УДК 624.39.329

ДО РОЗРАХУНКУ ОПТИМАЛЬНОЇ ДОВЖИНИ ЗАБИВКИ ШПУРОВОГО ЗАРЯДУ

Н. С. Ремез, докт. техн. наук, С. О. Крайчук, асп. (Інститут гідромеханіки НАН України)

Приведены результаты теоретических исследований по определению оптимальной длины забойки шпурового заряда, установлены аналитические функциональные зависимости отношения длины забойки к длине заряда от их плотностей.

Ключевые слова: взрыв, шпуровой заряд, забойка, оптимальная длина.

Наведено результати теоретичних досліджень по встановленню оптимальної довжини забивки шпурового заряду, встановлені аналітичні функціональні залежності від відношення довжини забивки до довжини заряду від їх щільностей.

Ключові слова: вибух, шпуровий заряд, забивка, оптимальна довжина.

Results of theoretical investigation on definition of optimal tamping length of blast-hole charge are given; analytical functional dependences from the relationship of tamping length to charge length from their density are established.

Key words: explosion, blast-hole charge, tamping, optimal length.

Аналіз стану проблеми. На даний час сучасні технології ведення підривних робіт передбачають широке застосування у вибуховій справі зарядів вибухових речовин циліндричної форми (наприклад, шпурові або свердловинні заряди). У багатьох важливих для практики випадках такі заряди є ефективнішими, ніж сферичні або близькі до сферичних [1–3].

Початкова деформація гірської породи при умові її контакту з детонуючим шпуровим або свердловинним зарядом визначається величиною імпульсу, що передається під час вибуху в породу. При цьому на ефективність вибуху суттєво впливає забивка. Підтвердженням впливу забивки може бути той факт, що під час вибуху слабкої ВР (ігданіт, динаміт, амоніт № 8 та ін.) початковий тиск у зарядній камері досягає десятків тисяч атмосфер, що набагато перевищує опір міцності будь-якої породи. Однак при відсутності забивки вибух такого шпурового заряду в багатьох випадках не викликає відчутних руйнувань в оточуючій його гірничій масі. Це відбувається тому, що завдяки вільному осьовому вильоту продуктів вибуху тиск у шпуровому просторі швидко падає, внаслідок чого питомий імпульс вибуху може виявитися меншим за його критичне значення для даної породи.

Ефективність впливу забивки на величину імпульсу тиску при проведенні вибухових робіт залежить як від довжини забивки, так і від властивостей матеріалу, з якого вона виготовлена. Правильний вибір матеріалу забивки та її довжини має досить велике практичне значення для збільшення корисної потужності вибуху. Отже, застосування забивки є одним із засобів управління дії вибуху.

На процес вильоту забивки впливають різні фактори. Проте опір матеріалу і довжина (маса) забивки є основними факторами, що визначають умови роботи забивки під час вибуху. У процесі вильоту зі шпуру забивка, внаслідок дії сил тертя, не ковзає по стінках шпуру, а зрізується по циліндричній поверхні, що збігається з боковою поверхнею шпуру [4].

У реальних умовах при вильоті забивки маса останньої змінюється під дією змінної сили, оскільки частина забивки при виході за межі шпуру розсипається і продукти вибуху витікають через утворені тріщини, а тиск вибухових газів змінюється від нуля до максимального. Проте, враховуючи швидкоплинність вибухового процесу, можна припустити, що забивка до повного її вильоту із шпуру рухається прямолінійно у вигляді суцільного тіла. У цьому випадку має місце виліт продуктів детонації в сукупності із вильотом (метанням) забивки. Задача про метання тіл продуктами детонації вперше була розглянута К. П. Станюковичем [5].

Мета роботи – отримання аналітичних залежностей для розрахунку оптимальної величини забивки шпурового заряду у вигляді функції від властивостей ґрунту і забивки.

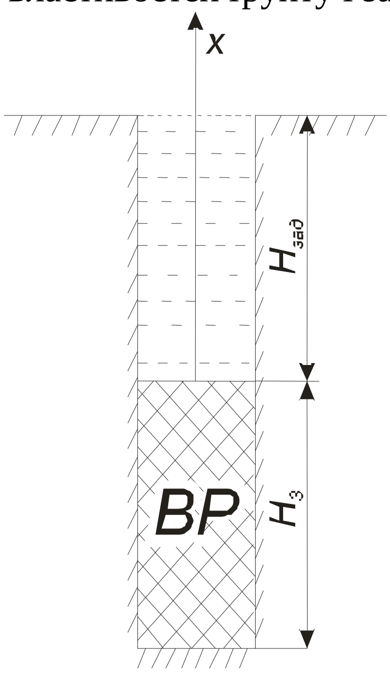

Рис. 1. Схема до розрахунку

Матеріал і результати досліджень. Нехай $H_з$ – довжина заряду, $H_{заб}$ – довжина забивки, m – маса заряду і M – маса забивки (рис. 1). Відразу після початку руху межі розділу продукти детонації–забивка у продуктах детонації пройде хвиля розрідження, рух якої описується Рімановськими розв'язками рівнянь газодинаміки, які при ізентропному законі розширення продуктів детонації

$$pV^3 = \text{const}$$

мають вигляд

$$\begin{cases} x = (v - c)t + F(v) \\ v + c = \text{const} \end{cases}, \qquad (1)$$

де x – координата; t – час; p, V, v – тиск, об'єм і швидкість вильоту продуктів детонації; $c_н$ – швидкість звуку у продуктах детонації. Врахувавши граничні умови t = 0, x = 0 і v = 0, $c = c_н$, визначимо функцію $F(v)$ та const: $F(v) = 0$ і const = $c_н$.

Рух забивки описується диференціальним рівнянням

$$M\,\frac{dv}{dt} = pS\,, \qquad (2)$$

де S – площа поперечного перерізу шпуру. Маємо

$$M\,\frac{dv}{dt} = Sp_{\text{н}}\left(\frac{c}{c_{\text{н}}}\right)^3 = Sp_{\text{н}}\left(\frac{c_{\text{н}} - v}{c_{\text{н}}}\right)^3 = Sp_{\text{н}}\left(1 - \frac{v}{c_{\text{н}}}\right)^3. \qquad (3)$$

Оскільки $p_н = \frac{1}{8}\rho_{\text{ВР}}D^2$, $c_н = \sqrt{\frac{3}{8}}D$, то

$$M\,\frac{dv}{dt} = \frac{S\rho_{\text{ВР}}c_н^2}{3}\left(1 - \frac{v}{c_н}\right)^3 = \frac{mc_н^2}{3H}\left(1 - \frac{v}{c_н}\right)^3, \qquad (4)$$

де $\rho_{\text{ВР}}$ – щільність ВР; D – швидкість продуктів детонації.

Таким чином, рівняння (4) є диференціальним рівнянням з відокремлюваними змінними. Відокремивши змінні, одержимо

$$\frac{d\left(1 - \frac{v}{c_{\text{н}}}\right)}{\left(1 - \frac{v}{c_{\text{н}}}\right)^3} = -\frac{m \cdot c_{\text{н}}}{3M \cdot H}\,dt\,. \qquad (5)$$

Проінтегрувавши (5) і врахувавши, що при $t = 0, v = 0$, визначимо швидкість забивки

$$v_{\text{з}} = c_{\text{н}}\left(1 - \left(\frac{2mc_{\text{н}}t}{3M \cdot H} + 1\right)^{-\frac{1}{2}}\right). \qquad (6)$$

Формула (6) визначає закон зміни швидкості руху забивки від часу.

Основним завданням забивки шпуру є герметизація вибухової порожнини на час процесу детонації заряду. Тиск у шпурі та енергія хвиль напруги будуть максимальними, коли детонація всього заряду пройде в закритій газовій камері. Це означає, що енергію вибуху можна використати максимально, якщо час вильоту забивки $t_{\text{вз}}$ не буде меншим за час детонації заряду вибухової речовини (ВР) $t_{\text{д}}$, тобто

$$t_{\text{вз}} / t_{\text{д}} \geq 1. \qquad (7)$$

Час детонації заряду можна визначити через довжину H заряду ВР та швидкості детонації D заряду ВР за формулою

$$t_{\text{д}} = H / D. \qquad (8)$$

Швидкість детонації D заряду ВР залежить від типу ВР, що застосовується, і тому в кожному конкретному випадку вона є відомою.

Нехай α – коефіцієнт пропорційності між довжиною заряду ВР H і довжиною забивки $H_з$: $H_з = \alpha \cdot H$. Тоді

$$t_{вз} = \alpha H / v_з . \tag{9}$$

Підставивши (8) і (9) у (7), маємо

$$\alpha D / v_з \geq 1 . \tag{10 }$$

Мінімальну величину відношення довжини забивки до довжини заряду ВР α можна визначити із (10), якщо в ньому залишити лише знак рівності. У цьому випадку час детонації заряду буде дорівнювати часу вильоту забивки і тому устя шпуру буде закритим до повного завершення вибуху. Маємо

$$\frac{\alpha D}{v_з} = 1 \text{ або } \alpha D = c_н \left(1 - \left(\frac{2mc_н t}{3M \cdot H} + 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \right) . \tag{11}$$

Оскільки $t_{вз} = t_д = \dfrac{H}{D}$, $m = \rho_{вр} H \dfrac{\pi d^2}{4}$, $M = \rho_з \alpha H \dfrac{\pi d^2}{4}$, де $\rho_з$ – щільність забивки, то

$$v_з = c_н \left(1 - \left(\frac{2mc_н t}{3M \cdot H} + 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \right) = c_н \left(1 - \left(\frac{2mc_н H}{3M \cdot H \cdot D} + 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \right) =$$

$$= c_н \left(1 - \left(\frac{2mc_н}{3M \cdot D} + 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \right) = c_н \left(1 - \left(\frac{2\rho_{вр} H \frac{\pi d^2}{4} c_н}{3\rho_з \alpha H \frac{\pi d^2}{4} D} + 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \right) =$$

$$= c_н \left(1 - \left(\frac{2\rho_{вр} c_н}{3\rho_з \alpha D} + 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \right) = c_н \left(1 - \left(n \frac{c_н}{\alpha D} + 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \right), \quad \text{де } n = \frac{2\rho_{вр}}{3\rho_з} .$$

Оскільки $c_н = \sqrt{\dfrac{3}{8}} D$ і $\sqrt{\dfrac{3}{8}} \approx 0{,}61$, то підставивши в (11), одержимо

$$\alpha D = \sqrt{\frac{3}{8}} D \left(1 - \left(\frac{n \sqrt{\frac{3}{8}} D}{\alpha D} + 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \right) \quad \text{або} \quad \alpha = 0{,}61 \left(1 - \left(\frac{0{,}61 n}{\alpha} + 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \right) .$$

З метою визначення α перетворимо останнє рівняння:

$$\left(\frac{0{,}61n}{\alpha}+1\right)^{-\frac{1}{2}}=1-1{,}63\alpha\,;$$

$$(1-1{,}63\alpha)\sqrt{\frac{0{,}61n}{\alpha}+1}=1;$$

$$(1-1{,}63\alpha)^2\left(\frac{0{,}61n}{\alpha}+1\right)=1;$$

$$\frac{0{,}61n}{\alpha}-\frac{1{,}99n\alpha}{\alpha}+\frac{1{,}62n\alpha^2}{\alpha}+1-3{,}26\alpha+2{,}66\alpha^2=1;$$

$$0{,}61n-1{,}99n\alpha+1{,}62n\alpha^2-3{,}26\alpha^2+2{,}66\alpha^3=0\,;$$

$$2{,}66\alpha^3+(162n-3{,}26)\alpha^2-1{,}99n\alpha+0{,}61n=0\,;$$

$$\alpha^3+(0{,}61n-1{,}22)\alpha^2-0{,}75n\alpha+0{,}23n=0\,;$$

$$\alpha^3+(0{,}61\frac{2\rho_{ВР}}{3\rho_з}-1{,}22)\alpha^2-0{,}75\frac{2\rho_{ВР}}{3\rho_з}\alpha+0{,}23\frac{2\rho_{ВР}}{3\rho_з}=0\,. \qquad (12)$$

Розв’язавши рівняння (12), отримаємо мінімальне значення α, при якому час вильоту забивки дорівнюватиме часу детонації шпурового заряду.

Для співставлення цих аналітичних досліджень з експериментальними даними інших авторів [6] визначимо оптимальну довжину піщаної водонасиченої забивки щільністю $\rho_з=1980\,кг/м^3$ для ВР тротил–гексоген (склад В) щільністю $\rho_{вр}=1700\,\frac{кг}{м^3}$. У цьому випадку $n=\frac{2\rho_{ВР}}{3\rho_з}\approx 0{,}57$, тому, підставивши у (12), отримаємо рівняння

$$\alpha^3-0{,}87\alpha^2-0{,}43\alpha+0{,}13=0\ . \qquad (13)$$

Розв’язавши рівняння (13), визначимо α = 1,15.

Оптимальне відношення 1:1,15 довжини заряду ВР до довжини забивки, одержане внаслідок викладених вище обчислень, не суперечить результатам експериментальних досліджень. У роботі [6] експериментально встановлено мінімальну та максимальну довжину забивки шпурового заряду ВР: відношення довжин колонок заряду і забивки є при мінімальній довжині забивки – 1:0,86 і при максимальній – 1:1,5.

Висновки

Отримані аналітичні залежності для розрахунку оптимальної величини забивки шпуру у вигляді функції від щільності ґрунту і забивки. Збіг розрахункової величини забивки для конкретних умов з експериментальними даними других авторів підтверджує правильність отриманих результатів.

Напрямком подальших досліджень є вивчення впливу розмірів і матеріалу забивки на параметри сейсмовибухових хвиль у грунтовому масиві.

Результати даної роботи можуть бути використані при проектуванні вибухових робіт для розрахунку раціональних параметрів вибуху з застосуванням різних типів ВР і забивки.

1. *Механический эффект* взрыва в грунтах / [Лучко И. А., Плаксий В. А., Ремез Н. С. и др.] – К.: Наукова думка, 1989. – 232 с.

2. *Ремез Н. С.* Камуфлетный взрыв цилиндрического заряда при инициировании его на одном из торцов / Ремез Н. С. // Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Гірництво". – К. – 2001. – Вип. 6. – С. 30–33.

3. *Ремез Н. С.* Численное моделирование динамического поведения многокомпонентной вязкопластической среды под действием взрыва цилиндрического заряда конечной длины / Ремез Н. С. // Нелинейные краевые задачи математической физики и их приложения. – 1998. – С. 177–179.

4. *Друкованый М. Ф.* Исследование влияния качества забойки на величину импульса давления / Друкованый М. Ф. // Использование взрыва в народном хозяйстве. – Ч. 2. – К.: Наукова думка. – 1970. – С. 227–239.

5. *Станюкович К. П.* Неустановившиеся движения сплошной среды / Станюкович К. П. – М.: Наука, 1971. – 856 с.

6. *Сумин И. П.* Исследование влияния длины забойки на степень дробления горной массы взрывом скважинных зарядов / И. П. Сумин, П. А. Гордеев, В. В. Зальников // Взрывное дело / Под ред. Г. П. Демидюка. – 1964. – № 54/11. – С.185–189.