

непрерывную загрузку скважины в пределах допустимых значений α_* , решение этой проблемной задачи возможно следующими способами:

- а) использованием дискретно-порционного способа загрузки скважины с периодическим опусканием в скважину тел-рукавов конечной длины с ВВ;
- б) доливанием в скважину воды до необходимого уровня, обеспечивающего попадание на диаграмме состояния в нужную область 1 или 2;
- в) применением комбинированного подхода с использованием в начальной стадии дискретно-порционной загрузки скважины до некоторой глубины, а затем с использованием непрерывной загрузки.

1. В. С. Прокопенко. Динаміка формування свердловинних зарядів вибухових речовин у полімерних оболонках // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут", серія "Гірництво": Збірник наукових праць. – Київ: НТУУ "КПІ": ЗАТ "Технових", 1999. – Вип. 1. – С. 52–67.

УДК 622.235

ВЛИЯНИЕ СПИРАЛЬНОГО ИНИЦИАТОРА НА ПАРАМЕТРЫ ДЕТОНАЦИИ ЗАРЯДОВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

В. Д. Воробьев, докт. техн. наук, А. М. Масюкевич, канд. физ.-мат. наук (НННИОТ), В. Л. Демещук, инж. (ИГМ НАН Украины)

Наведено раціональні параметри спірального ініціатора, що обумовлюють його вплив на зміну енергії, тиску та імпульсу вибуху в свердловині. Показано можливість регулювання напрямку фронту детонаційної хвилі при падінні її на стінку зарядної камери в процесі детонації заряду вибухової речовини і, тим самим, енергії вибуху при дробленні гірських порід.

Качество взрывного дробления скальных пород, характеризующееся заданным гранулометрическим составом горной массы, зависит от механизма разрушения и определяется физико-механическими свойствами разрушаемых горных пород, параметрами взрывного импульса и условиями взрывания [1]. Среди этих факторов параметры импульса взрыва являются определяющими.

Для обеспечения максимальной эффективности взрыва необходимо создать условия полной реализации энергетических возможностей на работу расширения полости [2]. Поэтому параметры импульса взрыва должны соответствовать строению и свойствам горного массива. Такое соответствие обеспечивается соотношением характеристических импедансов взрывчатого вещества (ВВ) и пород, обуславливающим полноту передачи общей энергии E_0 в разрушаемый массив горных пород. При этом величина этой энергии

составляет некоторую долю от полной энергии заряда ВВ, то есть $E_0 = k_n E_n$ (где k_n – коэффициент перехода энергии взрыва заряда в среду) [3, 4].

Для улучшения качества дробления пород необходимо стремиться не к повышению давления, а к увеличению продолжительности взрывного нагружения, что обеспечивает большее количество трещин критического размера [1, 5]. К тому же необходимо учитывать изменение угла встречи детонационной волны ($\lambda_{дв}$) с боковой поверхностью зарядной камеры, от которого зависит давление а, следовательно, и параметры импульса взрыва [6].

В работе [7] отмечается, что изменение величины $\lambda_{дв}$ при падении фронта детонационной волны на границу раздела ВВ–горная порода от 90 до 0° увеличивает давление в скважине в 2...2,5 раза. При этом сделана ссылка на работы [8, 9], в которых указывается, что данный вывод доказан теоретически [8] и подтвержден экспериментально [9, 10], предложены формулы для расчета величины $\lambda_{дв}$ [7, 8, 12]. Однако практические рекомендации применительно к взрыву удлиненных цилиндрических зарядов ВВ в горных породах не разработаны, многие вопросы нуждаются в научном и практическом обосновании.

Впервые идея перераспределения энергии взрыва за счет изменения направления фронта детонационной волны относительно стенок скважины была осуществлена путем применения спирали детонирующего шнура (ДШ) в качестве инициатора комбинированных зарядов ВВ при разрушении гранитов на карьерах [11]. Для конкретных типов промышленных ВВ была рассчитана величина $\lambda_{дв}$ [8]:

$$\lambda_{дв} = \arctg(D/D_{дш}), \quad (1)$$

где D и $D_{дш}$ – скорость детонации ВВ и ДШ, м/с. При этом установлено, что изменение величин $D/D_{дш}$ и $\lambda_{дв}$ в зависимости от D происходит по линейному закону (рис. 1). Значения $D/D_{дш}$ изменяются в пределах 0,51...0,85, а величина $\lambda_{дв}$ – в пределах 21...40°. Для каждого типа ВВ значение $\lambda_{дш}$ является постоянным.

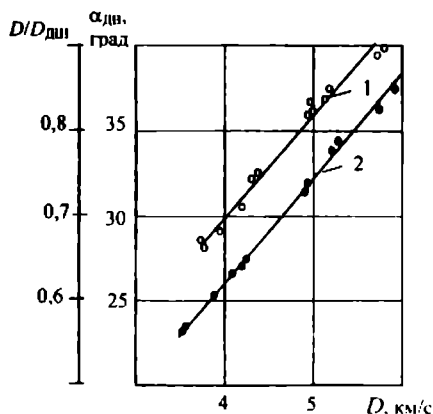


Рис. 1. Зависимость величины отношения $D/D_{дш}$ (1) и $\lambda_{дв}$ (2) от скорости детонации D промышленных ВВ

Анализ результатов экспериментальной проверки эффективности спирального инициатора на гранитных карьерах «Селище-1» и «Селище-2» (Ровенская обл.) показал, что по сравнению с линейным иницированием выход фракций размером 0...200 мм увеличивается на 5,5 %, размером более 500 мм уменьшается на 9,2 %; диаметр среднего куска в развале горной массы меньше в 1,2 раза, выход негабарита – в 1,5 раза [11].

Механизм действия спирального инициатора из ДШ при взрыве зарядов ВВ рассматривался в работах [13, 14]. Однако ряд технологических параметров инициатора (диаметр, угол наклона витка) не получили своего определения и теоретического объяснения. В [13] обосновано условие, при котором отсутствует «захлестывание» последующих витков спирали ДШ детонационной волной от предыдущих витков. Согласно [14], длина одного витка спирали ДШ равна

$$l_{\text{ДШ}} = 2\pi\sqrt{r^2 + h^2}, \quad (2)$$

где r – радиус витка спирали, м; h – шаг спирали, м.

Длина ДШ по всей спирали определяется по формуле

$$L_{\text{ДШ}} = n l_{\text{ДШ}} = 2\pi n \sqrt{r^2 + h^2}, \quad (3)$$

где n – число витков спирали, $n = l/h$; l – длина заряда, м.

Исходя из соотношений параметров спирали и скоростей детонации ДШ и ВВ, получен максимальный шаг спирали, при котором еще наблюдается «захлестывание», когда детонационная волна приходит из точки A в точку K одновременно с приходом импульса по ДШ (рис. 2):

$$h = rD / \sqrt{D_{\text{ДШ}}^2 - D^2}. \quad (4)$$

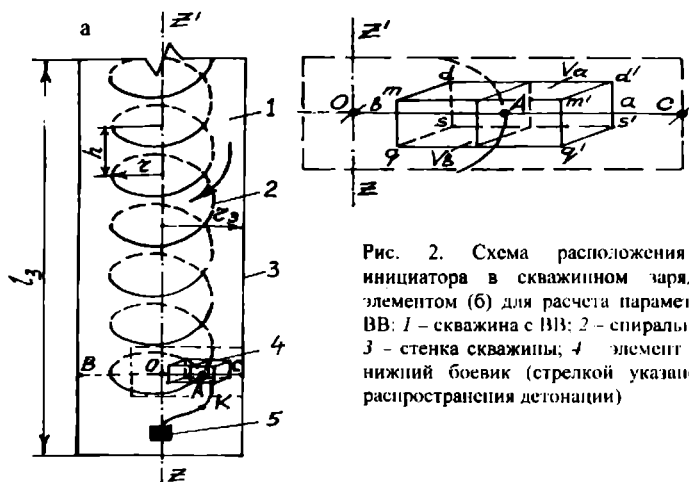


Рис. 2. Схема расположения спирального инициатора в скважинном заряде (а) с его элементом (б) для расчета параметров детонации ВВ: 1 – скважина с ВВ; 2 – спиральный инициатор; 3 – стенка скважины; 4 – элемент заряда ВВ; 5 – нижний боевик (стрелкой указано направление распространения детонации)

Для обеспечения стабильного процесса детонации ВВ шаг спирали должен быть больше h , определяемого по формуле (4). Возможны три варианта расположения спирали (см. рис. 2): $OA < AC$, $OA > AC$ и $OA = AC$. Рассмотрим случай, когда ось спирали совпадает с осью заряда ZZ' , а радиус спирали $r = OA \neq AC$. Для удобства рассмотрения введем следующие обозначения: $AC = a$; $OA = b$. Здесь $b = r = n_r r_s$, $a = r_s - r = (1 - n_r) r_s$, где n_r – доли радиуса заряда r_s ($n_r = 0,1; 0,2; 0,3; \dots 0,9$).

Пусть детонация произойдет в точке A (см. рис. 2), тогда в обе стороны от нее детонационная волна будет распространяться в объемах V_a и V_b , имеющих одинаковые плоскости $mdsq$ и $m'd's'q'$, но различные радиальные составляющие ($a \neq b$). В объеме V_a радиальная составляющая равна a , в объеме V_b радиальная составляющая равна $b + r_s$. Внутренняя энергия продуктов взрыва (ПВ) в этих объемах соответственно равна [15]:

$$E_a = 2\pi Z_s \int_0^a [P_a / (k-1)] r dr = \pi Z_s [P_a / (k-1)] a^2 = \pi Z_s [P_a / (k-1)] r_s^2 (1-n)^2; \quad (5)$$

$$E_b = 2\pi Z_s \int_0^{b+r_s} [P_b / (k-1)] r dz = \pi Z_s [P_b / (k-1)] (r_s + b)^2 = \pi Z_s [P_b / (k-1)] r_s^2 (1+n)^2, \quad (6)$$

где P_a и P_b – давление ПВ в объемах V_a и V_b , Па; k – показатель степени изэнтропы, $k = c_p / c_v$ (где c_p и c_v – удельные теплоемкости при постоянных значениях давления и объема); Z_s – элемент длины параллельно образующей заряда в цилиндрической системе координат.

Отношение этих энергий равно

$$E_a / E_b = P_a a^2 / P_b b^2 = P_a (1-n)^2 / P_b (1+n)^2. \quad (7)$$

Изменяя место расположения линейного инициатора в заряде, можно целенаправленно перераспределять энергию ПВ [7, 12]. Однако такое изменение не влияет на общую внутреннюю энергию $E_{инн}$ ПВ:

$$E_{инн} = E_a + E_b. \quad (8)$$

Если инициатор расположен прямолинейно по длине заряда, то $E_{инн}$ в объеме V , определенная как для V_a и V_b , но в пределах от 0 до r_s , равна

$$E_{инн} = \pi Z_s P r_s^2 / (k-1), \quad (9)$$

где P – давление продуктов взрыва в объеме V , Па.

Подставив (9) в (10), можно записать

$$P r_s^2 = P_a a^2 + P_b b^2, \quad (10)$$

или, учитывая соотношение между a , h и r_s ,

$$P = (1 - n^2) P_a - n^2 P_b. \quad (11)$$

С другой стороны [6], начальная энергия

$$E_{II} = MQ, \quad (12)$$

где M – масса заряда ВВ, кг; Q – удельная теплота взрыва, ккал/кг.

В рассматриваемом случае масса заряда M_a , заключенная в объеме V_a , не будет равна массе заряда M_b , заключенной в объеме V_b . Преобразовав (5) к виду $E_a = P_a V_a / (k - 1)$, а (12) к виду $E_a = M_a Q$ и приравняв их, получим

$$P_a V_a / (k - 1) = M_a Q. \quad (13)$$

Давление P_a можно записать как $P_a = \rho_{ВВ} D^2 / 8 = M_a D^2 / 8 V_a$ (где $\rho_{ВВ}$ – плотность ВВ, кг/м³). Подставив это выражение в (13), получим

$$D = [8(k - 1)Q]^{1/2}. \quad (14)$$

Из анализа (14) следует: чем большее количество тепла выделяется единицей массы ВВ в процессе химической реакции, тем больше будет величина D (рис. 2).

Величина импульса взрыва по направлению АС:

$$I_a = \int_0^a P_a (dr / D) = P_a (a / D) = Pr_r (1 - n_r) / D, \quad (15)$$

или согласно [8]

$$I_a = (16 / 27) \sqrt{M_a E_a}. \quad (16)$$

Подставив значения E_a из (5) в (16) и приравняв правые части формул (15) и (16), получим

$$P_a = (16 / 27)^2 M_a D^2. \quad (17)$$

Длительность импульса взрыва t_a в данном направлении равна

$$t_a = a / D = r_r (1 - n_r) D. \quad (18)$$

Аналогично рассмотрим изменение параметров детонации в направлении АО. Соотношения между P и t в обоих направлениях будут иметь вид

$$P_a / P_b = M_a / M_b = a^2 / b^2 = (1 - n_r)^2 / (1 + n_r)^2; \quad (19)$$

$$t_a / t_b = a / b = (1 - n_r) / (1 + n_r). \quad (20)$$

Выразив массу ПВ в (17) через плотность и объем в правой и левой частях от инициатора, получим зависимость давления в этих частях от отношения r / r_r :

$$P_a / A = (1 - n_r)^2; \quad (21)$$

$$P_b / A = (1 + n_r)^2, \quad (22)$$

где $A = (16 / 27)^2 \rho_{ПВ} \pi r_r D^2$.

Аналогично (21), используя формулы (15) и (16), можно получить зависимость импульса и энергии взрыва от изменения относительного радиуса спирального инициатора, то есть от соотношения r / r_r :

$$I_a / B = (1 - n_r)^3; \quad I_b / B = (1 + n_r)^3; \quad (23)$$

$$E_a / A = (1 - n_r)^4; \quad E_b / A = (1 + n_r)^4; \quad (24)$$

где $B = (16/27)^2 \rho_{\text{ПВ}} \pi r_s D$.

По результатам расчета параметров детонации заряда ВВ (табл. 1) построены их графические зависимости от изменения r/r_s (рис. 3).

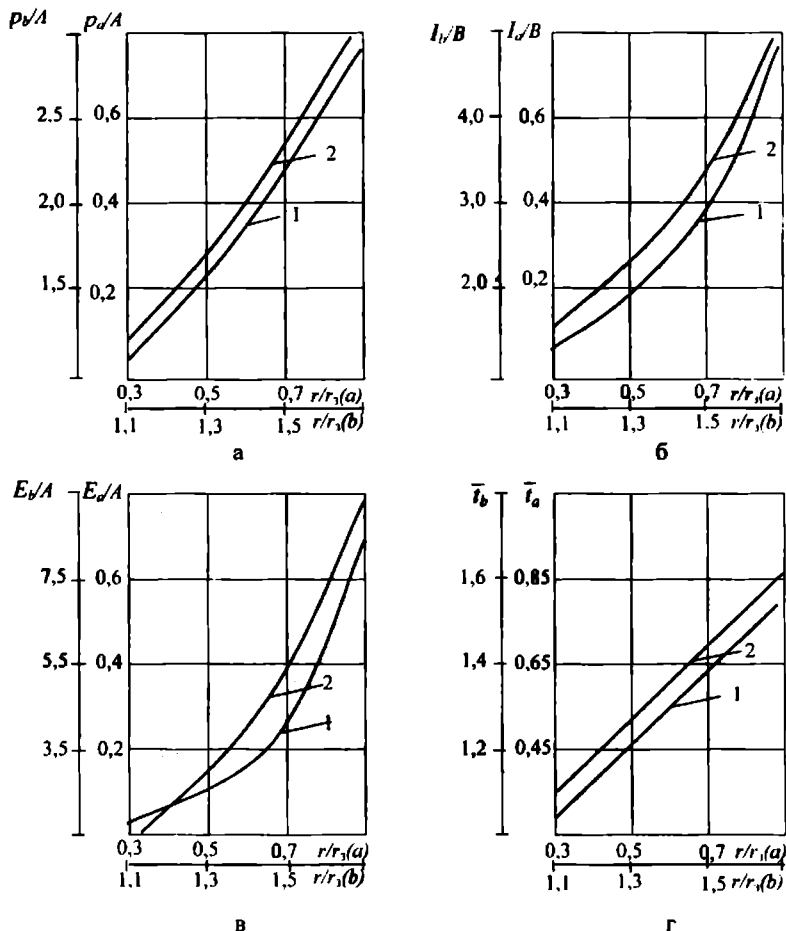


Рис. 3. Зависимость параметров детонации скважинного заряда ВВ от радиуса спирального инициатора в направлении осей a (1) и b (2): а - давление ПВ; б - импульс взрыва; в - энергия; г - продолжительность импульса взрыва

Таблица 1. Результаты расчета параметров детонации заряда ВВ со спиральным инициатором

$1 - n_r(a)$	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
$1 + n_r(b)$	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
P_d/A	0,81	0,64	0,49	0,36	0,25	0,16	0,09
P_b/A	1,21	1,44	1,69	1,96	2,25	2,56	2,89
I_d/B	0,73	0,51	0,34	0,22	0,13	0,06	0,03
I_b/B	1,33	1,73	2,20	2,74	3,38	4,10	4,91
E_d/A	0,66	0,41	0,24	0,13	0,06	0,03	0,01
E_b/A	1,46	2,07	2,86	3,84	5,06	6,55	8,35
t_d/r_3	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
t_b/r_3	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7

Анализ табл. 1 и рис. 3 позволяет сделать вывод о том, что с увеличением радиуса спирального инициатора рассматриваемые параметры детонации заряда возрастают. Это подтверждают приведенные на рис. 3 зависимости 2 (по направлению радиуса b).

Спиральное расположение инициатора в заряде приводит к необычному процессу импульсного воздействия давления ПВ на стенку скважины. После прихода импульса инициатора в точку A от нее вправо на стенку скважины в точке C действует давление P_a , а в противоположную сторону, в точке B – давление P_b (в этом случае $P_b > P_a$). При такой схеме давление распространяется по спирали относительно стенок скважины. На образующей стенки скважины на одной вертикальной линии и в одной горизонтальной плоскости в момент времени t_1 будет действовать давление $P_a < P_b$, далее, в направлении распространения детонации и в момент времени t_2 в аналогичной плоскости $P_b > P_a$. Таким образом, при детонации заряда по спирали распространяются импульсы давления разной величины, многократно воздействующие на стенки скважины. Данный способ иницирования более эффективен по сравнению с каскадным иницированием комбинированных зарядов ВВ, когда в первую очередь взрываются части ВВ, иницирующие от ДШ, а затем от этих частей – ВВ, не иницирующее от ДШ [17, 18].

Из этого следует, что изменяя диаметр спирального инициатора и, таким образом, чередуя слабые и сильные импульсы давления, можно перераспределять энергию взрыва. Например, заряд расположен в скважине диаметром 220 мм, а виток спирали инициатора расположен так, что расстояние AC составляет $0,1r_3$, расстояние AO равно $0,9r_3$. Тогда $P_d/P_b = 0,00277$, то есть P_a составляет $\approx 0,3\%$ от P_b . При $AO = 0,1r_3$, $AC = 0,9r_3$ P_a составляет уже $66,9\%$ от P_b .

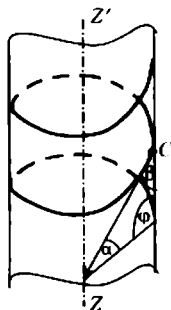


Рис. 4. Схема к пояснению образования углов касательной к витку спирали при падении фронта ДВ на стенку скважины

При прохождении детонационного импульса по прямолинейному инициатору, параллельному оси заряда, фронт ДВ образует с инициатором угол $\alpha_{дв}$, а с боковой стенкой скважины – угол $\varphi = 180^\circ - \alpha$. Инициатор в виде спирали изменяет направление фронта ДВ. В каждой точке спирали можно провести касательную (рис. 4), которая образует с осью заряда (или боковой поверхностью скважины) угол β [16], определяемый по формуле

$$\cos \beta = h / \sqrt{r^2 + h_1^2} . \quad (25)$$

Наклон витка спирали приводит к тому, что фронт ДВ располагается к боковой поверхности скважины под углом

$$\varphi = 180^\circ - \alpha - \beta . \quad (26)$$

Например, для аммонита 6ЖВ $D = 4200$ м/с, $D_{дш} = 7000$ м/с, диаметр скважины $d_c = 220$ мм, угол $\alpha = 31^\circ$, а расчетный угол $\beta = 36^\circ$. Для угла β величина h вычислялась из условия (4). Увеличение шага спирали приводит к уменьшению угла наклона касательной к оси заряда, то есть если $h \rightarrow l$, то $\beta \rightarrow 0$. В предыдущем примере $h = 73,3$ мм, а при увеличении h , например, до 90 мм угол $\beta = 31^\circ$.

1. *Ресурсосберегающие технологии взрывного разрушения горных пород*/ Э. И. Ефремов, В. М. Комир, И. А. Краснопольский, В. П. Мартыненко. – К.: Техніка, 1990. – 149 с.

2. *Сенук В. М. Импульс взрыва и условия более полного использования его на дробление массивов крепких горных пород при скважинной отбойке // ФТПРПИ.* – Новосибирск: СО АН СССР. – 1979. – № 1. – С. 28–34.

3. *Маиуков В. И. Действие взрыва на окружающую среду и способы управления им.* – М.: Недра, 1976. – 248 с.

4. *Ханукаев А. Н. Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом.* – М.: Госгортехиздат, 1962. – 200 с.

5. *Основы теории и методы взрывного дробления горных пород* / Э. И. Ефремов, В. С. Кравцов, Н. И. Мячина и др. – К.: Наук. думка, 1978. – 224 с.

6. *Труфакин Н. Е. Выбор метода тарировки тензометрического датчика для замера давления продуктов детонации* // Теория технологии разработки рудных месторождений. – Новосибирск: ИГМСО АН СССР. – 1969. – С. 167–181.

7. *Комплексные исследования действия взрыва в горных породах* / Э. О. Миндели, Н. Ф. Кусов, А. А. Корнеев, Г. И. Марцинкевич. – М.: Недра, 1978. – 253 с.

8. *Станюкович К. П. Неустановившиеся движения сплошной среды*. – М.: Наука, 1971. – 854 с.

9. *Райнхарт Д., Пирсон Д. Взрывная обработка металлов*. – М.: Мир, 1966. – 391 с.

10. *Sternberg M., Piacesi D. Interaction of Oblique Detonation Waves with Iron* / Phys. Fluids. – 1966. – 9. – № 7. – P. 1307–1315.

11. *Воробьев В. Д. Методы дробления анизотропных пород на основе регулирования параметров импульса взрыва комбинированных зарядов*: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.11. – К., 1995. – 419 с.

12. *Беришвили Г. А., Элизбарашвили Т. Ш. Об эффективности низкочувствительных ВВ при инициировании их боевиками различной конфигурации* // Взрыв. дело. – М.: Недра. – 1976. – № 76/33. – С. 164–178.

13. *Кравец В. Г., Воробьев В. Д., Фролов А. А. Обоснование параметров спирального инициатора при взрывании скважинных зарядов ВВ* / Нац. техн. ун-т Украины «Киев. политехн. ин-т». – К., 1996. – 7 с. – Рус. – Деп. в ГНТБ Украины 26.11.96, № 2245. – Ук 96 // Аннот. в ж. Депонированные научные работы ВИНТИ, № 2 (302), 1996.

14. *Воробьев В. Д., Демещук В. Л. Обґрунтування безпечності висадження свердловинних зарядів в різномісних породах* // Проблеми охорони праці в Україні: 36. наук. праць. – К.: ННДЮП. – 1998. – Вип. 1. – С. 115–121.

15. *Сефов Л. И. Методы подобия и размерности в механике*. – М.: Наука, 1967. – 428 с.

16. *Липтев Г. Ф. Элементы векторного исчисления*. – М.: Наука, 1975. – 336 с.

17. *Эффективность каскадного инициирования комбинированных скважинных зарядов ВВ* / В. Д. Воробьев, И. Ф. Гончар, Н. В. Кривцов, В. И. Куриной // Автоторожник Украины. – К.: Техника. – 1976. – № 1. – С. 35–38.

18. *Исследование процесса детонации комбинированных скважинных зарядов и эффективности их применения при разрушении гранитов* / В. Д. Воробьев, Н. В. Кривцов, В. П. Куриной и др. // Изв. вузов. Горн. журнал. – 1997. – № 2. – С. 82–90.