

В.С. Прокопенко, к.т.н.

ЗАТ "Експериментально-промислова технологія вибухових робіт"

ЗВ'ЯЗАНА ЗАДАЧА ВИБУХУ СВЕРДЛОВИННОГО ЗАРЯДУ ВСЕРЕДИНИ ВОДНОЇ ОБОЛОНКИ У ГІРСЬКОМУ МАСИВІ

Чисельно досліджено дію вибуху свердловинного заряду всередині водної оболонки у гірському масиві. Проведено зіставлення результатів чисельного розв'язку задачі з урахуванням і без урахування зв'язаності термодинамічних полів у продуктах детонації, заповнювачі зазора і гірській породі.

Дія вибуху на гірську породу значною мірою залежить від втрат енергії вибуху в зоні пластичних деформацій, що виникають на контакті вибухової речовини (ВР) з руйнованим масивом. Ці втрати можуть бути зменшені при незмінній величині енергії ВР за рахунок зниження величини імпульсу тиску і розтягання його в часі на межі розділу фаз "продукти детонації (ПД)–гірська порода". Одним із заходів, які пом'якшують бризантну дію вибуху на руйновану гірську породу, є використання проміжного робочого середовища, яким може бути повітря, рідина та інші матеріали. На практиці для зниження питомого імпульсу тиску та збільшення часу його дії використовують заряди у повітряних або водних оболонках.

З огляду на складність та високу вартість експериментальних робіт все більшого значення набувають теоретичні дослідження з використанням математичного моделювання задач про взаємодію ударних хвиль з системою "продукти детонації–заповнювач зазора–гірська порода". Проте теоретичні дослідження динамічної поведінки таких систем ґрунтуються, як правило, на спрощених модельних уявленнях про взаємодіючі середовища і не враховують зв'язаності термодинамічних параметрів середовищ цієї системи у кожний момент часу, що не дозволяє адекватно описати процеси, які проходять в них.

Враховуючи також, що в джерелах відсутній програмний продукт, який можна було б використати для отримання розрахункових даних при вивченні впливу на стан порід параметрів конкретних заповнювачів, порід та використовуваних ВР, перед автором виникла необхідність у розв'язанні зв'язаної задачі на основі нової моделі динамічної поведінки гірської породи, розробленої В.М. Ніколаєвським, яка враховує основні властивості породи при вибухових та ударних навантаженнях.

Розглядається циліндричний заряд ВР нескінченної довжини, розміщений по осі свердловини, яка заповнена водою або повітрям, у гірському масиві. Приймається схема миттєвої детонації, яка полягає в тому, що весь заряд детонує миттєво, по всьому його об'єму установлюється однаковий тиск P_n і однакова щільність ρ_n , яка дорівнює початковій щільності ВР. Від контактного розриву продукти детонації – вода або повітря по останньому середовищу починає поширюватися ударна хвиля (УХ), а по ПД – збіжна хвиля стиснення.

Виконаємо математичну постановку зв'язаної задачі для ПД, заповнювача зазора та гірської породи у рамках механіки суцільного середовища.

Закон збереження кількості руху, маси та енергії для ПД і заповнювача зазора (вода, повітря) та гірської породи у змінних Лагранжа мають такий вигляд:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r}, \quad \frac{\partial r}{\partial t} = u, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho u)}{\partial r} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + P \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} - \bar{V} (S_r \dot{\epsilon}_r + S_\theta \dot{\epsilon}_\theta) = 0, \quad (3)$$

$$\sigma_i = S_i - P \quad (i = r, \theta, z), \quad (4)$$

де ρ – щільність середовища;

t – час;

r, θ, z – циліндричні координати;
 P – середній гідростатичний тиск у середовищі;
 u – масова швидкість частинок середовища;
 E – питома внутрішня енергія середовища;
 V, V_0 – поточний і початковий питомі об'єми (при $P = P_0$);
 P_0 – атмосферний тиск;
 $\bar{V} = V / V_0$;

S_i, σ_i ($i = r, \theta, z$) – компоненти повного тензора і девіатора тензора напружень (для ПД і повітря $S_i = 0$).

Для компонентів тензора швидкостей деформацій виконуються співвідношення

$$\dot{\epsilon}_r = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \dot{\epsilon}_\theta = \frac{u}{r}. \quad (5)$$

Приймається, що розширення ПД відбувається за ізентропічним рівнянням стану у формі двочлена [1]:

$$P = A\rho^{n_0} + B\rho^{\gamma+1}. \quad (6)$$

Для опису динамічної поведінки гірської породи використовується пружнопластична дилатансійна модель [2, 3].

У зоні пружних деформацій зміни напруження гірської породи пов'язані з швидкостями деформацій законом Гука у конвективній формі:

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} + u \frac{\partial \tau}{\partial r} = 2G \left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right), \quad (7)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + u \frac{\partial P}{\partial r} = -K \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} \right), \quad (8)$$

де $\tau = \sigma_r - \sigma_\theta$ – диференціальне напруження; G – модуль зсуву; K – коефіцієнт об'ємного стискання.

У середовищі відбуваються необоротні деформації, якщо виконується закон сухого тертя у формі Треска:

$$|\sigma_r - \sigma_\theta| = \sigma_s, \quad (9)$$

де σ_s – границя міцності при одновісному стисканні.

Ці деформації у нехтуванні пружним зсувом описуються дилатансійним рівнянням [2]:

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{1}{K} \left(\frac{\partial P}{\partial t} + u \frac{\partial P}{\partial r} \right) = \Lambda \left| \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} \right|, \quad (10)$$

де Λ – швидкість дилатансії, вигляд якої був отриманий при обробці експериментальних даних:

$$\Lambda = \begin{cases} \Lambda_0 \exp(-a_0 \text{sign}(R) \sqrt{|R|}) & \text{при } R \geq b \text{ і } \tau < \sigma_s, \\ \Lambda_0 \exp(-a_0 \text{sign}(R) \sqrt{|R|}) & \text{при } R < b \text{ і } \tau \geq \sigma_s, \end{cases} \quad (11)$$

де $R = \frac{P - \tau}{3}$;

a_0 – експериментальна стала; $a_1 = a_0 + \ln \frac{\Lambda_1}{\Lambda_0} \sqrt{b}$;

Λ_0, Λ_1 – значення швидкостей дилатансії при одновісному стисканні зліва і справа від границі міцності; параметр b близький до нуля.

Початкові умови задачі при $t = 0$ такі:

$$\begin{aligned} u = 0, P = P_n, \rho = \rho_n & \quad \text{при } 0 < r \leq r_0, \\ u = 0, P = \sigma_r = 0, \rho = \rho_{0n} & \quad \text{при } r_0 < r \leq r_c, \\ u = 0, P = \sigma_r = 0, \rho = \rho_z & \quad \text{при } r_0 < r \leq r_c, \end{aligned} \quad (12)$$

де ρ_{0n} – щільність заповнювача зазора між зарядом і стінкою свердловини;

ρ_e – щільність гірської породи при $P = P_0$;

r_0 – радіус заряду;

r_c – радіус свердловини.

Граничними умовами є:

1) умова “непротікання” на осі заряду: $u = 0$ при $r = 0$;

2) умова неперервності нормальних радіальних напружень σ_r та масової швидкості u на рухомих контактних розривах ПД–заповнювач зазора–гірська порода.

При розв’язанні незв’язаної задачі вона розбивалась на два етапи. На першому етапі вивчалось проходження ударної хвилі по воді, що заповнює простір зазора. Для цього як гранична умова задавалось рівняння (6) для ПД. В результаті чисельного розв’язку було отримано залежність тиску від часу, яка, в свою чергу, служила граничною умовою для другого етапу – розрахунку хвильових процесів у гірській породі.

Для розв’язання поставлених задач використовувався метод скінченних різниць другого порядку точності по просторовій та часовій координатах з штучною в’язкістю. Суть методу полягає в тому, що фронт ударної хвилі замінюється тонким шаром, в якому величини змінюються швидко, але без розривів. Диференціальні рівняння, які враховують дисипацію (в’язкість), можуть бути застосовані як в “ударному” шарі, так і поза ним, тому немає необхідності в додаткових умовах на стрибку.

Для різницевої апроксимації вихідної системи диференціальних рівнянь в частинних похідних гіперболічного типу використовувалась скінченно-різницева схема типу “хрест”, запропонована для рівнянь гідродинаміки М.Л. Уілкінсом [4] з умовою стійкості типу Куранта.

Дослідження параметрів ударних хвиль при вибуху свердловинних зарядів проводились для заряду емульсійної ВР діаметром $d_0 = 0,18$ м в обводненій свердловині діаметром $d_c = 0,22$ м в алевроліті.

Детонаційні характеристики ВР такі: $\rho_n = 1250$ кг/м³; $Q = 3024$ кДж/кг; $D = 5000$ м/с; $P_n = 4,46 \cdot 10^9$ Па; $A = 36,73$ Па (кг/м³)^{-n₀}; $B = 4,3 \cdot 10^4$ Па (кг/м³)^{-γ}; $n_0 = 2,6$; $\gamma = 1,25$.

Фізико-механічні характеристики алевроліту вибирались такими: $\rho_e = 2400$ кг/м³; $K = 3,12 \cdot 10^9$ Па; $G = 2,33 \cdot 10^9$ Па; $\sigma_s = 5,3 \cdot 10^7$ Па; $a_0 = 0,1$; $a_1 = 0,07$; $b = 0,15$; $\Lambda_1 = 1,35$; $\Lambda_0 = -1,17$.

Константи для води в рівнянні Тета були такі: $\rho_e = 1000$ кг/м³; $c_{ze} = 1500$ м/с; $\beta = 7$.

При аналізі результатів чисельного розрахунку по даній задачі в першу чергу виникає питання про з’ясування впливу зв’язаності задачі на динаміку процесу вибуху. З цією метою зіставлялись розв’язки зв’язаної задачі з розв’язком незв’язаної задачі, коли навантаження визначалось в результаті задавання тиску на межі порожнини $r = r_0(t)$ згідно з ізентропою (6).

З розв’язку незв’язаної задачі випливає, що тиск у гірській породі зменшується з часом від свого максимального значення початкового тиску в ПД до атмосферного без особливостей. При розв’язанні зв’язаної задачі у воді та гірській породі виникає складна хвильова картина, обумовлена взаємодією хвиль, що проходять і відбиваються в цих середовищах.

На рис. 1 показано залежність тиску від часу у воді (криві 1, 1’) та алевроліті на межі вибухової порожнини (криві 2, 2’). Криві без штрихів відносяться до зв’язаної задачі, криві з штрихами – до незв’язаної. З рисунка видно, що при розв’язанні зв’язаної та незв’язаної задач розвитку тиску є великі якісні і кількісні відмінності. Для зв’язаної задачі максимуми тиску у воді та гірській породі на межі свердловини у 2–3,5 рази менші, ніж для незв’язаної, однак у другому випадку відбувається більш швидке падіння тиску в часі в обох середовищах. Слід відзначити, що врахування зв’язаності призводить до наявності повторних піків тиску у воді та відколів у гірській породі, викликаних цими коливаннями. Повторні піки тиску призводять до накопичення енергії у воді, яка потім передається в гірську породу і спричиняє збільшення тиску в середній та дальній зонах вибуху порівняно з тиском, розрахованим без урахування зв’язаності полів термодинамічних величин взаємодіючих середовищ.

З збільшенням відстані від осередку вибуху різниця в тисках, розрахованих для цих двох постановок задач (незв’язаної і зв’язаної), зменшується, проте залишається все ж таки істотною.

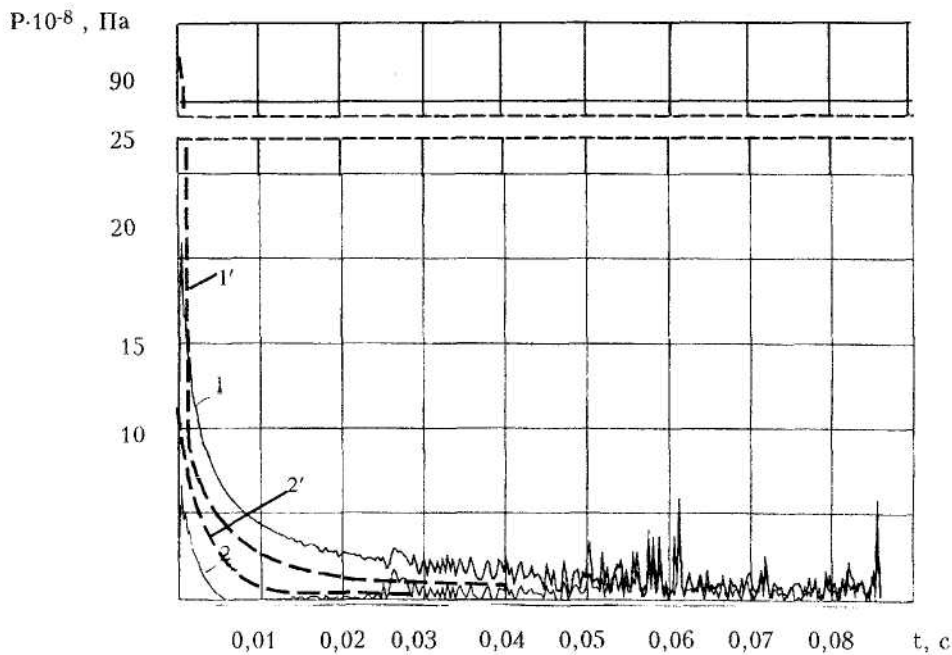


Рис. 1. Залежність тиску від часу при вибуху циліндричного заряду всередині водної оболонки на межі свердловини: 1, 1' – у воді; 2, 2' – в алевроліті. Криві без штрихів належать до зв'язаної задачі, з штрихами – до незв'язаної

Неврахування впливу хвильових процесів у ПД та воді призводить до різниці у якісних і кількісних характеристиках процесу деформування гірської породи в середній і дальній зонах (рис. 2): до зменшення тиску на гірську породу на 30–50 %, відсутності повторних піків тиску, які мають велике значення при руйнуванні гірської породи.

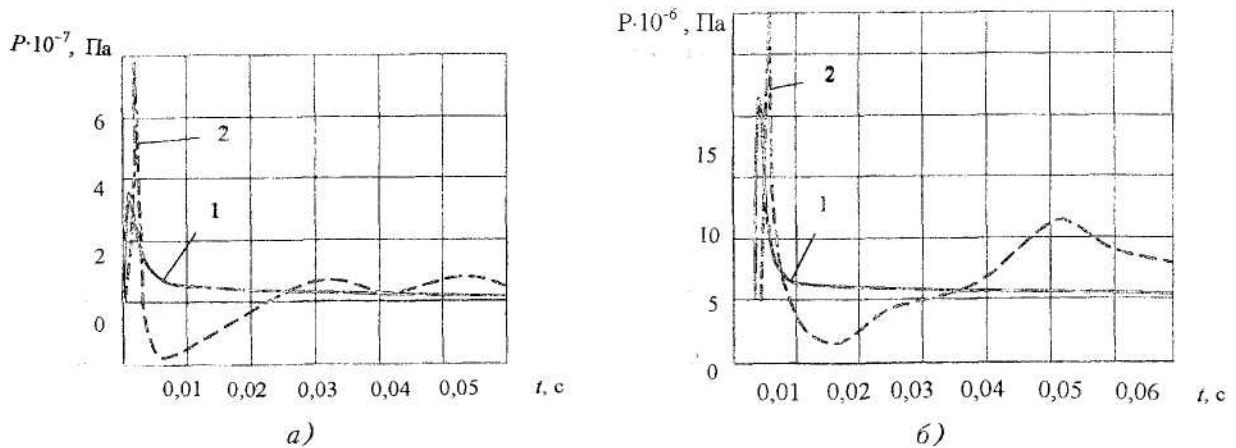


Рис. 2. Залежність середнього гідростатичного тиску від часу в різних точках алевроліту при вибуху циліндричного заряду: а) $r = 41,7 r_0$; б) $r = 100 r_0$. Крива 1 належить до незв'язаної задачі, крива 2 – до зв'язаної задачі

Таким чином, для отримання більш достовірних результатів розрахунків необхідно розв'язувати зв'язані задачі. Крім того, при розв'язанні незв'язаної задачі вона фактично розбивається на три самостійні:

- 1) визначення тиску, який діє на заповнювач зазора (воду і повітря);
- 2) поведінка заповнювача і розрахунок тиску, як функції часу, що діє на межу з гірською породою;

3) розрахунок напружено-деформованого стану гірської породи. Очевидно, що при стикванні розв'язків цих задач можуть мати місце значні втрати інформації.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др.* Физика взрыва. – М.: Наука, 1975. – 704 с.
2. *Николаевский В.Н., Поляничев А.Н., Сумин Е.О. и др.* Эффекты дилатансии при подземном взрыве. Численные исследования // ДАН СССР. – 1980. – Т. 250. – № 1. – С. 66–70.
3. *Капустянский С.М., Николаевский В.Н.* Параметры упругопластической дилатансионной модели для геоматериалов // ПМТФ. – 1985. – № 6. – С. 145–150.
4. *Уилкинс М.Л.* Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Мир., 1967. – С. 212–263.

ПРОКОПЕНКО Віктор Степанович – кандидат технічних наук, голова правління ЗАТ «Експериментально-промислової технології вибухових робіт».

Наукові інтереси:

– фізико-технічні основи технології дроблення масивів гірських порід вибухами свердловинних зарядів неводостійких вибухових речовин у полімерних рукавах.

Подано 10.06.2002