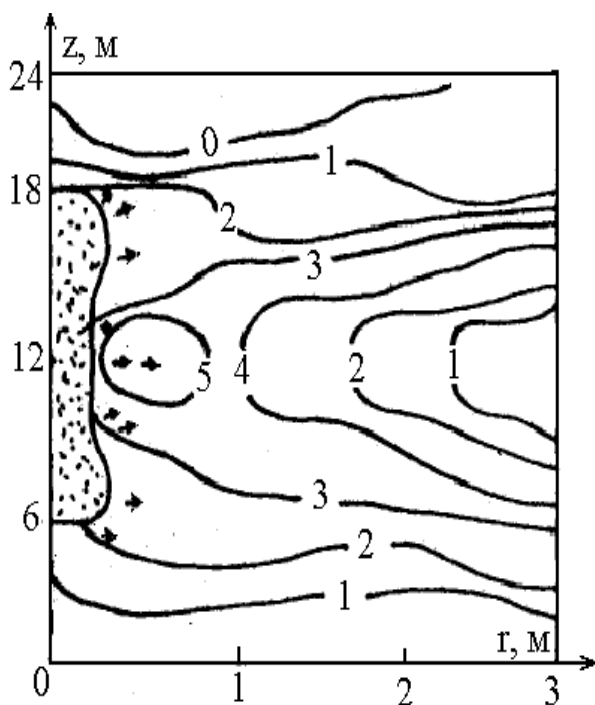


Рис.2

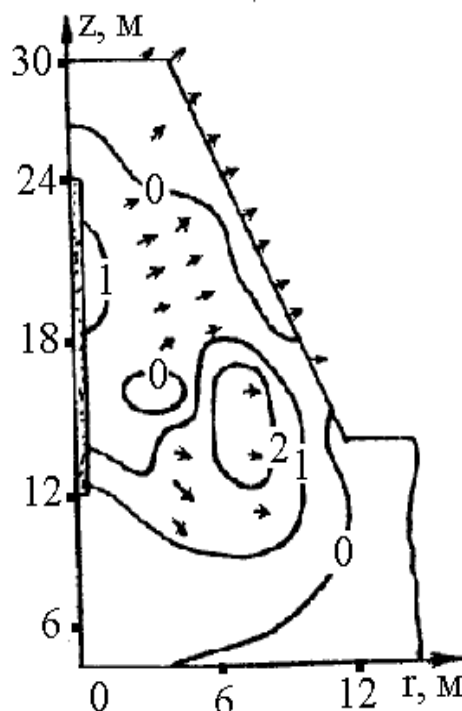


Рис.3

подрыве заглубленного скважинного заряда при инициировании его от противоположных торцов в момент $t=700\text{мкс}$. Скважина с ВВ приняла характерный гантелеобразный вид. Волны детонации ВВ сошлись в центре скважинного заряда, образуя в ближайшей зоне область повышенного давления ($\approx 9\text{ ГПа}$). Области давления, имеющие форму "язычков", последовательно, по мере подхода к плоскости симметрии расчетной области справа, отражаются от нее и образуют

обратные волны сжатия с увеличивающейся амплитудой. Эти волны, помимо движения к заряду, сходятся к центральной части плоскости симметрии. Особый интерес, в силу своего расположения, представляет подрыв заряда в крайнем к откосу уступа ряду, так как в этом случае характерные размеры уступа оказывают существенное влияние на распространение волн сжатия и разгрузки. Поле давлений и скоростей для этого случая представлено на рис. 3 на момент $t=2000$ мкс. К этому времени в верхней части значительно увеличилась область предположительно разрушенной горной породы в смысле условия (3). Частицы верхней части массива ГП имеют тенденцию движения сторону поверхности откоса и вверх, от уровня середины длины заряда - вниз. Фронт волны сжатия продвинулся до 6 – 7 м, максимальное давление упало до 3,5 ГПа. Вслед за ним движется область разгрузки, обусловленная разгрузкой вещества ВВ в скважине. Для зарядов с таким расположением в массиве ГП необходимо выполнение специальных требований, позволяющих провести хорошую проработку основания уступа, чтобы на поверхность вышла достаточно мощная волна сжатия, учитывая геометрические размеры массива ГП.

Проведены расчеты разрушения (осевая симметрия) в массивах сплошных и пористых горных пород при мгновенной детонации оди-

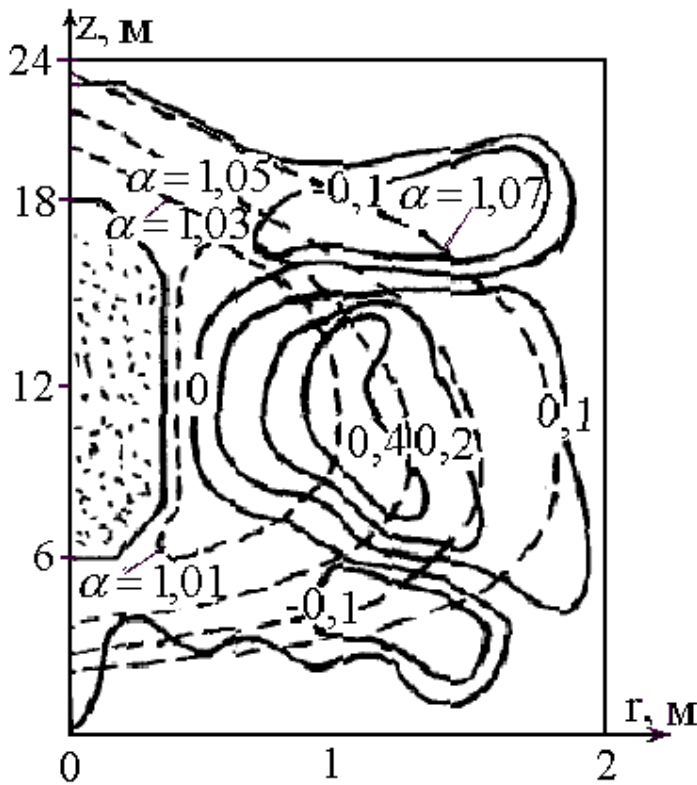


Рис.4

ночного заглубленного СЗ. Так, например, на рис. 4 иллюстрируется картина изменения давления и пористости в массиве, пористость которого α равномерно меняется от величины 1,1 на поверхности земли до 1 (т.е. соответствующей сплошной горной породе) на глубине 30 м. В этом случае НДС, возникающее в массиве ГП при взрыве СЗ ВВ, имеет заметную асимметрию по сравнению со случаем однородного сплошного или пористого массивов.

В верхних, более пористых слоях породы, затухание амплитуды вол-

ны напряжений происходит интенсивнее, чем в нижних, где скорость распространения волны сжатия значительно больше, что и вызывает значительный перекося формы изобар. Прослежена эволюция слагаемых начальной энергии взрыва ВВ во времени для сплошных и пористых горных пород.

На рис. 5 показано изменение составляющих частей начальной энергии взрыва заряда ВВ – энергии взрывчатого вещества E_B , кинетической энергии

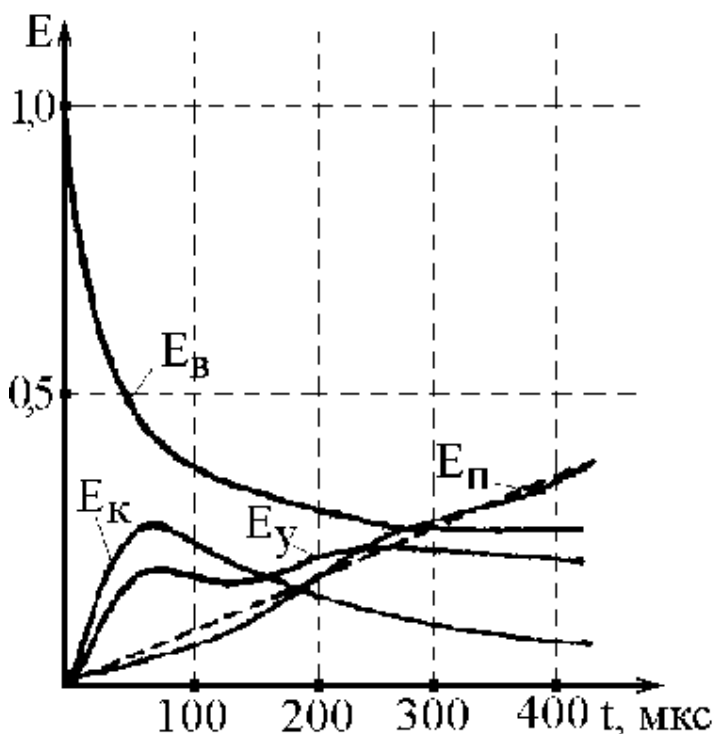


Рис.5

энергии всего массива ГП и взрывчатого вещества E_K , упругой энергии породного массива E_y и необратимой работы пластических деформаций $E_П$. Энергия E_K достигает максимума при $t = 50$ мкс, кривая изменения $E_П$ также как и в случае сплошной горной породы, хорошо аппроксимируется линейной зависимостью $E_П = at$. Сравнивая сплошной и пористый

массивы ГП, изменение во времени необратимой работы пластических деформаций $E_П$ можно приближенно описать $E_П = f(1/a_0)t$ и отметить, что на один и тот же момент времени ее величина для пористой ГП меньше, чем для сплошной породы (25% и 30% соответственно). Также существенна зависимость от пористости материала других слагаемых энергии.

Изучение эволюции баланса энергии взрыва заряда ВВ в массиве ГП по мере распространения импульса сжатия вглубь породного массива дает возможность оценить влияние таких факторов, как подрыв СЗ с замедлением, инициирование в различных местах заряда ВЗ, подрыв заряда специальной геометрической формы на образование зон разрушения в породном массиве и, тем самым, в некотором смысле, оптимизировать процесс разрушения в каждом конкретном случае.

Полученные результаты служат расширению и углублению представлений о процессах, происходящих в породных массивах при от-

бойке руды и позволяет на основе сложившихся представлений совершенствовать методику реализации этих процессов.

Список использованной литературы.

1. Корнеев А.И., Николаев А.П., Шиповский И.Е. Приложение метода конечных элементов к задачам соударения твердых деформируемых тел. // Труды 7 Всесоюзной конф. "Численные методы решения задач теории упругости и пластичности". – Новосибирск: Наука, 1982. – С. 122 – 129.
2. Шиповский И.Е., Локшина Л.Я. Метод расчета напряженно-деформированного состояния породных массивов. // Труды Международной конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» – Новосибирск: СО РАН, 1999. – С. 56 – 60.
3. Физика взрыва. /Под ред. К.П. Станюковича. – М.: Наука, 1975.– 704 с.
4. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений. //Вычислительные методы в гидродинамике. – М.:Мир, 1967. – С. 212 – 263.

Поступила в редколлегию 18.05.2000