

УДК 622.235

Горинов Сергей Александрович
доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник
Институт комплексного освоения недр
им. Н.В. Мельникова РАН,
111020, Г. Москва, Крюковский тупик, д. 4
e-mail: akaz@yandex.ru

Маслов Илья Юрьевич
кандидат технических наук,
главный инженер
ООО «Глобал Майнинг Эксплозив-Раша»,
г. Москва,
e-mail: ilmaslov@mail.ru

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ЭФФЕКТИВНОГО ИМПУЛЬСА ПРИ ВЗРЫВЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА

Аннотация:

При взрыве ВВ в скальных породах вблизи заряда формируется область измельчения материала среды. Объем данной области значительно меньше всего объема разрушаемого взрывом материала. Однако в этой области происходит значительная диссипация энергии взрыва вследствие измельчения и (или) пластического деформирования среды. Данный процесс обуславливает уменьшение количества движения, полученного средой вне зоны измельчения при взрыве заряда ВВ. Приведена оценка величины удельного импульса, передаваемого скальной горной породе при взрыве цилиндрического заряда с учетом потерь в зоне измельчения.

Полученные результаты позволяют осуществлять сравнение дробящих способностей различных взрывчатых веществ, что придает им практическую ценность.

Ключевые слова: цилиндрический заряд, удельный импульс, эмульсионные взрывчатые вещества, сенсibilизация, плотность взрывчатого вещества, скорость детонации, газовая пора.

DOI: 10.25635/2313-1586.2022.03.005

Gorinov Sergey A.
Doctor of Engineering Sciences,
Leading Researcher,
Institute of Problems of Complex
Interior Exploitation RAS,
111020 Moscow, 4 Kryukovsky End
e-mail: akaz@yandex.ru

Maslov Ilya Yu.
Candidate of Technical Sciences,
Chief Engineer,
LLC "Global Mining Explosive – Russia",
Moscow
e-mail: ilmaslov@mail.ru

ESTIMATION OF THE MAGNITUDE OF THE EFFECTIVE IMPULSE DURING THE EXPLOSION OF A CYLINDRICAL CHARGE

Abstract:

When explosives detonate in rocks, an area of grinding of the medium material occurs near the charge. The volume of this area is much smaller than the total volume of the material destroyed by the explosion. However, in this area there is a significant dissipation of the explosion energy due to grinding and (or) plastic deformation of the medium. This process causes a decrease in the amount of movement received by the medium outside the grinding zone during the explosion of the explosive charge. The paper gives an estimate of the magnitude of the specific impulse transmitted to the rock during the explosion of a cylindrical charge, taking into account losses in the grinding zone.

The obtained results make it possible to compare the crushing abilities of various explosives, which gives them practical value.

Key words: cylindrical charge, specific impulse, emulsion explosives, sensitizing, explosive density, detonation velocity, gas pore.

Актуальность работы

При взрыве заряда ВВ в окружающей среде под действием расширяющихся продуктов детонации (ПД) возникают деформации, вызывающие разрушение среды. Величина данных деформаций определяется их скоростью и продолжительностью, поэтому разрушение среды при ее импульсивном (взрывном) разрушении будет обусловлено полем скоростей, возникающем в ней при взрыве заряда ВВ [1 – 4]. Характер данного поля определяется количеством движения, переданного среде при расширении продуктов детонации. При этом удельное значение данной величины (на единицу длины) при скважинной отбойке определяется величиной [5 – 8] $I = 2\pi \int_0^{\tau_*} P(t)r dt$, где r – текущий радиус заряда; $P(t)$ – давление в продуктах детонации в момент t ; τ_* – продолжительность действия продуктов взрыва (в среднем составляет 30 – 50 мс); t – текущее время.

При взрыве ВВ в скальных породах вблизи заряда формируется область измельчения материала среды [9]. Объем данной области значительно меньше всего объема разрушаемого взрывом материала. Однако в этой области происходит значительная диссипация энергии взрыва, вследствие измельчения и (или) пластического деформирования среды [9 – 12]. Данный процесс будет также обуславливать уменьшение количества движения, полученного средой вне зоны измельчения при взрыве заряда ВВ. Таким образом, определяющее влияние на характер разрушения основного объема среды будет оказывать не сама величина (1), а лишь некоторая ее часть. В дальнейшем будем называть ее эффективным удельным импульсом.

Представляет интерес оценка данной величины в зависимости от свойств ВВ и механических характеристик разрушаемой горной породы.

Результаты исследований

Приводим решение данной задачи в плоском приближении. ВВ характеризуется следующими параметрами: ρ , D , k – плотность, скорость детонации и коэффициент политропы ВВ, соответственно. Принимаем модель мгновенной детонации. Тогда начальное давление во взрывных газах определяется из выражения [4]:

$$P_* = \frac{\rho D^2}{2(k+1)}. \quad (1)$$

Окружающая среда характеризуется следующими параметрами: ρ_c^o , α , μ , ν , σ_p , C , φ – плотность матрицы среды, начальная пористость, модуль сдвига, коэффициент Пуассона, предел прочности на разрыв ненапряженного материала, сцепление, угол внутреннего трения, соответственно; P_h – литостатическое давление.

Поведение среды в ближней зоне будем описывать законом Кулона – Мора.

Введем цилиндрическую систему координат (r, ϕ) с осью, совпадающей с осью скважинного заряда. Введем обозначения r_{oo} – начальный радиус заряда; r_0^* – радиус границы зоны измельчения.

Рассмотрим слой единичной длины радиусом $r \in [r_{oo}; r_1]$ и толщиной dr .

Работа диссипативных сил в данном слое за время dt равна [14]:

$$d^2 A = 2\pi r \left(\sigma_r \frac{\partial v}{\partial r} + \sigma_\phi \frac{v}{r} \right) dr dt, \quad (2)$$

где σ_r , σ_ϕ – радиальные и тангенциальные напряжения в среде; v – величина скорости смещения.

Величины σ_r и σ_ϕ связаны законом Кулона – Мора:

$$\sigma_\phi = \frac{1}{\eta} (\sigma_r + \sigma_*), \quad (3)$$

где $\eta = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$;

$$\sigma_* = \frac{2(C \cos \varphi + P_h \sin \varphi)}{1 - \sin \varphi} \quad (\text{при гидростатическом распределении горного давления [14]).} \quad (4)$$

Потеря импульса в данном слое будет равна

$$dI = \frac{dA}{v}. \quad (5)$$

Из условия непрерывности имеем [13]

$$\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} = 0. \quad (6)$$

Тогда, учитывая, что в рассматриваемом случае $\frac{\partial v}{\partial t} \approx \frac{dv}{dt}$ [15], на основании (2) - (6)

$$dI = \frac{1}{\eta} \int_0^{\tau_*} [(\eta-1)\sigma_r - \sigma_*] dt. \quad (7)$$

Полная потеря импульса в зоне измельчения на единицу длины будет равна

$$I = \frac{2\pi}{\eta} \int_{r_o}^{r_1} \int_0^{\tau_*} [(\eta-1)\sigma_r - \sigma_*] dt dr. \quad (8)$$

Обозначим через u смещение границы «продукты детонации – среда». Тогда, учитывая политропическую зависимость давления во взрывных газах от занимаемого ими объема, удельную величину эффективного импульса можно определить из следующего уравнения:

$$I_* = 2\pi \left[P_* r_o \int_0^{\tau_*} \frac{dt}{\left(1 + \frac{u}{r_o}\right)^{2k}} - \frac{1}{\eta} \int_{r_o}^{r_1} \int_0^{\tau_*} [(\eta-1)\sigma_r - \sigma_*] dt dr \right]. \quad (9)$$

Оценим значения параметров, входящих в уравнение (9). Материал матрицы среды будем считать несжимаемым, а изменения размеров полости связываем с закрытием пор в ближней зоне и вытеснением материала, окружающего заряд, в пространство.

Положим, что изменение пористости в ближней зоне происходит по линейному закону (дилатансионными эффектами пренебрегаем):

$$\alpha(r) = -\frac{\alpha r_o^*}{r_1 - r_o^*} + \frac{\alpha r}{r_1 - r_o^*}, \quad (10)$$

где r_o^* , r_1 – радиус полости, образовавшейся после взрыва заряда, и радиус зоны смятия, соответственно.

На основании (10) определяем среднюю пористость α^* в зоне смятия:

$$\alpha_* = \frac{2 \int_{r_o^*}^{r_1} \left(-\frac{\alpha r_o^*}{r_1 - r_o^*} + \frac{\alpha r}{r_1 - r_o^*} \right) r dr}{r_1^2 - r_o^{*2}} = \frac{\alpha}{3} \left(1 + \frac{r_1}{r_1 + r_o^*} \right) \approx \frac{2}{3} \alpha, \quad (11)$$

т.к. $\frac{r_1}{r_o^*} > 5$ [13].

Определение τ_* и σ_r осуществляем при следующем упрощающем положении: в области $r_o \leq r \leq r_1$ происходит мгновенное уменьшение пористости с α до $\frac{2}{3}\alpha$.

В дальнейшем среду в ближней зоне будем считать несжимаемой, имеющей плотность $\rho_c \approx \rho_c^o \left(1 - \frac{2}{3}\alpha \right)$.

Тогда движение среды в ближней зоне будет описываться следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_c \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} \\ \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} = 0 \\ \sigma_\varphi = \frac{1}{\eta} (\sigma_r + \sigma_*) \end{array} \right\}. \quad (12)$$

При граничных условиях

$$\sigma_r(r_1) = -\sigma_*, \quad \sigma_r(r_o^*) = -P_{**} \left(1 + \frac{u}{r_o}\right)^{-2k}, \quad (13)$$

где r_o – радиус полости при ее расширении только за счет снижения пористости среды:

$$r_o \approx r_{oo} \sqrt{1 + \frac{\alpha}{3}(z^2 - 1)}; \quad (14)$$

$$P_{**} = P_* \left(\frac{r_{oo}}{r_o}\right)^{2k} = P_* \left(\frac{r_{oo}^2}{r_{oo}^2 + \frac{\alpha}{3}(r_1^2 - r_{oo}^2)}\right)^k \approx \frac{P_*}{\left(1 - \frac{\alpha}{3} + \frac{\alpha}{3}z^2\right)^k}. \quad (15)$$

Через z обозначено отношение $z = \frac{r_1}{r_o^*}$.

В соответствии со вторым уравнением системы решение ищем в виде

$$u = \frac{\lambda(t)}{r}, \quad (16)$$

где $\lambda(t)$ – некоторая функция времени, определяемая из граничных условий.

На основании (12), (13) и (16) получаем

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{2 \sin \phi}{1 + \sin \phi} \frac{\sigma_r}{r} - (\sigma_* + \rho_c \ddot{\lambda}) \frac{1}{r} = 0. \quad (17)$$

Интегрируя (17), имеем

$$\sigma_r = \frac{\sigma_*(1 - \sin \phi)}{2 \sin \phi} + \frac{\rho_c \ddot{\lambda}(1 + \sin \phi)}{2 \sin \phi} + C_1 r^{-\frac{2 \sin \phi}{1 + \sin \phi}}. \quad (18)$$

где C_1 – некоторая функция времени.

Из (18) и первого граничного условия определяем:

$$C_1 = \frac{1 + \sin \phi}{2 \sin \phi} (\sigma_* + \rho_c \ddot{\lambda}) r_1^{\frac{2 \sin \phi}{1 + \sin \phi}}. \quad (19)$$

При взрыве ВВ в скальных горных породах увеличение начального диаметра скважины незначительно [16], поэтому линеаризируем второе граничное условие [17], вводя при этом уточняющий параметр β ($\beta \approx 0,7 - 0,1k$):

$$\sigma_r(r_o^*) \approx -P_{**} \left(1 - \frac{\beta k \lambda}{r_o r_o^*}\right). \quad (20)$$

Тогда на основании (18) – (20) получаем

$$\ddot{\lambda} + \frac{2\beta P_{**} \sin \phi}{r_o r_o^* \rho_c (1 + \sin \phi) \left[(z)^{\frac{2 \sin \phi}{1 + \sin \phi} - 1} \right]} \lambda = \frac{2 \sin \phi}{\rho_c (1 + \sin \phi) \left[(z)^{\frac{2 \sin \phi}{1 + \sin \phi} - 1} \right]} \left[P_{**} + \frac{\sigma_*(1 - \sin \phi)}{2 \sin \phi} \left(1 - \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} z^{\frac{2 \sin \phi}{1 + \sin \phi}} \right) \right]. \quad (21)$$

Учитывая, что $\lambda(0) = 0$, находим

$$\lambda = \frac{r_o r_o^*}{\beta k P_*} \left[P_{**} + \frac{\sigma_*(1 - \sin \phi)}{2 \sin \phi} \left(1 - \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} z^{\frac{2 \sin \phi}{1 + \sin \phi}} \right) \right] (1 - \cos w t), \quad (22)$$

$$\text{где } w^2 = \frac{2\beta k P_{**} \sin \varphi}{r_o r_o^* \rho_c (1 + \sin \varphi) \left(\frac{2 \sin \varphi}{z^{1 + \sin \varphi} - 1} \right)}. \quad (23)$$

На основании (23) определяем τ_* :

$$\tau_* = \frac{\pi}{w}. \quad (24)$$

На основании (18), (19) и (22) получаем (в области $r_o^* \leq r \leq r_1$):

$$\sigma_r(r, t) = \frac{\sigma_*(1 - \sin \varphi)}{2 \sin \varphi} \left[1 - \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \left(\frac{r_1}{r} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} \right] - \frac{\left(\frac{r_1}{r} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} - 1} \left[P_{**} + \frac{\sigma_*(1 - \sin \varphi)}{2 \sin \varphi} \left(1 - \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} z^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} \right) \right]}{\frac{2 \sin \varphi}{z^{1 + \sin \varphi} - 1}} \cos w t. \quad (25)$$

На основании (9), (22) – (25) имеем

$$I_* = \frac{2\pi^2 r_{oo}}{w} \left(\frac{P_*}{2(k-1)(\zeta-1)} \left(1 - \frac{1}{\zeta^{2(k-1)}} \right) - \left(\frac{(1-\sin \varphi)\sigma_* - 2C \cos \varphi}{1 + \sin \varphi} (z - 1) + \frac{2(C \cos \varphi + \sigma_* \sin \varphi)}{1 - \sin \varphi} \left(z - z^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} \right) \right) \right), \quad (26)$$

$$\text{где } \zeta = \frac{r_o^*}{r_{oo}}$$

Необходимо определить значения z и ζ .

Из условия несжимаемости материала матрицы в зоне смятия и (11) имеем

$$(r_1 - \Delta r_1)^2 - r_o^2 = r_1^2 - r_o^{*2}, \quad (27)$$

где Δr_1 – смещение материала на границе зоны смятия.

Величину Δr_1 определяем на основе зонной теории В.Н. Родионова, В.В. Адушкина и др. [18].

Введем следующие обозначения: R_p – радиус зоны радиальных трещин; ΔR – радиальное смещение среды на радиусе R_p .

Согласно [19]:

$$\Delta R = \frac{R_p}{2\mu} (\sigma_{тр} - 2P_h(1 - \nu)), \quad (28)$$

где $\sigma_{тр}$ – радиальное напряжение в среде на границе радиальных трещин.

В рассматриваемом случае

$$\sigma_{тр} = \sigma_p + P_h. \quad (29)$$

Для «столбчатой» зоны [19]:

$$\Delta r_1 = \Delta R + \frac{\sigma_* r_1 (1 - \nu)}{2\mu} \ln \left(\frac{R_p}{r_1} \right). \quad (30)$$

Условие равновесия материала среды между магистральными радиальными трещинами:

$$\sigma_* r_1 = \sigma_{тр} R_p. \quad (31)$$

На основании (27) – (31) получаем

$$\left(\frac{r_o}{r_o^*} \right)^2 \cong 1 - \frac{\sigma_*}{\mu} \left(\frac{\sigma_p - P_h(1 - 2\nu)}{\sigma_p + P_h} + (1 - \nu) \ln \left(\frac{\sigma_*}{\sigma_p + P_h} \right) \right). \quad (32)$$

Исходя из (14) и (30), получаем

$$\zeta^2 \approx \frac{1 + \frac{\alpha}{3}(z^2 - 1)}{1 - \frac{\sigma_*}{\mu} \left(\frac{\sigma_p - P_h(1 - 2\nu)}{\sigma_p + P_h} + (1 - \nu) \ln \left(\frac{\sigma_*}{\sigma_p + P_h} \right) \right)}. \quad (33)$$

Согласно (25) в момент $\tau_* = \frac{\pi}{w}$ имеем

$$\sigma_r(r_o^*, \tau_*) = \frac{\sigma_*(1-\sin\varphi)}{2\sin\varphi} \left(1 - \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} z^{\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi}} \right). \quad (34)$$

Учитывая, что $\sigma_r(r_o^*, \tau_*) = \frac{P_*}{\zeta^{2k}}$, из (34) получаем следующее уравнение для определения z :

$$\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi} \frac{P_*}{\sigma_*} = \left(1 - \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} z^{\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi}} \right) \zeta^{2k}. \quad (35)$$

Выражения (26), (33) и (35) решают поставленную задачу.

Полученные результаты позволяют осуществлять сравнение дробящих способностей различных взрывчатых веществ.

В табл. 1 приведены расчетные значения величины I_* при $r_{o0} = 0,125$ м и двух значений P_h ($P_h=0$ и $P_h=10$ МПа) для различных ВВ (характеристики ВВ приведены в табл. 2) в различных горных породах (показатели механических свойств горных пород, принятые при расчетах, представлены в табл. 3).

Химический состав и структура ЭВВ:

ЭВВ (тип I) $\text{NH}_4\text{NO}_3 - 77,0\%$, $\text{H}_2\text{O} - 16,0\%$, топливная фаза – 7,0 %;

ЭВВ (тип II) $\text{NH}_4\text{NO}_3 - 46,0\%$, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 - 30\%$, $\text{H}_2\text{O} - 16,0\%$, топливная фаза – 8,0 %. Параметры структур ЭВВ полагали идентичными:

радиус сенсibiliзирующих газовых пор 40 мкм (при внешнем давлении 0,1 МПа), размер частиц эмульсии – 3 мкм.

Таблица 1

Удельная величина эффективного удельного импульса $I_* \cdot 10^{-5}$ (кг/с)

Виды ВВ	$P_h = 0$		$P_h = 10$ МПа	
	гранит	песчаник	гранит	песчаник
Аммонит 6 ЖВ	0,91	0,1	1,15	0,57
ЭВВ (тип I)	1,33	0,69	1,45	1,00
ЭВВ (тип II)	1,56	1,17	1,61	1,41

Таблица 2

Характеристики ВВ

ВВ	Плотность ВВ, г/см ³	Скорость детонации, м/с	k	P_* , ГПа
Аммонит 6 ЖВ	1,0	4900	2,6	3,3
ЭВВ (тип I)	1,15	5100	2,9	3,8
ЭВВ (тип II)	1,25	5200	3,2	4,1

Таблица 3

Показатели физико-механических свойств горных пород

Показатели	гранит	песчаник
Сцепление, МПа	120	24
Угол внутреннего трения, град	35	40
Плотность материала матрицы среды, кг/м ³	2700	2710
Пористость	0,02	0,091
Модуль сдвига, ГПа	29	25
Предел прочности на разрыв, МПа	9	9
Коэф. Пуассона	0,23	0,20

Выводы

В работе приведена оценка величины удельного импульса, передаваемого скальной горной породе при взрыве цилиндрического заряда с учетом потерь в зоне измельчения.

Показано, что с увеличением пористости горной породы и снижением ее прочности величина эффективного удельного импульса снижается.

Увеличение горного давления приводит к возрастанию величины эффективного удельного импульса (сейсмический эффект при взрыве увеличивается с ростом горного давления).

ЭВВ с бинарной окислительной фазой (аммиачная селитра + кальциевая селитра) передают больший эффективный удельный импульс по сравнению с ЭВВ с окислительной фазой на основе аммиачной селитры.

Полученные результаты, хотя и имеют оценочное значение, позволяют сократить время и затраты при разработке новых ВВ, что придает им практическую ценность.

Список литературы

1. Власов О.Е., 1957. *Основы теории действия взрыва*. Москва: Изд-во ВИА, 408 с.
2. Ионов В.Н., Огибалов П.М., 1979. *Прочность пространственных элементов конструкций. Ч.1. Основы механики сплошной среды*. Москва: Высшая школа, 384 с.
3. Кузнецов В.М., 1979. Импульсная гидродинамическая теория разрушения и выброса горных пород взрывом. *Взрывное дело*, № 81/38. С. 23 – 30.
4. Баум Ф.А., Станюкович К.П., Шехтер Б.И., 1959. *Физика взрыва*. Москва: Физматгиз, 800 с.
5. Ефремов Э.И., Кравцов В.С., Мячина Н.И. и др., 1979. *Основы теории и методы взрывного дробления горных пород*. Киев: Наукова Думка, 224 с.
6. Сенук В.М., 1979. Импульс взрыва и условия более полного использования его на дробление массивов крепких пород при скважинной отбойке. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 1. С. 28 – 34.
7. Selberg H.L., 1952. Transient compression waves from spherical and cylindrical cavities. *Ark. phys.*, V. 5., № 7, P. 97 – 108.
8. Sharpe I.A., 1942. The production of elastic waves by explosion pressures. *Geophys*, V.7, № 2, P.144 - 152.
9. Покровский Г.И., Федоров И.С., 1957. *Действия удара и взрыва в деформируемых средах*. Москва: Госстройиздат, 276 с.
10. Aboudy J., 1972. Propagation of transient pulses from spherical cavity in viscoelastic medium. *Int. J. Number. Meth, Eng.*, V. 4, № 2, P.289 - 299.

11. Терентьев В.И., 1972. *Управление кусковатостью при поточной технологии добычи руд подземным способом*. Москва: Наука, 200 с.
12. Родионов В.Н., Сизов И.А., Спивак А.А., Цветков В.М., 1976. О поведении среды в зоне разрушения при камуфлетном взрыве. *Взрывное дело*. № 76/33, С. 24 – 39.
13. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., 1987. *Теория упругости*. Москва: Наука, 248 с.
14. Горинов С.А., 1985. *Отбойка напряженных трещиноватых руд плоскими системами зарядов*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук, Свердловск, СГИ, 23 с.
15. Друкованый М.Ф., Кравцов В.С., Чернявский Ю.Е. и др., 1976. Расчет зон разрушения при взрыве цилиндрических зарядов в скальных породах. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 3. С. 70 – 75.
16. Михалюк А.В., Белинский И.В., 1976. Напряженно-деформированное состояние породных массивов при внутренних взрывах. *Взрывное дело*, №76/33, С. 15 – 24.
17. Крюков Г.М., Дугарцыренов А.В., 2007. Динамические поля напряжений и деформаций при камуфлетном взрыве сосредоточенного и удлиненного зарядов с учетом расширения взрывной полости. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 9, С. 13 – 28.
18. Родионов В.Н., Адушкин В.В., Костюченко В.Н. и др., 1971. *Механический эффект подземного взрыва*. Москва: Недра, 224 с.
19. Мартынюк П.А., Шер Е.Н., 1984. Оценка размеров зоны, радиальных трещин, образующихся при камуфлетном взрыве шпурового заряда в хрупкой среде. *Прикладная механика и техническая физика*, № 4, С. 127 – 132.

References

1. Vlasov O.E., 1957. *Osnovy teorii deistviya vzryva* [Fundamentals of the theory of the explosion action]. Moscow: Izd-vo VIA, 408 p.
2. Ionov V.N., Ogibalov P.M., 1979. *Prochnost' prostranstvennykh elementov konstruktssii. Ch.1. Osnovy mekhaniki sploshnoi sredy* [Strength of spatial elements of structures. Part 1. Fundamentals of continuum mechanics]. Moscow: Vysshaya shkola, 384 p.
3. Kuznetsov V.M., 1979. *Impul'snaya gidrodinamicheskaya teoriya razrusheniya i vybrosa gornyykh porod vzryvom* [Pulsed hydrodynamic theory of rock destruction and ejecting by explosion]. *Vzryvnoe delo*, № 81/38. P. 23 – 30.
4. Baum F.A., Stanyukovich K.P., Shekhter B.I., 1959. *Fizika vzryva* [Physics of explosion]. Moscow: Fizmatgiz, 800 p.
5. Efremov E.I., Kravtsov V.S., Myachina N.I. i dr., 1979. *Osnovy teorii i metody vzryvnogo drobleniya gornyykh porod* . [Fundamentals of theory and methods of explosive crushing of rocks]. Kiev: Naukova Dumka, 224 p.
6. Senuk V.M., 1979. *Impul's vzryva i usloviya bolee polnogo ispol'zovaniya ego na droblenie massivov krepkiykh porod pri skvazhinnoi otboike* [The pulse of the explosion and the conditions for its fuller use for crushing solid rock arrays during borehole drilling]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 1. P. 28 – 34.
7. Selberg H.L., 1952. Transient compression waves from spherical and cylindrical cavities. *Ark. phys.*, V. 5., № 7, P. 97 – 108.
8. Sharpe I.A., 1942. The production of elastic waves by explosion pressures. *Geophys*, V.7, № 2, P.144 - 152.
9. Pokrovskii G.I., Fedorov I.S., 1957. *Deistviya udara i vzryva v deformiru-emykh sredakh* [Impact and explosion actions in deformed environments]. Moscow: Gosstroizdat, 276 p.
10. Aboudy J., 1972. Propagation of transient pulses from spherical cavity in viscoelastic medium. *Int. J. Number. Meth, Eng.*, V. 4, № 2, P.289 - 29911.
11. Terent'ev V.I., 1972. *Upravlenie kuskovatost'yu pri potochnoi tekhnologii dobychi rud podzemnym sposobom* [Lumpiness management in the continuous ore mining by underground method]. Moscow: Nauka, 200 p.

12. Rodionov V.N., Sizov I.A., Spivak A.A., Tsvetkov V.M., 1976. O povedenii sredy v zone razrusheniya pri kamufletnom vzryve [On the behavior of the environment in the destruction zone during a camouflage explosion]. Vzryvnoe delo. № 76/33, P. 24 – 39.
13. Landau L.D., Lifshits E.M., 1987. Teoriya uprugosti . [Theory of elasticity]. Moscow: Nauka, 248 p.
14. Gorinov C.A., 1985. Otboika napryazhennykh treshchinovatykh rud ploskimi sistemami zaryadov [Breaking of stressed fractured ores by flat charge systems]. Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk, Sverdlovsk, SGI, 23 p.
15. Drukovanyi M.F., Kravtsov V.S., Chernyavskii Yu.E. i dr., 1976. Raschet zon razrusheniya pri vzryve tsilindricheskikh zaryadov v skal'nykh porodakh [Calculation of destruction zones during the explosion of cylindrical charges in rocks]. Fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh, № 3. P. 70 – 75.
16. Mikhalyuk A.V., Belinskii I.V., 1976. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie porodnykh massivov pri vnutrennikh vzryvakh . [Stress-strain state of rock massifs during internal explosions]. Vzryvnoe delo, №76/33, P. 15 – 24.
17. Kriukov G.M., Dugartsyrenov A.V., 2007. Dinamicheskie polya napryazhenii i deformatsii pri kamufletnom vzryve sosredotochennogo i udlinennogo zaryadov s uchetom rasshireniya vzryvnoi polosti [Dynamic fields of stresses and deformations during a camouflage explosion of concentrated and elongated charges, taking into account the expansion of the explosive cavity]. Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten', № 9, S. 13 – 28.
18. Rodionov V.N., Adushkin V.V., Kostiuhenko V.N. i dr., 1971. Mekhanicheskii effekt podzemnogo vzryva . [Mechanical effect of an underground explosion]. Moscow: Nedra, 224 p.
19. Martyniuk P.A., Sher E.N., 1984. Otsenka razmerov zony, radial'nykh treshchin, obrazuiushchikhsya pri kamufletnom vzryve shpurovogo zaryada v khrupkoi srede [Estimation of the size of the zone, radial cracks formed during the camouflage explosion of a borehole charge in a crushable medium]. Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika, № 4, P. 127 - 132.