
УДК 622.236.4.001.1

Куриной В. П., д-р техн. наук, доцент
Гаркуша И. П., канд. физ.-мат. наук, профессор
(ГВУЗ «НГУ»
Прохорец Л. В.
(ИГТМ НАН Украины)

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
УДАРНЫХ ВОЛН В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ**

Курінний В.П., д-р техн. наук, доцент
Гаркуша І. П., канд. фіз.-мат. наук, професор
(ДВНЗ «НГУ»
Прохорець Л. В.
(ІГТМ НАН України)

**ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ
УДАРНИХ ХВИЛЬ У ПОРИСТИХ СЕРЕДОВИЩАХ**

Kurinnoy V.P., D.Sc. (Tech.), Associate Professor
Garkusha I.P., Ph.D. (Phis-Math.), Professor
(SHEI «NMU»
Prohorets L.V.
(IGTM NAS of Ukraine)

STUDY OF SHOCK WAVES DISTRIBUTION IN POROUS MEDIUMS

Аннотация. При разрушении горных пород взрывом необходимо знать давление, при котором возникает ударная волна и ее параметры. В ходе исследований получены формулы для расчета скорости ударной волны, скорости течения вещества за фронтом ударной волны и объемных плотностей кинетической и потенциальной энергий в зависимости от давления. В качестве примера приведены результаты расчетов скорости ударной волны и скорости течения вещества за ее фронтом в зависимости от давления для песка различной пористости или переизмельченных скальных горных пород. При этом полагалось, что объемом воздуха пор за фронтом ударной волны можно пренебречь.

Получены формулы, определяющие коэффициенты в уравнении Тэта для многокомпонентных конденсированных сред, выраженные через постоянные Тэта для каждой компоненты. Предложены формулы, оценивающие скорость волны напряжений в многокомпонентной среде из конденсированных веществ при высоких давлениях.

Ключевые слова: ударная адиабата, коэффициенты в уравнении Тэта, многокомпонентная конденсированная среда, параметры ударных волн.

Актуальность работы. При разрушении горных пород взрывом необходимо знать давление, при котором возникает ударная волна и ее параметры. Однако удовлетворительного обоснования и объяснения физики явлений, сопровождающих эти процессы, до настоящего времени не существует.

При использовании взрыва важно знать, каким образом возникает ударная волна (УВ) в веществе. Известно, что при ее возникновении вещество за фронтом УВ течет как жидкость, а механизм разрушения вещества в ударной волне существенно отличается от механизма разрушения в волне напряжений. Все величины, описывающие состояние вещества, во фронте УВ испытывают скачок. Можно утверждать, что невозможно рассмотреть ни один технологический процесс с использованием взрыва, не определив, возникает ударная волна или нет [1].

Ударные волны возникают в горных породах и при взрывной отбойке. Горные породы зачастую содержат в порах воздух. В некоторых случаях взрывному нагружению подвергаются также пористые металлы. При этом чрезвычайно важно знать, возникают ли в этом случае УВ, а если возникают, то необходимо определить их параметры.

Материалы и результаты исследований. Рассмотрим среду, состоящую из вещества, ударная сжимаемость которого определяется уравнением Тэта [2]:

$$p = A \left(\left(\frac{\rho}{\rho_{0c}} \right)^m - 1 \right), \quad (1)$$

где p – давление; A , m – постоянные для данного вещества; ρ , ρ_{0c} – соответственно плотность вещества при давлении p и начальная плотность.

Если пренебречь объемом газа за фронтом УВ, то из формулы (1) вытекает, что параметры ударной волны для пористой среды опишутся следующими выражениями:

– скорость вещества за фронтом плоской прямой ударной волны:

$$u = \sqrt{\frac{p}{\rho_0} \left(1 - (1 - \alpha) \left(\frac{p}{A} + 1 \right)^{-\frac{1}{m}} \right)}, \quad (2)$$

где α – пористость вещества;

– скорость ударной волны:

$$D = \frac{1}{\rho_0} \sqrt{p / \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right)} = \sqrt{p / \rho_0 \left(1 - (1 - \alpha) \left(\frac{p}{A} + 1 \right)^{-\frac{1}{m}} \right)}; \quad (3)$$

– плотность вещества за фронтом ударной волны:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1-\alpha} \left(\frac{p}{A} + 1 \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (4)$$

С помощью численных методов получены графики зависимости скорости породы за фронтом ударной волны от давления для сред с различной пористостью, и зависимости скорости ударной волны от давления для тех же сред, из которых следует, что с ростом пористости скорость породы за фронтом ударной волны снижается, а скорость самой ударной волны возрастает.

Кроме того, нами получены зависимости влияния пористости на параметры ударной волны в забойке (табл. 1).

Таблица 1 – Влияние пористости на параметры ударной волны в забойке

Значение пористости	Скорость частиц в забойке, м/с	Давление на фронте ударной волны, ГПа	Скорость ударной волны, м/с
0,10	780	12,20	7770
0,15	910	11,10	6050
0,20	1010	10,10	5425
0,25	1080	9,45	4340
0,30	1150	8,90	3840
0,35	1210	8,40	3460
0,40	1260	8,00	3155
0,45	1310	7,60	2910
0,50	1350	7,30	2700

Кинетическая энергия единицы объема вещества за фронтом УВ w_c равна

$$w_c = \frac{\rho u^2}{2} = \frac{p}{2} \left(\frac{1}{1-\alpha} \left(\frac{p}{A} + 1 \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right). \quad (5)$$

Потенциальную энергию единицы объема вещества за фронтом УВ можно оценить, найдя работу, выполняемую при его адиабатном сжатии. Выполнив несложные преобразования, получим

$$w_p = \frac{A}{m+1} \left(1 - \left(\frac{V_0}{(1-\alpha)V} \right)^{m-1} \right) + A \left(1 - \frac{V(1-\alpha)}{V_0} \right), \quad (6)$$

где V_0 , V – начальный и конечный объемы вещества при его адиабатном сжатии.

Для удельной энергии сжатого вещества в УВ получено

$$w_p = \frac{A}{m+1} \left(1 - \left(\frac{p}{A} + 1 \right)^{\frac{m-1}{m}} \right) + A \left(1 - \left(\frac{p}{A} + 1 \right)^{-\frac{1}{m}} \right). \quad (7)$$

Следует отметить, что при адиабатном сжатии воздух в порах будет нагреваться до очень высокой температуры, будет нагреваться и само вещество. Потери энергии на разрушение вещества при этом будут малы.

Таким образом, полученные формулы позволяют оценить параметры ударных волн в средах, содержащих газ в поровом пространстве.

Теперь рассмотрим среду, состоящую из двух компонент. Пусть вещества компонент распределены равномерно. Первая компонента занимает часть объема вещества α_1 , а вторая – α_2 . Если начальный объем вещества V_0 , то при давлении p объем станет $V = V_1 + V_2$, где V_1 V_2 – объем первой и второй компоненты. Запишем уравнение Тэта для среды и каждой компоненты:

$$p = A \left(\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^m - 1 \right) = A \left(\left(\frac{V}{V_0} \right)^m - 1 \right);$$

$$p = A_1 \left(\left(\frac{\alpha_1 V_0}{V_1} \right)^{m_1} - 1 \right), \quad p = A_2 \left(\left(\frac{\alpha_2 V_0}{V_2} \right)^{m_2} - 1 \right), \quad (8)$$

где A , m ; A_1 , m_1 ; A_2 , m_2 – соответственно коэффициенты в уравнении Тэта для среды, первой и второй компонент.

Так как давление за фронтом ударной волны (УВ) много больше динамических пределов прочности веществ [3, 4], то давление в компонентах будет одинаково. С учетом формул (8), объем V можно записать в виде

$$V_0 \left(\frac{p}{A} + 1 \right)^{-\frac{1}{m}} = V_0 \left(\frac{p}{A_1} + 1 \right)^{-\frac{1}{m_1}} \alpha_1 + V_0 \left(\frac{p}{A_2} + 1 \right)^{-\frac{1}{m_2}} \alpha_2. \quad (9)$$

Уравнение (9) содержит три переменных. В работе [5] получена формула, определяющая давление, необходимое для возбуждения стационарной УВ в веществе

$$p_s = \frac{2\rho_0 C_0^2}{m+1}, \quad (10)$$

где C_0 – скорость продольной волны напряжений в веществе при атмосферном давлении.

Для двухкомпонентной среды получено уравнение для определения коэффициента m

$$\left(\frac{2m}{m+1} + 1\right)^{-\frac{1}{m}} = \alpha_1 \left(\frac{2\rho_0 C_0^2}{A_1(m+1)} + 1\right)^{-\frac{1}{m_1}} + \alpha_2 \left(\frac{2\rho_0 C_0^2}{A_2(m+1)} + 1\right)^{-\frac{1}{m_2}}, \quad (11)$$

где $\rho_0 = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2$; ρ_1, ρ_2 – плотность вещества компонентов.

Уравнение (11) решается численно. Определив m , находим значение коэффициента A для скорости продольной волны напряжений в среде при атмосферном давлении из формулы

$$C_0 = \sqrt{\frac{mA}{\rho_0}}. \quad (12)$$

Кроме этого, определяем давление, необходимое для возбуждения стационарной плоской ударной волны.

В случае, когда среда состоит из n -компонентов, уравнение (11) записывается в виде

$$\left(\frac{2m}{m+1} + 1\right)^{-\frac{1}{m}} = \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i \left(\frac{2\rho_0 C_0^2}{A_i(m+1)} + 1\right)^{-\frac{1}{m_i}}, \quad (13)$$

где i – индекс i -ой компоненты.

Следует отметить, что скорость волны напряжений в многокомпонентной среде зависит от соотношения размеров частиц вещества и длины волны, скорость которой измеряют. Необходимо, чтобы длина волны была много больше размера частиц вещества. Особенно это надо учитывать при определении скорости упругих волн в трещиноватых горных породах.

Скорость волны напряжений C в многокомпонентной среде при давлении p равна [6]

$$C = \sqrt{-\frac{V}{\rho} \cdot \frac{dp}{dV}}, \quad (14)$$

где ρ, V – соответственно плотность среды и её объём при давлении p .

Скорость волны напряжений в среде при давлении p :

$$C = \left(\left(\frac{p}{A} + 1\right)^{\frac{2}{m}} \rho_0 \left(\frac{\alpha_1}{A_1 m_1} \left(\frac{p}{A_1} + 1\right)^{-\left(1 + \frac{1}{m_1}\right)} + \frac{\alpha_2}{A_2 m_2} \left(\frac{p}{A_2} + 1\right)^{-\left(1 + \frac{1}{m_2}\right)} \right) \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (15)$$

Скорость волны напряжений в среде при отсутствии нагружения равна C_0 :

$$C_0 = \left(\rho_0 \left(\frac{\alpha_1}{A_1 m_1} + \frac{\alpha_2}{A_2 m_2} \right) \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (16)$$

Когда среда состоит из n -компонентов, то скорость C_0 равна

$$C_0 = \left(\rho_0 \left(\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\alpha_i}{A_i m_i} \right) \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (17)$$

Если одна из компонент образует скелет, то модуль всестороннего сжатия B_c имеет вид

$$B_c = -V \frac{\sum dp_i}{dV}, \quad (18)$$

где dp_i – приращение давления в i -той компоненте при уменьшении объема среды на dV

$$dp_i = \bar{\alpha}_i dp = -A_i m_i \bar{\alpha}_i \left(\frac{V_{0i}}{V_i} \right)^{m_i+1} \frac{dV_i}{V_{0i}}, \quad (19)$$

где $V_{0i} = \alpha_i V_0$ – объем i -той компоненты ненагруженной среды; $V_i = \bar{\alpha}_i V$ – объем i -той компоненты при увеличении давления на dp .

Когда среда содержит более двух компонент, то учитываем, что на более сжимаемые компоненты действует давление $(1 - \bar{\alpha})p$, где $\bar{\alpha}$ определяет объем менее сжимаемой компоненты.

Таким образом, формулу (19) можно записать в виде:

$$dp_i = -\bar{\alpha}_i A_i m_i \left(\frac{\alpha_i}{\bar{\alpha}_i} \right)^{m_i} \left(\frac{V_0}{V} \right)^{m_i} \frac{dV}{V}. \quad (20)$$

Модуль всестороннего сжатия, в случае образования скелета, равен

$$B_c = \sum \bar{\alpha}_i A_i m_i \left(\frac{\alpha_i}{\bar{\alpha}_i} \right)^{m_i} \left(\frac{p}{A} + 1 \right)^{\frac{m_i}{m}}. \quad (21)$$

Скорость волны напряжений в многокомпонентной среде C_c имеет вид:

$$C_c = \sqrt{\frac{1}{\rho} \sum \bar{\alpha}_i A_i m_i \left(\frac{\alpha_i}{\bar{\alpha}_i} \right)^{m_i} \left(\frac{p}{A} + 1 \right)^{\frac{m_i}{m}}}. \quad (22)$$

Когда волна напряжений распространяется в ненагруженной среде, с большой степенью точности, можно положить, что $\rho = \rho_0$, $\bar{\alpha}_i = \alpha_i$, $p \ll A$ и тогда формула (22) упрощается:

$$C_c = \sqrt{\frac{1}{\rho_0} \sum \bar{\alpha}_i A_i m_i} . \quad (23)$$

При известных скоростях волн напряжений в многокомпонентной среде C_0 , C_{0c} , по формуле (15) можно найти коэффициент m для многокомпонентной среды, а затем коэффициент A . Знание A , m позволяет определить модуль всестороннего сжатия среды при давлениях $p < p_s$. Когда в среде генерируется ударная волна, то во всех случаях скелет не образуется.

Выводы. В результате выполненных исследований получены формулы, позволяющие оценить параметры ударных волн в средах, содержащих газ в поровом пространстве, а также выражения для коэффициентов A и m в уравнениях Тэта для многокомпонентных конденсированных сред, позволяющие определять ударную сжимаемость этих сред при высоких давлениях и параметры ударных волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О механизме разрушения горных пород в ударной волне / И. П. Гаркуша, В. П. Куринной, В. Д. Петренко [и др.] // Высокоэнергетическая обработка материалов. Сб. научн. трудов. – НГАУ. – 1999. – №8. – С. 156–160.
2. Физика взрыва / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович. – М.: Наука, 1975. – 704 с.
3. Куринний, В. П. Фізичні аспекти руйнування гірських порід вибухом / В. П. Куринний. – Дніпропетровськ: НГУ, 2009. – 158 с.
4. Бриджмен, П. В. Новейшие работы в области высоких давлений / П. В. Бриджмен. – М.: ИЛ, 1948 – 345 с.
5. Куринной, В. П. Обоснование эффективности дробления вязких пород с помощью использования шпуровых зарядов оптимальной конструкции / В. П. Куринной, И. П. Гаркуша // «Деформация и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках». Материалы XIX международной научной школы им. академика С.А. Христиановича. – Симферополь: Таврический нац. ун-т, 2009. – С. 121–124.
6. Pain, H. J. The physics of vibrations and waves / H. J. Pain. – London, Imperial college – 1976. – 391 p.

REFERENCES

1. Garkusha, I.P., Kurinnoy, V.P., Petrenko, V.D. and Nikiforova, V.A. (1999), “About of rocks distraction mechanism in shock wave”, *Vysokoenergeticheskaya obrabotka materialov*, no. 8, pp. 156-160.
 2. Baum, F. A., Orlenko, L. P. and Stanyukovich, K. P. (1975), *Fizika vzryva* [Physics of explosion], Nauka, Moscow, Russia.
 3. Kurinnoy, V.P. (2009), *Fizichni aspekty ruynuvannia girskikh porid vybukhom* [Physical aspects of rocks destruction by the explosion], NGU, Dnipropetrovsk, Ukraine.
 4. Bridgmen, P. V. (1948), *Novejshie raboty v oblasti vysokih davleniy* [The latest work in area of high pressures], IL, Moscow, Russia.
 5. Kurinnoy, V. P. and Garkusha, I.P. (2009), “Substantiation effectiveness of crushing of viscosity medium by the use of blasthole charges of optimum construction”, *Materials of XIX International scientific school by nime academic S.A. Hristianovich «Deformation and destruction of materials with defects and dynamic phenomena in mountain breeds and making»*, pp. 121–124.
 6. Pain, H. J. (1976), *The physics of vibrations and waves*, Imperial college, London, GB.
-

Об авторах

Куринной Владимир Павлович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры физики, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (ГВУЗ «НГУ»), Днепропетровск, Украина, nmu@nmu.org.ua.

Гаркуша Игорь Павлович, кандидат физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (ГВУЗ «НГУ»), Днепропетровск, Украина, nmu@nmu.org.ua.

Прохорец Лилия Викторовна, младший научный сотрудник отдела механики горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, igtmanu@yandex.ru.

About the authors

Kurinnoy Vladimir Pavlovich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Associate Professor, Professor of Physics Department, State Higher Educational Institution «The National Mining University» of Ukraine (SHEI «NMU» Ukraine), Dnepropetrovsk, Ukraine, nmu@nmu.org.ua

Garkusha Igor Pavlovich, Candidate of Physics and Mathematics (Ph.D), Professor, Head of Physics Department, State Higher Educational Institution «The National Mining University» of Ukraine (SHEI «NMU» Ukraine), Dnepropetrovsk, Ukraine, nmu@nmu.org.ua

Prohorets liliya Viktorovna, Junior Researcher of Rock Mechanics Department, M. S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, igtmanu@yandex.ru.

Анотація. При руйнуванні гірських порід вибухом необхідно знати тиск, при якому виникає ударна хвиля та її параметри. В ході досліджень одержано формули для розрахунку швидкості ударної хвилі, швидкості течії речовини за фронтом ударної хвилі і об'ємної густини кінетичної і потенційної енергій залежно від тиску. Як приклад приведені результати розрахунків швидкості ударної хвилі і швидкості течії речовини за її фронтом залежно від тиску для піску різної пористості або переподрібнених скельних гірських порід. При цьому вважалось, що поровим об'ємом повітря за фронтом ударної хвилі можна нехтувати.

Одержано формули, що визначають коефіцієнти в рівнянні Тета для багатокомпонентних конденсованих середовищ, виражені через постійні Тета для кожної компоненти. Запропоновано формули, що оцінюють швидкість хвилі напруг в багатокомпонентному середовищі з конденсованих речовин при високому тиску.

Ключові слова: ударна адіабата, коефіцієнти в рівнянні Тета, багатокомпонентне конденсоване середовище, параметри ударних хвиль.

Abstract. When destructing the rocks by explosion, it is necessary to know shock wave pressure and parameters. In the process of this study the authors expressed formulas for calculating speeds of shock wave and matter stream behind the front of the shock wave and volume density of kinetic and potential energies depending on pressure. As an example, speed of shock wave and matter stream behind the front of the shock wave are calculated depending on pressure of sands with various porosity and regrinding rocks. It is assumed that air volume in the pores behind the front of shock wave can be neglected.

The authors present formulas, which specify coefficients in the Teta equation for multicomponent condensed environments with the Teta constant expressed for each component. Formulas are also proposed for evaluating speed of stress wave in the multicomponent environment consisting of condensed matters at high pressures.

Keywords: shock adiabat, coefficients in the Teta equation, multicomponent condensed environment, parameters of shock waves.

Статья поступила в редакцию 06.09.2013
Рекомендовано к публикации д.т.н., проф. С.И. Скипочкой

