

ВПЛИВ ГІРСЬКОГО ТИСКУ НА ПАРАМЕТРИ ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ В ПРИВИБІЙНИХ ЗОНАХ СВЕРДЛОВИН ПРИ ГАЗОВИХ ВИБУХАХ

Ю.І. Войтенко, канд. техн. наук (ННДІОП)

Изложены результаты экспериментальных исследований разрушения околоскважинного пространства камуфлетным газовым взрывом при действии начального гидростатического давления на модельный образец. Они сравниваются с данными, полученными при взрывном разрушении предварительно нагруженной горной породы (мрамора). Показано, что в условиях энергетической близости зарядов глубина распространения трещин после газового взрыва в 2–3 раза больше, чем после бризантного.

Останніми роками зріє інтерес до вивчення процесу руйнування гірських порід в умовах попередньо напруженого стану. Це пов'язано з широким застосуванням енергії горіння і вибуху в технологіях підземного будівництва сховищ і видобутку корисних копалин геотехнологічними методами і, насамперед, в нафтогазових технологіях.

Поряд з широко відомою технологією порохового розриву пластів з'явилися нові, нетрадиційні методи, такі, як торпедування свердловин секційними торпедами та імпульсний розрив пластів при нестационарному горінні паливних та паливно-окислювальних сумішей.

Дослідження процесу утворення тріщин в привибійних зонах свердловин при імпульсному гідророзриві [1] і газорозриві [2] за відсутності в породі чи модельному матеріалі початкових напружень проводилися автором з групою співробітників Інституту геофізики ім. С.І. Суботіна НАН України. Вивченню впливу попередньо напруженого стану порід на процес тріщиноутворення при квазістатичному гідророзриві та вибухах бризантних зарядів присвячено праці [3, 4]. Експериментальні дослідження процесу імпульсного гідро- та газорозриву за наявності початкових напружень в зразках не проводилися.

Відомі лише деякі теоретичні праці, що за своїми постановками близькі до праць з цього виду руйнування порід [5, 6].

Метою описаних нижче дослідів було вивчення впливу попередньо напруженого стану на процес тріщиноутворення при детонації газу в свердловині. В дослідях використовувались елементи експериментальної техніки, описаної в працях [2, 4]. Схема експериментальної установки показана на рис. 1.

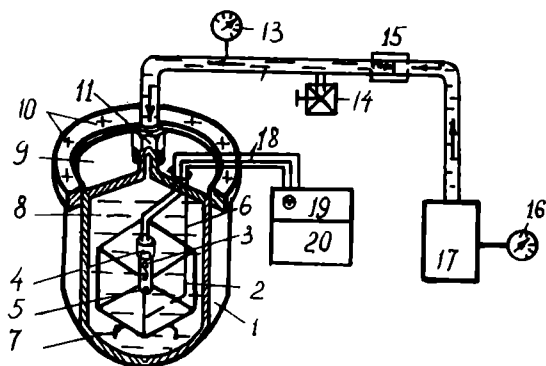


Рис. 1. Схема експериментальної установки: 1 – корпус гідравлічної камери високого тиску; 2 – досліджуваний зразок породи або модельного матеріалу; 3 – свердловина; 4 – газоутворююча речовина (карбід кальцію) масою 0,4–0,8 г; 5 – п'єзодатчик тиску; 6 – провід від датчика до реєструючих приладів; 7 – опора для зразка; 8 – робоча рідина; 9 – кришка гідравлічної камери; 10 – затискні болти; 11 – вузол з'єднання трубопроводу з кришкою камери; 12 – трубопровід; 13, 16 – контрольні манометри; 14 – стравлюючий клапан; 15 – запірний клапан; 17 – станція високого тиску; 18 – вибухова магістраль; 19 – осцилограф С9-16; 20 – пристрій для електровибуху

Руйнування зразків 2 здійснювалось за допомогою вибуху газової суміші (ацетилен–повітря) у свердловині 3. Наведення поля статичних напружень у досліджуваних зразках до заданої величини p_r здійснювалось у гідравлічній камері 1, яка дозволяла створювати робочий тиск до 60 МПа.

Методика заряджання герметичного зразка газовою сумішшю з початковим тиском газу до 3,5 МПа детально описана в праці [2]. Розміри зразків вибирались такими, щоб зона тріщиноутворення була в 1,4...2 рази менша, ніж характерний розмір моделі Канал для вимірювання тиску при горінні чи детонації газової суміші складався із п'єзодатчика Т-6000 5 (рис. 1), підсилювача "Нейва" і осцилографа С9-16.

Система була проградуйована і паспортизована на заводі, де вона розроблялася. Підготовлений зразок з датчиком тиску та ініціатором вибуху розміщувався в гідравлічній камері, заповненій машинним маслом, і навантажувався всебічним гідростатичним тиском. Після цього на мідний дротяний місток діаметром 10^{-4} м довжиною $2...3 \cdot 10^{-3}$ м подавався електричний імпульс з енергією 0,1...0,2 кДж.

Параметри вибухових імпульсів у свердловині, зареєстровані датчиком 5, мало відрізнялися від параметрів імпульсів, отриманих у попередніх дослідях з ненавантаженими зразками [2]. Це пояснюється слабким впливом зовнішнього гідростатичного тиску на початковий внутрішньосвердловинний тиск в газі, який визначає форму кривої $p(t)$ (рис. 2).

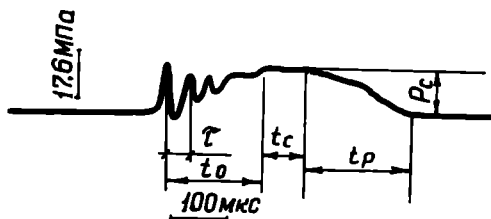


Рис. 2. Осцилограма тиску при вибухові газової суміші у свердловині: p_c – пороговий тиск розриву; t_p – час руйнування зразка; t_c – тривалість індукційного періоду затримки старту тріщини; t_0 – час наростання тиску до критичного; τ – подвійний час пробігу детонаційної хвилі по свердловині

Початковий тиск у газовій суміші з компонентами $148\text{C}_2\text{H}_2$, $1,4\text{N}_2$, $0,4\text{O}_2$ дорівнював 2,1 МПа.

При виготовленні зразків використовувались два види модельних матеріалів: штучний пісковик і органічне скло (ПММА).

Фізико-механічні властивості штучного пісковика вибиралися такими: міцність на стискання $\sigma_c = 25 \dots 50$ МПа, міцність на розтягання $\sigma_p = 2,5 \dots 3$ МПа, пористість – 4...8 %, густина – 1800...1900 кг/м³.

Фізико-механічні властивості мармуру, дані по руйнуванню якого свердловинними зарядами взято для порівняння з [4], такі: міцність на стискання $\sigma_c = 65$ МПа; міцність на розтягання $\sigma_p = 4,5$ МПа; швидкість поздовжніх хвиль – 5500 м/с.

Зразки ПММА підбиралися такими, щоб їх властивості відповідали діапазону значень, наведених у працях [1, 2].

Після вибуху досліджуваній зразок виймався з камери, вивчалися розмір і характер зон руйнування. Кількість тріщин, які утворювались в зразках, не перевищувала трьох, а при $p_r > 40$ МПа додаткові тріщини повністю приглушувались гідростатичним тиском і відбувалося утворення лише однієї радіальної або дископодібної тріщини.

На рис. 3 показано залежності кінцевих відносних розмірів поодиноких тріщин газорозриву від гідростатичного тиску [4]. Маса камуфлетного заряду в цій серії дослідів (крива 3) становила $0,2 \cdot 10^{-3}$ кг. Тротиловий еквівалент газового вибуху за тих початкових умов, що мали місце при проведенні експерименту (тиск – 1,9...3,5 МПа, об'єм газу – $(50 \dots 180) \cdot 10^{-6}$ м³), можна оцінити величиною $0,58 \dots 0,72 \cdot 10^{-3}$ кг.

Аналіз графіків показує, що найсуттєвіше зменшення розмірів тріщин відбувається в діапазоні зовнішніх тисків $p_r = 0 \dots 20$ МПа. Якщо при $p_r < 10 \dots 20$ МПа різниця в розмірах радіальних та дископодібних тріщин досить

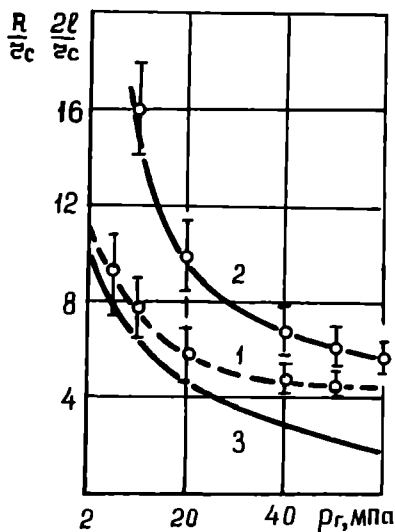


Рис. 3. Залежності кінцевих відносних розмірів поодиноких тріщин газорозриву від гідростатичного тиску: 1 – залежність $R/r_c(p_r)$ для дископодібних тріщин в зразках ПММА; 2 – залежність $2l/r_c(p_r)$ для радіальних тріщин в зразках ПММА, 3 – залежність розмірів зони радіальних тріщин в зразках мармуру від гідростатичного тиску при підриванні зосереджених бризантних зарядів

велика і визначається симетрією тріщин та міцністю матеріалу при $p_r = 0$, то при $p_r > 40$ МПа ця різниця менш суттєва і визначається переважно величиною зовнішнього тиску.

Троїловий еквівалент заряду ТЕНа масою $0,2 \cdot 10^{-3}$ кг становить $0,33 \cdot 10^{-3}$ кг. При більших масах бризантних зарядів (до $0,8 \cdot 10^{-3}$ кг) розміри зони радіальних тріщин відрізняються від значень, показаних на кривій 3, не більше, ніж на 33% [4].

Порівняння кривих 2 і 3 показує, що в умовах близькості енергетичних характеристик газового і бризантного сильного вибухів глибина тріщин при

слабкому газовому вибухові більша, завдяки тому, що більша частина його енергії витрачається на розрив породи переважно поодинокими тріщинами. При бризантному ж вибуху відбувається інтенсивне дробіння породи великою кількістю радіальних тріщин, у тому числі і в попередньо напружених зразках [4].

Залежність порогового тиску руйнування p_c від гідростатичного тиску має лінійний характер як для ПММА (крива 1), так і для пісковика (крива 2), що свідчить про визначальний вплив початкових напружень на силові параметри руйнування при таких режимах навантаження. Положення кривої 2 (пісковик) показує, що наявність внутрішньопорового тиску приводить до деякого розвантаження скелета породи і зменшення порогового тиску розривання p_c .

Визначимо тиск розривання стінки свердловини на основі елементарної теорії. Згідно з теорією пружності [2, 3], на стінці свердловини, в якій створено тиск p , за наявності зовнішнього гідростатичного тиску p_r виникають тангенційні напруження σ_0 :

$$\sigma_0 = p_r \left(1 + \frac{r_c^2}{r^2} \right), \quad (1)$$

де r_c – радіус свердловини.

Для виконання умов руйнування потрібно, щоб тиск у свердловині обчислювався за формулою

$$p_c = 2p_r + \sigma_p, \quad (2)$$

де σ_p – міцність породи на розривання, що залежить від швидкості навантаження. У випадку пористої породи за наявності внутрішньопорового тиску p_{ii} ця умова має такий вигляд:

$$p_c = 2p_r + \sigma_p - mp_{ii}, \quad (3)$$

де m – коефіцієнт тріщино-порової структури.

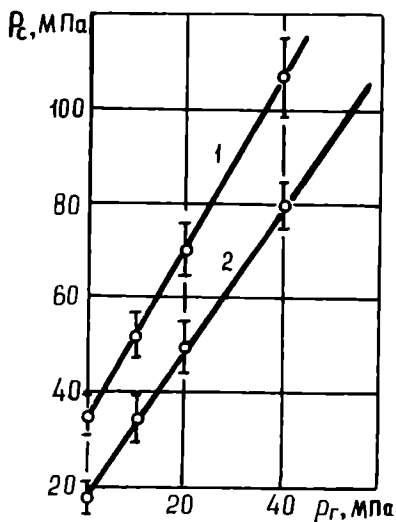


Рис. 4. Залежність порогового тиску руйнування від гідростатичного тиску

Для умов реального масиву, де порода в привибійній зоні пласта перебуває в нерівномірно напруженому стані, за умов застосування розпiрного пакера і квазістатичного навантаження формула для визначення порогового тиску розривання має такий вигляд [7]:

$$p_c = \frac{\sigma_3 - \sigma_1 + p_1 - mp_n}{1 + \sigma_p \sigma_c^{-1}} - k\varphi p_r^* \quad (4)$$

де σ_1, σ_3 – відповідно більша і менша величини зовнішнього поля напружень у площині ортогональній осі свердловини; k – коефіцієнт передачі тиску розпiрного пакера на стінку свердловини; φ – коефіцієнт взаємодії робочої рідини з пакером; p_1 – межа опору породи гідророзриву за відсутності зовнішніх напруг; p_r^* – величина розпiрного тиску в пакері в момент гідророзриву.

Порівнюючи криві 1 і 2 на рис. 4 з формулами (2)–(4), неважко впевнитися, що вони не суперечать залежності тиску розривання непроникних і проникних гірських порід від величини початкового тиску, який діє в масиві

Висновки

1. Глибина радіальних тріщин, що утворюються при підземному газовому вибухові в попередньо напружених гірських породах, в два–три рази більша, ніж при вибухах близьких по енергії бризантних зарядів ВР.

2. Величина порогового тиску розривання збільшується із зростанням величини початкових напружень за лінійним законом.

3. Кількість радіальних тріщин зменшується із зростанням величини початкових напружень, і при $p_r > 40$ МПа утворюється одна тріщина розриву.

Автор вдячний А.В. Михалюку за ініціативу проведення дослідів, а також П.О. Паршукову і В.В. Захарову за допомогу в їх виконанні.

1. *Вовк А.А., Войтенко Ю.И., Михалюк А.В.* Импульсный гидроразрыв полиметилметакрилата // Прикл. мех. и техн. физика. – 1986. – №5. – С. 135–141.

2. *Войтенко Ю.И., Михалюк А.В.* Трещинообразование в призабойных зонах скважин при газовых взрывах // Доповіді НАН України. – 1994. – №12. – С. 103–106.

3. *Христианович С.А., Желтов Ю.П.* О гидравлическом разрыве нефтеносного пласта // Изв. АН СССР. ОТН. – 1955. – №5. – С. 3–41.

4. *Юревич Г.Г., Трофимов В.Д.* Горная геомеханика глубинных взрывов. – М.: Недра, 1980. – 156 с.

5. *Гордеев Ю.Н., Кудряшов Н.А.* Развитие магистральной трещины под действием движущегося в ней газа // Журн. прикл. механики и техн. физики. – 1986. – №4. – С. 116–122.

6. *Башеев Г.В., Мартынюк П.А., Шер Е.Н.* Развитие радиальных трещин при взрыве скважинного заряда с учетом внешнего поля сжимающих напряжений // Прикл. механика и техн. физика. – 1995. – № 5. – С. 149–158.

7. *Кулинич В.С.* Оценка напряженного состояния массива горных пород методом локального гидравлического разрыва // Управление состоянием предельно напряженных горных пород. – Киев: Наук. думка, 1992. – С. 55–63.