**К ТЕОРЕТИЧЕСКОМУ ОБОСНОВАНИЮ
ДЕТОНАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ
ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД**

В. П. Куринной, И. П. Гаркуша

НТУ «Днепровская политехника»

просп. Д. Яворницкого, 19, г. Днепр, 49600, Украина.

E-mail: nmu@nmu.org.ua

Э. И. Ефремов, В. А. Никифорова

Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

ул. Симферопольская, 2-А, г. Днепр, 49005, Украина.

E-mail: office.igtm@nas.gov.ua

Рассмотрены термодинамические процессы, протекающие в зоне химических реакций взрывчатых веществ (ВВ), применяемых для отбойки горных пород скважинными зарядами. При этом исследовано уравнение состояния продуктов детонации (ПД) с показателем адиабаты, независящим от их объема. Исследованы процессы, протекающие при расширении полости взрыва за первые 300 мкс с момента прихода детонационной волны в заданное сечение скважины. За это время расходуется основная часть энергии ПД. В результате выполненных исследований показано, что ширина зоны химических реакций определяет минимальный размер частиц при взрывном разрушении. Важным детонационным параметром является коволюм (недоступный объем для молекул продуктов детонации). Чем больше начальное значение коволюма, тем значительней снижение давления за первые сотни микросекунд.

Ключевые слова: взрыв, продукты детонации, показатель адиабаты.

**ДО ТЕОРЕТИЧНОГО ОБГРУНТУВАННЯ
ДЕТОНАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН
ДЛЯ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД**

В. П. Курінний, І. П. Гаркуша

НТУ «Дніпровська політехніка»

просп. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49600, Україна.

E-mail: nmu@nmu.org.ua

Е. І. Єфремов, В. О. Никифорова

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

вул. Сімферопольська, 2-А, м. Дніпро, 49005, Україна.

E-mail: office.igtm@nas.gov.ua

Розглянуто термодинамічні процеси, що протікають в зоні хімічних реакцій вибухових речовин (ВР), що застосовуються для відбійки гірських порід свердловинними зарядами. При цьому використано рівняння стану продуктів детонації (ПД) із показником адіабати, який не залежить від їхнього об'єму. Досліджено процеси, що протікають під час розширення порожнини вибуху за перші 300 мкс з моменту надходження детонаційної хвилі до заданого перетину сверд-

ловини. За цей час витрачається основна частина енергії ПД. В результаті виконаних досліджень показано, що ширина зони хімічних реакцій визначає мінімальний розмір частинок під час руйнування. Чим менше ширина зони хімічних реакцій, тим менше розмір частинок, на які руйнується порода і більші втрати механічної енергії в зоні зминання. Важливим детонаційним параметром є коволюм (недоступний об'єм для молекул продуктів детонації). Чим більше значення коволюму, тим значніше зниження тиску за перші сотні мікросекунд розширення продуктів детонації. Результати роботи дозволяють розробити вибухові речовини з малою зоною дрібнодисперсного руйнування, обґрунтовувати параметри зарядів з інертними проміжками, що дає можливість знизити величину зони дрібнодисперсного руйнування і розробляти ефективні конструкції свердловинних зарядів для підвищення якості вибухового дроблення. В цій зоні розмір частинок, на які руйнується порода, буде зростати з відстанню від осі свердловинного заряду. Проведені чисельні розрахунки показали, що за час 200 мкс тиск ПД в обраному перетині свердловини спадає до 1 ГПа. Висновки. В результаті виконаних досліджень показано, що ширина зони хімічних реакцій визначає мінімальний розмір частинок під час руйнування. Важливим детонаційним параметром є коволюм. Чим більше початкове значення коволюму, тим значніше зниження тиску за перші сотні мікросекунд розширення зарядної порожнини. Зростання зони хімічних реакцій на порядок призводить до зменшення зони зминання як мінімум на порядок.

Ключові слова: вибух, продукти детонації, показник адіабати.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. На контакте взрывчатого вещества с породой скачок давления, преодолевая сопротивление породы всестороннему сжатию, производит раздавливание и измельчение породы, увеличивая размеры зарядной полости. Давление продуктов детонации снижается и действует на стенки увеличенной полости и образованных волной трещин. Снижая затраты на измельчение в ближней зоне взрыва можно перераспределить ее на весь объем разрушения и таким образом повысить эффективность взрывного разрушения. Поэтому важно рассмотреть процессы, протекающие в зарядной полости и породе на начальной стадии взрыва [1–10]. В настоящее время уравнение состояния продуктов детонации не учитывает взаимодействие составляющих их молекул и зависимость показателя адиабаты от объема ПД. Учет термодинамических параметров, протекающих процессов позволяет рассчитать ширину зоны химических реакций и размер частиц, на которые разрушается порода. Поэтому численная оценка термодинамических процессов на начальной стадии взрыва представляется актуальной.

Цель статьи – теоретическое обоснование детонационных параметров взрывчатых веществ.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Для оценки эффективности разрушающего действия взрыва необходимо знать зависимость скорости породы у стенки скважины от времени. Однако, достаточно точные уравнения состояния для продуктов детонации и породы отсутствуют, поэтому оценка скоро-

сти движения породы у стенок скважины возможна лишь в предположении, что процесс расширения продуктов детонации адиабатический.

Важными детонационным параметром, который используют специалисты по взрыву, является показатель адиабаты. Он имеет две составляющие. Одна составляющая связана с недоступным для молекул продуктов детонации объемом. Другая составляющая, влияющая на показатель адиабаты, определяется числом степеней свободы молекул ПД. При температуре около 1 кК показатель адиабаты для двухатомного газа равен $\gamma = 1,4$. При повышении температуры до 2,3 – 3,5 кК показатель адиабаты монотонно убывает до $\gamma = 1,29$.

Уравнение состояние для ПД

$$P(V - bV_d) = \frac{m}{M} RT, \quad (1)$$

где P , V – давление и объем ПД; V_d – объем ПД при давлении P_d в точке Жуге; b – недоступный для молекул объем 1 м³ ПД при давлении P_d ; m – масса ПД; M – молярная масса ПД; R – газовая постоянная; T – температура ПД.

Уравнение адиабаты для ПД

$$P_d V_d^\gamma (1 - b)^\gamma = P(V - bV_d)^\gamma; \quad P = P_d \left(\frac{1 - b}{\left(\frac{r}{r_0}\right)^2 - b} \right)^\gamma; \quad (2)$$

$$T = T_d \left(\frac{P}{P_d} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}; \quad T = T_d \left(\frac{1 - b}{\frac{V}{V_d} - b} \right)^{\gamma-1} = T_d \left(\frac{1 - b}{\left(\frac{r}{r_0}\right)^2 - b} \right)^{\gamma-1},$$

где r_0 , r – соответственно, радиусы зарядной полости (скважины) до и после взрыва при давлении P ; $\gamma = (i + 2)/i$; (i – число степеней свободы молекул).

При увеличении радиуса скважины в два раза, давление, рассчитанное по приведенной формуле, будет в 4,28 раза больше давления, полученного по обычной адиабате ($n = 3$, $\gamma = 1,29$).

Показатель адиабаты γ можно выразить через показатель n , используемый во взрывном деле

$$\gamma = n(1 - b). \quad (3)$$

Работа ПД определяется по формуле:

$$A = \frac{P_d V_d (1-b)}{\gamma-1} \left(1 - \left(\frac{V_d (1-b)}{V - V_d b} \right)^{\gamma-1} \right). \quad (4)$$

Если положить $V_d = 1 \text{ м}^3$, то работу можно записать в виде

$$\frac{A}{V_d} = \frac{P_d (1-b)}{\gamma-1} \left(1 - \left(\frac{1-b}{\left(\frac{r}{r_0} \right)^2 - b} \right)^{\gamma-1} \right). \quad (5)$$

При увеличении радиуса скважины (шпура) в два раза работа ПД, рассчитанная по приведенной формуле будет в 1,52 раза больше полученной по обычной формуле с показателем адиабаты $n = 3$.

Детонационная волна с шириной зоны химических реакций h , генерирует в породе в волну, ширина фронта которой для скальных пород примерно равна h , то есть с расстоянием давление во фронте возрастает и равно dP/dr . Приращение напряжений сдвига на пути волны Δr можно оценить по формуле

$$\Delta \sigma_s \approx \left\langle \frac{dP}{dr} \right\rangle \Delta r. \quad (6)$$

Если положить, что $\Delta \sigma_s$ равно пределу прочности породы на срез σ_s , то минимальный размер частиц d можно оценить по формуле

$$d \approx \frac{\sigma_s}{\left\langle \frac{dP}{dr} \right\rangle}, \quad (7)$$

$$\text{если } \frac{dP}{dr} = \frac{P_d}{h}, \text{ то } d \approx \frac{\sigma_s \cdot h}{P_d}.$$

То есть, чем меньше ширина зоны химических реакций h , тем меньше минимальный размер частиц, на которые разрушается порода.

Так как для бризантных ВВ $\frac{P}{h} \approx 10^{12} \text{ Па/м}$, то можно сделать вывод о больших потерях механической энергии в зоне смятия. В зоне смятия размер частиц, на которые разрушается порода, будет возрастать с расстоянием от оси скважинного заряда.

Напряжения в зоне смятия убывают по экспоненциальной и степенной зависимостям. Проведенные численные расчеты показали, что за время 200 мкс давление ПД в выбранном сечении скважины убывает до 1 ГПа.

ВЫВОДЫ. В результате выполненных исследований показано, что ширина зоны химических реакций определяет минимальный размер частиц при разрушении. Важным детонационным параметром является коволюм. Чем больше начальное значение коволюма, тем значительней снижение давления за первые сотни микросекунд. Увеличение зоны химических реакций на порядок приводит к уменьшению зоны смятия как минимум на порядок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ракишев Б. Р., Ракишева З. Б., Ауэзова А. М. Скорости и время расширения цилиндрической взрывной полости в массиве горных пород. *Взрывное дело*, № 111/68. М.: МВК по ВД при АГН, 2014. С. 3–17.
2. Одинцев В. Н. Оценка влияния давления во взрывной полости на предразрушение горных пород. *Взрывное дело*, № 115/72. М.: МВК по ВД при АГН, 2016. С. 5–17.
3. Дугарцыренов А. В. К механизму разрушения упругой среды (горной породы) при взрыве сосредоточенного и удлиненного зарядов, *ГИАБ*. 2008. № 3. С. 12–17.
4. Куринной В. П., Гаркуша И. П., Никифорова В. А. Теоретические исследования процессов на начальной стадии расширения зарядной полости скважинного заряда. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. Науково-виробничий журнал. Кременчук, 2017. Вип. 1(19). С. 21–27.
5. Чебенко В. Н., Козловская Т. Ф., Комир В. М. Об особенностях изменения параметров детонации при взрывчатых превращениях различных ВВ. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. Науково-виробничий журнал. Кременчук: КрНУ, 2009. Вип. 1(3). С. 7–13.
6. Куринной В. П., Гаркуша И. П. Определение давления, необходимого для возбуждения ударных волн в горных породах. «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках»: *Материалы XX международной научной школы им. академика С. А. Христиановича*. Симферополь: Таврический нац. ун-т, 2010. С. 196–199.
7. Физика взрыва. Под ред. Л. П. Орленко. Изд. 3. Т.1. М.: Физматлит, 2002. 832 с.
8. Ефремов Э. И., Никифорова В. А., Куринной В. П. Пути повышения эффективности передачи энергии взрыва горным массивам с учетом соотношения физических свойств ВВ и пород. *Информационный бюллетень Украинский союз инженеров взрывников*. 2015. № 3 (28). С. 9–11.
9. Kurinnoy V. P., Garkusha I. P., Nikiforova V. A. Processes of initial state explosion of cavity of explosion of mining hole charge. *Науковий вісник НГУ*. 2016. № 6. Р. 49–54.
10. Воробьев В. В., Помазан М. В., Воробьева Л. Д. Оценка динамического воздействия газокумулятивного потока на дно скважины при взрыве удлиненно-

го заряду. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. Науково-виробничий журнал. Кременчук: КрНУ, 2016. Вип. 1(17). С. 28–38.

TO THEORETICAL RATIONALE OF DETONATION EXPLOSIVES FOR ROCKS DESTRUCTION

V. Kurinnoy, I. Garkusha

Dnipro University of Technology

prosp. D. Yavornitskogo, 19, Dnipro, 49005, Ukraine. E-mail: nmu@nmu.org.ua

E. Yefremov, V. Nikiforova

Institute of Geotechnical Mechanics named by M.S. Poljakov

of National Academy of Sciences of Ukraine

vul. Simferopolska, 2-A, Dnipro, 49005, Ukraine. E-mail: office.igtm@nas.gov.ua

Purpose. Theoretical justification of the detonation parameters of explosives.

Methodology. Thermodynamic method of considering the processes occurring in the charge cavity. **Results.** Thermodynamic processes occurring in the chemical reactions zone of explosives used for breaking rocks by borehole charges are considered. In this case, the equation of state of detonation products (DP) was studied with an adiabatic index independent of their volume. The processes occurring during the expansion of the explosion cavity for the first 300 μ s from the moment a detonation wave arrives at a given section of the well are investigated. During this time, the main part of the DP energy is consumed. As a result of the studies, it was shown that the width of the zone of chemical reactions determines the minimum particle size during blasting destruction. The smaller the width of the chemical reaction zone, the smaller the size of the particles that break down the rock and the greater the loss of mechanical energy in crushed zone. An important detonation parameter is covolume (inaccessible volume for molecules of detonation products). The greater the value of covolume, the greater the pressure drop for the first hundred microseconds of the expansion of detonation products. The **originality** is in apply a thermodynamic approach to the consideration of processes occurring in the chemical reaction zone of explosives for the first 300 μ s from the moment of detonation wave arrival to a given borehole crossing and expansion start of detonation products. **Practical value.** The results of the work allow to develop explosives with a small area of fine fracture, to substantiate the parameters of charges with inert gaps, which makes it possible to reduce the size of the zone of fine fracture and to develop effective charge design to improve the crushing quality. In this zone, the size of the particles of destroyed rock will increase with the distance from the axis of the borehole charge. Numerical calculations showed that during 200 μ s the PD pressure in the selected cross-section of the borehole drops to 1 GPa. **Conclusions.** Studies have shown that the width of the chemical reaction zone determines the minimum particle size during fracture. An important detonation parameter is covolume. The greater the initial value of covolume, the greater the pressure drop over the first hundred microseconds of the charge cavity expansion. Increasing the chemical reaction zone by an order of magnitude leads to a decrease in the crushed zone by at least an order of magnitude.

Key words: explosion, detonation products, adiabatic exponent.

REFERENCES

1. Rakishev, B. R., Rakisheva, Z. B., Auezova, A. M. (2014), "Speeds and time of a cylindrical explosive cavity expansion in a file of rocks", *Vzrivnoe delo*, no. 111/68, pp. 3–17.
2. Odintsev, V. N. (2016), "The estimation of pressure influence in an explosive cavity on destruction of rocks", *Vzrivnoe delo*, no. 115/72, pp. 5–17.
3. Dugaryntsev, A. V. (2008), "To the mechanism of destruction of the elastic medium (rock) at explosion of the concentrated and extended charges", *GIAB*, no. 3, pp. 12–17.
4. Kurinnoy, V. P., Garkusha, I. P., Nikiforova, V. A. (2017), "Theoretical researches of processes on initial stage of expansion charge cavities hole of the charge", *Suchasni resursoenergozberigauchi tehnologiyi girnichogo virobnitstva*, vol. 1, no. 19, pp. 21–27.
5. Chebenko, V. N., Kozlovskaya, T. F. Komir, V. M. (2009), "On the features of the change in detonation parameters during explosive transformations of various explosives", *Suchasni resursoenergozberigauchi tehnologiyi girnichogo virobnitstva*, vol. 1, no. 3, pp. 7–13.
6. Kurinnoy, V. P., Garkusha, I. P. (2010), "Definition of the pressure necessary for excitation of shock waves in rocks", *Deformirovaniye I razrusheniye materialov s defektami I dinamicheskiye yavleniya v gornyh porodah I vyrabotkah: Materialy XX Megzhdunarodnoy nauchnoy shkoly im. akademika S.A. Khristianovicha*, Simpheropol, Ukraine, pp. 196–199.
7. Orlenko, L. P. (2002), *Physica vzryva* [Physics of explosion. Ed. 3rd], in 1 vol. Phizmatlit, Moscow, Russia.
8. Efremov, E. I., Nikiforova, V. A., Kurinnoy, V. P. (2015), "Ways to increase the efficiency of energy transfer of explosion to mountain massifs taking into account the correlation of physical properties of explosives and rocks", *Informatsionniy biuleten Ukrainskiy soyuz ingenerov vzrivnikov*, vol. 3, no. 28, pp. 9–11.
9. Kurinnoy, V. P., Garkusha, I. P., Nikiforova, V. A. (2016), "Processes of initial state explosion of cavity of explosion of mining hole charge", *Naukovy visnik NGU*, no. 6, pp. 49–54.
10. Vorobiev, V. V., Pomazan, M. V., Vorobyeva, L. D. (2016), "Evaluation of the dynamic effect of a gas-cumulative stream on the bottom of a well in the explosion of an elongated charge", *Suchasni resursoenergozberigauchi tehnologiyi girnichogo virobnitstva*, vol. 1, no. 17, pp. 28–38.

Стаття надійшла 02.12.2019.