ГЕОТЕХНОЛОГІЯ

УДК 622.235

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНЫ РАЗРЕЖЕНИЯ ВБЛИЗИ ГРАНИЦЫ НЕГАБАРИТ–ПОЛУПРОСТРАНСТВО НА ВЫБОР МАССЫ НАКЛАДНОГО ЗАРЯДА

А. В. Прокопенко, инж., И. А. Лучко, докт. техн. наук (НТУУ «КПИ»)

Наведено результати дослідження параметрів відбитої хвилі розрідження при падінні ударної хвилі, що пройшла через негабарит, на границю розділу негабарит–нижній півпростір. З урахуванням руйнівної дії відбитої хвилі розрідження отримано формулу для визначення маси накладного заряду, що забезпечує повне руйнування негабариту.
Ключові слова: вибух, заряд, негабарит, руйнування, ударна хвиля.

Приведены результаты исследования параметров отраженной волны разрежения при падении ударной волны, прошедшей через негабарит, на границу раздела негабарит–нижнее полупространство. С учетом разрушающего действия отраженной волны разрежения получена формула для определения массы накладного заряда, обеспечивающей полное разрушение негабарита.
Ключевые слова: взрыв, заряд, негабарит, разрушение, ударная волна.

Results of research on the reflected dilatational wave parameters at falling the shock wave which permeated through the lump, on the interfacial barrier lump–lower half-space are set out. In view of destructive action of the reflected dilatational wave the formula for definition of weight of the mud cap that provides full lump destruction is obtained.
Key words: explosion, mud cap, lump, destruction, shock wave.

Введение. В работе [1] обоснована необходимость и актуальность теоретического исследования действия взрывов накладных зарядов взрывчатых веществ (ВВ), а также показана чрезвычайная сложность проведения таких работ.

Представляя действие взрыва части накладного заряда ВВ в виде действия одномерного камуфлетного взрыва заряда активной массы, авторы [1] рассчитали начальное давление на фронте ударной волны (УВ), возникающей в породе негабаритного куска при взрывах накладных зарядов тротила, аммонита 6ЖВ, граммонита 79/21 и новых бестротиловых смесевых ВВ – комполайтов ПС1, ПС2, ПС3. Для этих ВВ была определена также доля передачи относительного давления от детонационной волны в массив негабарита. В работе [2] приведены результаты расчетов зоны интенсивного дробления скальной горной породы при взрывах указанных выше ВВ, а в работе [3] изложены результаты расчетов радиуса зоны радиальных трещин, а также приведены формулы для определения массы накладных зарядов различных ВВ, взрыв которых обеспечивает полное разрушение негабарита без учета разрушающего действия отраженной волны разрежения, возникающей на границе негабарит–нижнее полупространство и распространяющейся вглубь негабарита. Исследованию этого учета и посвящена данная статья.

Изложение основных материалов исследования. Рассмотрим случай, когда УВ с начальными параметрами P_x, U_x, $D_{уд}$ прошла через негабарит толщиной h и подходит к границе негабарит–песчаная прослойка с параметрами P_h, U_h, D_h. На рис. 1 представлено распределение давления перед набеганием (*а*) и вскоре после набегания УВ на границу раздела. Поскольку в этом случае плотность песка меньше плотности негабарита, то по негабариту пойдет отраженная волна разрежения, то есть в этом случае $P_4/P_h < 1$.

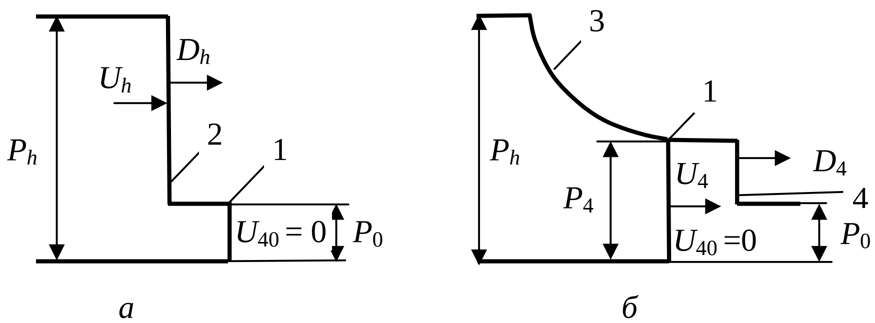

Рис. 1. Схема распределения давления до (*а*) и после (*б*) набегания УВ на границу раздела негабарит–грунтовое полупространство: *1* – граница раздела; *2* – фронт падающей УВ; *3* – фронт волны разрежения; *4* – фронт УВ в грунтовом полупространстве

Условие неразрывности для этого случая имеет вид [4]

$$U_4 = U_h + \Delta U, \tag{1}$$

где U_4 – скорость движения границы раздела; U_h – массовая скорость за фронтом набегающей УВ; ΔU – приращение массовой скорости в волне разрежения.

Приращение скорости ΔU , как известно [5], равно

$$\Delta U = \int_{P_4}^{P_h} \frac{dp}{\rho c_y}, \tag{2}$$

где ρ – плотность породы негабарита; c_y – скорость звука в ней.

Поскольку, по определению,

$$c_y = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)s}, \tag{3}$$

то из (3), дифференцируя по переменной ρ известное уравнение Тэта состояния твердой среды при динамических нагрузках $P = \frac{K}{n}\left[\left(\frac{\rho}{\rho_{0c}}\right)\right]$, получаем

$$c_y^2 = \frac{K}{n}\left(\left(\frac{\rho}{\rho_{0c}}\right)^n - 1\right)' = \frac{K}{\rho_{0c}^n}\rho^{n-1}, \qquad (4)$$

где индексом «штрих» обозначена производная по переменной ρ.

Подставим значения K = 36·10^6 Па и n = 3 в (4). Тогда

$$c^2 = \sqrt{\frac{36\cdot 10^6}{\rho_{0c}^3}\rho^2} = \frac{6\cdot 10^3\rho}{\rho_{0c}^{\frac{3}{2}}} \ . \qquad (5)$$

Подставим (5) в (2). Тогда

$$\Delta U = \int_{P_4}^{P_h} \frac{dP}{\rho\,\dfrac{6\cdot 10^3\rho}{\rho_{0c}^{\frac{3}{2}}}} = \frac{\rho_{0c}^{\frac{3}{2}}}{6\cdot 10^3}\int_{P_4}^{P_h}\frac{dP}{\rho^2}. \qquad (6)$$

Из уравнения Тэта находим

$$\rho^2 = \rho_{0c}^2\left(1+\frac{P}{A}\right)^{\frac{2}{n}}. \qquad (7)$$

Подставим (7) в (6). Тогда (6) (при $n=3, \rho_{0c}=2670$ кг/м^3 и A = $\dfrac{K}{n}=12\cdot 10^6$ Па) примет вид

$$\Delta U = \frac{\rho_{0c}^{\frac{3}{2}}}{6\cdot 10^3}\int_{P_4}^{P_h}\frac{dP}{\rho_{0c}^2\left(1+\dfrac{P}{12\cdot 10^6}\right)^{\frac{2}{3}}} = 0,50718\left(\sqrt[3]{12\cdot 10^6 + P_h} - \sqrt[3]{12\cdot 10^6 + P_4}\right). \qquad (8)$$

Подставим (8) в (1). Тогда

$$U_4 = U_h + \frac{26,207417}{\rho_{0c}^{\frac{1}{2}}}\cdot\left(\sqrt[3]{12\cdot 10^6 + P_h}\right) - \left(\sqrt[3]{12\cdot 10^6 + P_4}\right) \ . \qquad (9)$$

С другой стороны, скорость движения среды (песка) за фронтом образовавшейся в нем УВ равна

$$U_4 = \sqrt{(P_4 - P_0)(V_{04} - V_4)} \ , \qquad (10)$$

где P_0 – начальное давление в песке; V_{04}, V_4 – удельные объемы песка перед и за фронтом УВ.

В рассматриваемом случае $P_0 << P_4$, поэтому (10) можно записать в виде

$$U_4 = \sqrt{P_4\left(V_{04} - V_4\right)} = \sqrt{P_4 V_{04}\left(1 - \frac{V_4}{V_{04}}\right)} = \sqrt{\frac{P_4}{\rho_{04}}\left(1 - \frac{\rho_{04}}{\rho_4}\right)}. \qquad (11)$$

Воспользуемся теперь результатами лабораторных динамических испытаний мелкого песчаного грунта плотностью ρ_{04} = 1600 кг/м^3, влажностью 4 % и гранулометрического состава [6].

Размер частиц, мм	1,00	1,0…0,5	0,5…0,25	0,25…0,1	0,1…0,05	<0,05
Содержание частиц, %	0,00	0,49	56,20	32,74	10,42	0,15

Диаграмма динамического сжатия отыскивалась нами в виде

$$P = q\varepsilon^{\chi}, \qquad (12)$$

где $\varepsilon = \dfrac{\rho_4 - \rho_{04}}{\rho_{04}}$.

Обработкой опытных данных с помощью метода наименьших квадратов получено, что $q = 1{,}815 \cdot 10^9$; $\chi = 1{,}6373$.

Определим из (12) $\dfrac{\rho_{04}}{\rho_4}$. Имеем

$$P = q\left(\frac{\rho_4 - \rho_{04}}{\rho_4}\right)^{\chi} \text{ или } \left(\frac{P}{q}\right)^{\frac{1}{\chi}} = 1 - \frac{\rho_{04}}{\rho_4}. \qquad (13)$$

Подставив (13) в (11), получим

$$U_4 = \sqrt{\frac{P_4}{\rho_{04}}\left(\frac{P_4}{q}\right)^{\frac{1}{\chi}}}. \qquad (14)$$

Соотношения (9) и (14) при известных P_h и U_h полностью определяют начальные параметры отраженной волны разрежения в негабарите P_4 и U_4.

Учитывая, что действие взрыва заряда активной массы m_a на негабарите толщиной h принимается в виде действия камуфлетного взрыва, примем

$$U_h = M\left(\frac{h}{k_0 m_a^{\frac{1}{3}}}\right)^{-\mu_U}, \quad P_h = N\left(\frac{h}{k_0 m_a^{\frac{1}{3}}}\right)^{-\mu_P}, \qquad (15)$$

где $M = U_x$ и $N = P_{xi}$ – начальные значения массовой скорости и давления в отраженной УВ (таблица [1]), $k_0 = (3/4\pi\rho_{\text{ВВ}})^{1/3}$(табл. 1 [2]).

Согласно экспериментальным исследованиям [7–12] для взрывов в граните можно положить $\mu_U = \mu_p = 2$.

Результаты расчетов по второй формуле (15) приведены на рис. 2.

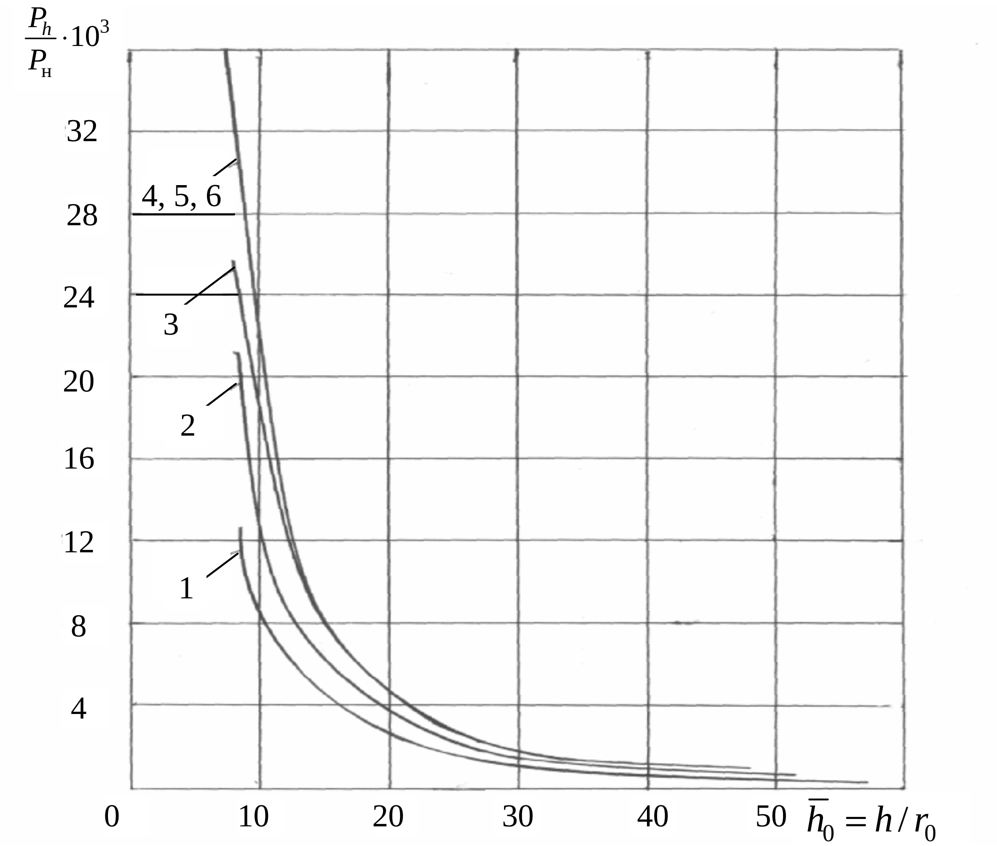

Рис. 2. Зависимость падающего на границу негабарит–полупространство относительного давления от относительной толщины негабарита при взрывах различных ВВ: *1* – ТНТ; *2* – аммонит 6ЖВ; *3* – граммонит 79/21; *4* – комполайт ПС1; *5* – комполайт ПС2; *6* – комполайт ПС3

Из рис. 2 следует, что величина набегающего на границу раздела негабарит–полупространство относительного давления зависит от относительной толщины негабарита по гиперболической зависимости. И чем меньше относительная толщина негабарита, тем больше различие в величинах относительного давления для различных ВВ. При этом кривые, соответствующие более слабым ВВ, располагаются выше кривых, соответствующих более сильным ВВ. Кривые для новых ВВ комполайтов ПС1, ПС2 и ПС3, существенно отличаясь при малых относительных толщинах негабарита от кривой для граммонита 79/21, начиная с относительной толщины $\bar{h}_0$ = 15 практически с ней совпадают при дальнейшем увеличении относительной толщины негабарита.

Исследование зависимости доли передачи давления в отраженную волну разрежения от относительной толщины негабарита при взрывах различных ВВ показало, что кривые, соответствующие различным ВВ и относительным толщинам негабарита, могут быть записаны аналитически в виде степенных функций.

$$\frac{P_4}{P_{н}}10^4 = a_i\left(\frac{h}{r_0}\right)^{-\nu_i} - b_i, \tag{16}$$

где значения параметров a_i, ν_i и b_i приведены в таблице.

Значения параметров формулы (16) для различных ВВ

Номер и название ВВ	Номер участка кривой	Интервал изменения $\bar{h}_0 = \frac{h}{r_0}$	a_i	ν_i	$-b_i$
1. Тротил (ТНТ)	1	$9,466 \le \bar{h}_0 \le 37,864$	16737,165	1,56	14,210
	2	$37,864 \le \bar{h}_0 \le 56,796$	6709,908	1,30	16,569
2. Аммонит 6ЖВ	1	$8,319 \le \bar{h}_0 \le 33,257$	31906,591	1,632	30,366
	2	$33,257 \le \bar{h}_0 \le 49,916$	15069,318	1,40	30,547
3. Граммонит 79/21	1	$7,922 \le \bar{h}_0 \le 31,691$	43394,406	1,694	32,589
	2	$31,691 \le \bar{h}_0 \le 47,536$	17440,701	1,42	33,894
4. Комполайт ПС1	1	$7,156 \le \bar{h}_0 \le 28,624$	53699,528	1,70	52,479
	2	$28,624 \le \bar{h}_0 \le 42,936$	39851,978	1,70	1,04
5. Комполайт ПС2	1	$7,156 \le \bar{h}_0 \le 28,624$	55748,9	1,70	64,703
	2	$28,624 \le \bar{h}_0 \le 42,936$	45545,118	1,70	20,054
6. Комполайт ПС3	1	$7,322 \le \bar{h}_0 \le 29,288$	64012,29	1,763	43,908
	2	$29,288 \le \bar{h}_0 \le 43,932$	53304,904	1,763	13,354

Теперь можно вывести формулу для определения массы заряда, обеспечивающего полное разрушение негабарита с учетом разрушающего действия отраженной волны разрежения. При этом используем известный факт близости пределов прочности отрыву при динамическом и статическом нагружении [12].

Приравняв предел прочности на отрыв давлению, создаваемому волной разрежения на некотором расстоянии z вглубь негабарита от его основания, получим

$$\sigma_p = P_4\left(\frac{z}{r_0}\right)^{-\nu_i}. \tag{17}$$

Из (17) находим расстояние z, на котором волна разрежения разрушит негабарит:

$$z = r_0\left(\frac{\sigma_p}{P_4}\right)^{-\frac{1}{\nu_i}}, \tag{18}$$

где P_4 определяется по формуле (16), а $r_0 = k_0 \cdot m_a^{\frac{1}{3}}$.

Приравняв сумму радиуса зоны растрескивания (формула (2) [3]) и расстояния *z* толщине негабарита *h*, получим

$$m_a^{\frac{1}{3}} \eta k_0 \sqrt[3]{\frac{38}{\rho_{0_c} C_y^2} \rho \quad Q \quad \left(\frac{\rho_0 C_y^2}{250 \quad c} \right)^{\frac{2}{3}}} \sqrt{\frac{c}{p}} + k \; m_a^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\sigma_p}{P_4} \right)^{-\frac{1}{\nu_i}} = h, \tag{19}$$

где η = $(E/3\sigma_c)^{1/3}$; *E* – модуль Юнга породы; σ_c – предел прочности на сжатие; ρ_{BB} и Q_{BB} – плотность и удельная теплота взрыва ВВ; σ_p – предел прочности на растяжение.

Так как $m_a = (0{,}1...0{,}15) m$, то формулу, определяющую массу накладного заряда для полного разрушения негабарита, с учетом разрушающего действия отраженной волны разрежения, можно записать в виде

$$m = \frac{\zeta h^3}{(0{,}1...0{,}15) \left[\eta k_0 \sqrt[3]{\frac{38}{\rho_0 C_y^2} \quad Q \quad \left(\frac{\rho_0 C_y^2}{250 \quad c} \right)^{\frac{2}{3}}} \sqrt{\frac{c}{p}} + k \left(\frac{\sigma_p}{P_4} \right)^{-\frac{1}{\nu_i}} \right]^3}, \tag{20}$$

где ζ – экспериментальный коэффициент.

Полученная формула позволяет прогнозировать результаты взрывов накладных зарядов различных ВВ при разрушении различных твердых тел, в том числе и негабаритов твердых горных пород. Этому будет посвящена следующая публикация.

1. *Прокопенко А. В., Лучко И. А.* Исследование закономерностей передачи давления при взрыве накладных зарядов различных взрывчатых веществ на контакте заряд–негабарит. – Вісник НТУ України "Київський політехнічний інститут". Серія "Гірництво": Збірник наукових праць. – К.: НТУУ "КПІ", 2007. – Вип. 15. – С. 3–10.

2. *Прокопенко А. В., Лучко И. А.* Определение размеров зоны интенсивного дробления в негабаритных кусках скальной горной породы при взрывах накладных зарядов различных взрывчатых веществ. – Вісник НТУ України "Київський політехнічний інститут". Серія "Гірництво": Збірник наукових праць. – К.: НТУУ "КПІ", 2008. – Вип. 16. – С. 25–31.

3. *Прокопенко А. В., Лучко И. А.* Определение радиуса зоны радиальных трещин в негабаритных кусках твердой горной породы при взрывах накладных зарядов различных взрывчатых веществ. – Вісник НТУ України "Київський політехнічний інститут". Серія "Гірництво": Збірник наукових праць. – К.: НТУУ "КПІ", 2008. – Вип. 17. – С. 52–59.

4. *Физика взрыва* / Под ред. Л. Н. Орленко. Изд. 3-е, перераб. – В 2-х томах. – М.: Физматгиз, 2002. – Т. 1. – 832 с.

5. *Зельдович Я. Б., Компанеец А. С.* Теория детонации. – М.: Госуд. изд. технико-теорет. литерат., 1955. – 268 с.

6. *Иванов П. Л.* Уплотнение несвязных грунтов взрывами. – М.: Стройиздат, 1967. – 171 с.

7. *Поведение грунтов* под действием импульсных нагрузок / А. А. Вовк, Б. В. Замышляев, Л. С. Евтерев, И. В. Белинский, А. В. Михалюк. – К. – Наук. думка, 1984. – 288 с.

8. *Михалюк А. В.* Горные породы при неравномерных динамических нагрузках. – К.: Наук. думка, 1980. – 154 с.

9. *Азаркович А. Е., Шуйфер М. И., Тихомиров А. П.* Взрывные работы вблизи охраняемых объектов. – М.: Недра, 1985. – 213 с.

10. *Азаркович А. Е., Фишман Ю. А., Шуйфер М. И.* Взрывная подготовка оснований гидротехнических сооружений. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 112 с.

11. *Ефремов Э. И., Петренко В. Д., Пастухов А. И.* Прогнозирование дробления горных массивов взрывом. – К.: Наук. думка, 1990. – 120 с.

12. *Sassa K., Ito J.* On the relation between the strength of a rock and pattern of breakage by blasting // Adv. Rock. Mech. Washington D.C. – 1974. – Part B. – P. 1501–1505.