

УДК 622.235

РОЗРОБЛЕННЯ РІВНЯНЬ СТАНУ ГАЗОПОДІБНИХ ПРОДУКТІВ ВИБУХУ ЕТАЛОННИХ І НОВИХ СУМІШЕВИХ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН

А. І. Лучко, здобувач наукового ступеня (ІГМ НАН України)

Разработаны двучленные уравнения состояния газообразных продуктов взрыва эталонных взрывчатых веществ – граммонита 79/21 и игданита, а также новых смесевых взрывчатых веществ местного приготовления. Аналитическое задание этих уравнений необходимо для замыкания системы уравнений при численном исследовании механики подземного взрыва.

Розроблені двочленні рівняння стану газоподібних продуктів вибуху еталонних вибухових речовин – грамоніту 79/21 та ігданіту, а також нових сумішевих вибухових речовин місцевого приготування. Аналітичне задання цих рівнянь необхідне для замикання системи рівнянь при чисельному дослідженні механіки підземного вибуху.

The two-term equations of the condition of light-end explosion products of reference explosives – grammonite 79/21 and igdanite, as well as of new mixed explosives of local preparation are developed. The analytical setting of these equations is necessary to close system of equations during the numerical investigation of mechanics of underground explosion.

Відомо, що розв'язування задач про механічну дію вибуху різних вибухових речовин (ВР) у ґрунтах і твердих гірських породах неможливе без використання рівняння стану газоподібних продуктів вибуху (ПВ), яке необхідне для замикання системи рівнянь, що описує динамічну поведінку середовища. У праці [1] виконано детальний аналіз рівнянь стану газоподібних ПВ. До цього часу таких рівнянь розроблено більше 150. Через велику кількість аналізувати їх не будемо. Лише зауважимо, що при побудові рівнянь стану газоподібних ПВ можна виділити два різних підходи.

Перший підхід базується на врахуванні хімічного складу суміші компонентів ПВ і підсумовуванні вкладу окремих компонентів, що входять у склад реальних ПВ, у термодинамічні функції суміші. У цьому випадку стан ПВ описується не тільки тиском, об'ємом і температурою, але й відносним вмістом (у молях) компонентів суміші, які розраховуються з умови термодинамічної рівноваги ПВ, або експериментально, наприклад, вимірюючи теплоту вибуху і аналізуючи склад ПВ у калориметричних бомбах. Ураховуючи, що теплота вибуху і склад ПВ лише побічно зв'язані з станами, які реалізуються за фронтом детонаційних хвиль, а прямі і перспективні методи вимірювання складу з використанням швидкодіючих маспектрометрів поки що недосконалі, основним способом отримання відомостей про склад ПВ у площині Чепмена–

Жуге на сьогодні є чисельний розрахунок методами рівноважної термодинаміки з використанням сучасних банків термодинамічних даних.

У другому підході до побудови рівняння стану поточний склад ПВ не враховують, а описують осереднено, тобто нехтують відмінністю в складах різних ВР, а також їхніми змінами залежно від поточних параметрів стану – тиску і температури. Склад ПВ не розглядається зовсім, або припускається, що він відомий і сталий, або рівняння розробляється і застосовується тільки до конкретної ВР. Ці рівняння стану на сьогодні достатньо надійно визначаються емпіричними й напівемпіричними методами. Типовим є метод, згідно з яким вихідною вибирається певна форма запису рівняння стану з набором сталих, а як база для їх визначення використовується експериментальна інформація щодо параметрів у точці Чепмена–Жуге і на ізентропі розширення ПВ в $(p-u)$ або $(p-v)$ координатах (p – тиск, u – масова швидкість; v – питомий об’єм газу ПВ), а також експериментальна залежність швидкості детонації від початкової щільності ВР.

У рамках другого підходу приймаємо, що розширення ПВ відбувається згідно з двочленною ізентропою, рівняння якої широко застосовується в дослідженнях і має вигляд [1–3]

$$P = A\rho^{n_0} + B\rho^{\gamma_0+1}, \quad (1)$$

де P – поточний тиск в порожнині; ρ – щільність газоподібних ПВ; A , n_0 , B , γ_0 – невідомі сталі.

Задача полягає у визначенні цих невідомих сталих. Для цього припускають, що вибухове перетворення ВР і розширення газоподібних ПВ відбуваються за схемою миттєвої хвильової детонації, коли весь заряд детонує миттєво. При цьому у всьому об’ємі заряду встановлюється середній тиск, що дорівнює половині детонаційного тиску в точці Жуге, а щільність газоподібних ПВ дорівнює початковій щільності ВР. У результаті дії цього середнього тиску на межі розділу ПВ–грунт (порода) по ґрунту (породі) починає поширюватися ударна хвиля, межа розділу – розширюватися, а від неї до центра заряду починає поширюватися хвиля розрідження. Потім використовується пропозиція Л. Д. Ландау і Б. Я. Зельдовича про те, що розширення ПВ від $P = P_n$ до $P = P_k$ відбувається згідно з ізентропою

$$P = P_n \left(\frac{\rho}{\rho_n} \right)^{k_n}, \quad (2)$$

а від $P = P_k$ ($P_k \approx 100$ МПа) до $P = P_0$ ($P_0 = 1,01 \cdot 10^5$ Па) – згідно з ізентропою

$$P = P_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{k_0}, \quad (3)$$

де P_n і ρ_n – тиск і щільність на фронті детонаційної хвилі; k_n – показник ізентропи; P_0 – атмосферний тиск; ρ_0 – відповідна йому щільність ПВ.

Приймається, що рівняння (1) переходить у (2) при $P \rightarrow P_n$ і в (3) при $P \rightarrow P_0$.

Перевага використання виразу (1) порівняно з виразами (2) і (3) полягає в тому, що хоч різниця значень тиску (як функції щільності) при використанні виразів (1) і (2) та (3) невелика, але при використанні виразів (2) і (3) швидкість звуку в точці спряження цих кривих зазнає стрибка, а в випадку використання (1) вона змінюється скрізь неперервно.

Величини A , n_0 , B , γ_0 в рівнянні (1) визначаються з таких міркувань. Криві, які відповідають (1) і (2), мають спільну точку P_n , ρ_n і спільну дотичну в цій точці.

Криві (1) і (3) мають спільну дотичну при $P \rightarrow P_0$. Продукти детонації при розширенні від ρ_n до ρ_0 здійснюють роботу, яка дорівнює енергії вибухового перетворення Q_v . Виходячи з таких міркувань, система рівнянь для визначення A , n_0 , B , γ_0 записується у вигляді [2, 3]:

$$k_n = n_0 + B\rho_n^{\gamma_0+1}(\gamma_0 + 1 - n_0)P_n^{-1}; \quad (4)$$

$$\gamma_0 = k_0 - 1; \quad (5)$$

$$Q_v = \frac{P_n}{\rho_n(n+1)} + \frac{B\rho_n^{\gamma_0}(n_0 - \gamma_0 - 1)}{\gamma_0(n_0 - 1)}; \quad (6)$$

$$P_n = A\rho_n^{n_0} + B\rho_n^{\gamma_0+1}. \quad (7)$$

Тепер можна визначити шукані сталі для кожної із досліджуваних ВР і записати відповідні рівняння стану газоподібних ПВ.

1. Отримання рівняння стану газоподібних ПВ під час вибуху грамоніту 79/21. Складаючи рівняння реакції вибуху і визначаючи теплоємності при постійних тиску C_p і об'єму C_v , визначаємо $k_0 = \frac{C_p}{C_v} = 1,248$. Тоді згідно з (5) отримуємо $\gamma_0 = 0,248$.

Отримано також, що $Q_v = 4,312 \cdot 10^6$ Дж/кг, $P_n = 3,2 \cdot 10^9$ Па, $k_n = 2,233$, $\rho_n = 1375$ кг/м³. Розв'язуючи за таких даних систему (4)–(7), отримуємо рівняння стану газоподібних ПВ під час вибуху грамоніту 79/21 у вигляді

$$P = 2,7769\rho^{2,8225} + 1,4519 \cdot 10^5 \rho^{1,248}. \quad (8)$$

2. Отримання рівняння стану газоподібних ПВ під час вибуху ігданіту. Складаючи рівняння реакції вибуху, визначаємо $k_0 = \frac{C_p}{C_v} = 1,264$, тобто $\gamma_0 = 0,264$; $Q_v = 3,885 \cdot 10^6$ Дж/кг; $P_n = 1,68 \cdot 10^9$ Па; $k_n = 2,163$; $\rho_n = 1240$ кг/м³.

Розв'язуючи за таких даних систему (4)–(7), отримуємо рівняння стану газоподібних ПВ під час вибуху ігданіту

$$P = 1,112 \cdot 10^{-5} \rho^{4,4098} + 1,502 \cdot 10^5 \rho^{1,264}. \quad (9)$$

3. Розрахунок рівняння стану газоподібних ПВ під час вибуху поліміксу ГР4-Т10.

Полімікс ГР4-Т10 призначений для руйнування гірських порід різної міцності. Згідно з ТУ У 25274773.008–2001 [4] ця ВР являє собою механічну суміш аміачної селітри (АС) (80 % за масою), дизельного пального (0,8 %), тротилу (10 %) і компонента горючого набухаючого ГНК4 (9,2 %). Суміш ГНК4 виготовляється на основі клейових складів, горючих добавок, інертних наповнювачів, поверхнево-активної речовини і поперечної зшивки – алюмокалієвого галуна.

У результаті складання рівняння реакції вибухового перетворення і відповідних розрахунків отримано осереднені значення $k_0 = 1,245$; $Q_v = 3,864 \cdot 10^6$ Дж/кг; $P_n = 2,71 \cdot 10^9$ Па; $k_n = 2,189$; $\rho_n = 1270$ кг/м³.

Розв'язуючи за таких даних систему (4)–(7), отримуємо рівняння стану газоподібних ПВ під час вибуху поліміксу ГР4-Т10.

$$P = 5,67\rho^{2,7327} + 1,2789 \cdot 10^5 \rho^{1,245} . \quad (10)$$

4. Розрахунок рівняння стану газоподібних ПВ під час вибуху поліміксу ГР1/8.

Полімікс ГР1/8 призначений для руйнування гірських порід різної міцності. Згідно з [4] ця ВР складається з 89,5 % за масою АС (може бути суміш пористої та гранульованої селітр), 2,5 % дизельного пального і 8 % компонента горючого набухаючого – ГНК1. У результаті складання рівняння реакції вибухового перетворення і виконання відповідних розрахунків отримано: $k_0 = 1,245$; $Q_v = 3,9439 \cdot 10^6$ Дж/кг; $P_n = 3,55 \cdot 10^9$ Па; $k_n = 2,194$; $\rho_n = 1273$ кг/м³. У результаті розв'язання системи (4)–(7) отримуємо рівняння стану газоподібних ПВ для поліміксу ГР1/8 у вигляді

$$P = 56,682\rho^{2,4743} + 1,015 \cdot 10^5 \rho^{1,245} . \quad (11)$$

5. Розрахунок рівняння стану газоподібних ПВ під час вибуху поліміксу ГР1/8 (74 %) +КРУ К2 (26 %).

Ця ВР є сумішшю 74 % за масою поліміксу ГР1/8 з 26 % за масою компонента рідкого ущільнюючого марки К2. У склад КРУ К2 входить вода, АС, натрієва селітра, карбамід, азотна кислота, моноетаноламін, етиленгліколь. У результаті складання рівняння реакції хімічного перетворення цієї суміші і виконання відповідних розрахунків отримано: $k_0 = 1,242$; $Q_v = 3,3557 \cdot 10^6$ Дж/кг; $P_n = 4,54 \cdot 10^9$ Па; $k_n = 2,348$; $\rho_n = 1425$ кг/м³. У результаті розв'язання системи (4)–(7) отримано рівняння стану газоподібних ПВ поліміксу ГР1/8 (74 %) + КРУ К2 (26 %) у вигляді

$$P = 59,345\rho^{2,4839} + 0,604 \cdot 10^5 \rho^{1,242} . \quad (12)$$

6. Розрахунок рівняння стану газоподібних ПВ під час вибуху поліміксу ГР1/8 (85 %) +КРУ К2 (15 %).

Склад цієї ВР такий самий, як і в ГР1/8 (74 %) + КРУ К2 (26 %). Вони відрізняються лише вмістом складових. У результаті складання рівняння реакції і виконання розрахунків отримано: $k_0 = 1,242$; $Q_v = 3,483 \cdot 10^6$ Дж/кг; $P_n = 3,945 \cdot 10^9$ Па; $k_n = 2,293$; $\rho_n = 1364$ кг/м³. У результаті розв'язання системи (4)–(7) отримано рівняння стану газоподібних ПВ для цієї ВР

$$P = 43,96\rho^{2,482} + 0,68 \cdot 10^5 \rho^{1,242}. \quad (13)$$

7. Розрахунок рівняння стану газоподібних ПВ під час вибуху комполайту ГС6.

Комполайти ГС [4] призначені для підривання сухих порід різної міцності свердловинними зарядами при ручному та механізованому заряджанні. Ця ВР складається з 88 % АС і 12 % компонента горючого стисливого (ГСК). Основними компонентами ГСК є АС, дизельне пальне, вата полімеру, феросиліцій, висівки. Виконання відповідних розрахунків після складання рівняння реакції вибухового перетворення дало: $k_0 = 1,235$; $Q_v = 3,9197 \cdot 10^6$ Дж/кг; $P_n = 1,75 \cdot 10^9$ Па; $k_n = 2,158$; $\rho_n = 1245$ кг/м³. Після розв'язання системи (4)–(7) рівняння стану газоподібних ПВ під час вибуху комполайту ГС6 можна записати у вигляді

$$P = 7,671\rho^{2,241} + 1,638 \cdot 10^5 \rho^{1,235}. \quad (14)$$

Отримані рівняння стану (8)–(14) дають можливість замикати системи рівнянь для опису динаміки вибуху цих ВР в ґрунтах і гірських породах. Цьому будуть присвячені наступні публікації автора.

1. *Фізика взрива* / Под ред. Л. П. Орленко. – Изд-е 3-е, перераб. – В 2 т. – Т. 1. – М.: Физматлит, 2002. – 832 с.

2. *Механический эффект взрыва в грунтах* / И. А. Лучко, В. А. Плаксий, Н. С. Ремез и др.; Под ред. И. А. Лучко. – К.: Наук. думка, 1989. – 232 с.

3. *Ляхов Г. М.* Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах. – М.: Наука. ГРФМЛ, 1982. – 288 с.

4. *Прокопенко В. С., Лотоус В. В.* Разрушение твердых горных пород взрывами скважинных зарядов взрывчатых веществ в рукавах. – К.: ЗАО «Техновзрыв», ОАО «Полтавский ГОК». – 2003. – 83 с.