

3. Ткачук К.Н., Иванчук Д.Ф., Трезуб И.К. Прогрессивные методы защиты окружающей среды при решении инженерных задач. – Київ: НТУУ “КПІ”, 1987. – 82 с.

4. Михайлов А.М. Охрана окружающей среды при разработке месторождений открытым способом. – М.: Недра, 1981. – 185 с.

УДК 622.245+539.3

## АНАЛІЗ ХВИЛЬОВИХ ЯВИЩ ПРИ ВЕДЕННІ ПРОСТРІЛЬНО-ПІДРИВНИХ РОБІТ У СВЕРДЛОВИНАХ

*М.О. Лисюк, канд. техн. наук (ННДІОП)*

*Изложен качественный анализ теории волновых явлений при прострелочно-взрывных работах в глубоких скважинах с водой, результаты которого позволяют установить влияние геометрических размеров сферического заряда на данный физический процесс. Даны практические рекомендации по повышению эффективности указанного метода скважинной геотехнологии.*

При свердловинному видобуванні корисних копалин застосовуються з різною метою (введення свердловин в експлуатацію, запобігання аваріям або їх ліквідація, вплив на проникність вміщуючих порід, перекриття свердловин тощо) імпульсні методи, до яких, зокрема, належать перфорація або торпедування з підриванням зарядів вибухових речовин. Великі можливості та висока ефективність прострільно-підривних робіт у свердловинах різних типів роблять їх перспективними. Проте притаманні внутрішньосвердловинному вибуху динамічні навантаження на цементний камінь, обсадні та експлуатаційні колони можуть призвести до їх пошкодження, що ставить під сумнів можливість проведення таких робіт.

Для послаблення негативних наслідків вибухів застосовуються різноманітні заходи і засоби. Їх аналіз свідчить про наявність двох підходів. Один з них полягає у запиранні газоподібних продуктів вибуху в обмеженому об'ємі, інший – у послабленні механічного впливу вибуху за рахунок дисипації ударних (вибухових) хвиль. Має місце і комбінування обох підходів. Відомі технічні засоби реалізації цих методів мають свої переваги і недоліки. Наприклад, установлення цементних мостів забезпечує надійне відокремлення ділянок свердловин одна від одної [1]. Однак цей метод трудомісткий, зокрема після вибухової обробки мости необхідно розбудувати. Крім того, є й інші недоліки. Більшу оперативність робіт забезпечує застосування вибухових пакерів, але й при цьому мають місце недоліки, подібні наведеним вище.

Для локалізації дії вибуху в свердловинах досить перспективним видається влаштування знімних перешкод різних конструкцій, які опускаються

разом з торпедою або перфоратором, а після проведення операції піднімаються на поверхню і можуть бути використані повторно [2, 3]. Попередні дослідження показали, що основна частка енергії переноситься ударною хвилею по свердловинній рідині, тому в основі знімних пристроїв – локалізаторів вибуху – лежить запирання ударних хвиль в осередку вибуху за рахунок відбиття від перешкод з малою акустичною жорсткістю вибухової хвилі і дисипації її енергії шляхом турбулізації і кавітації потоків рідини. Для створення нових і удосконалення існуючих локалізаторів необхідно ретельно проаналізувати всі можливості генерування, відбиття та поширення вибухових хвиль у стовбурах свердловин при прострільно-підривних роботах.

Використовуючи лінійну теорію і рекомендації [4], можна дати якісний опис хвильової картини у рідині при вибуховій заряду, розміщеного на осі свердловини, і однократному відбитті хвилі від стінки свердловини. У деякий момент часу пряма хвиля досягає стінки свердловини, кут падіння якої

$$\beta = \arccos \frac{L}{\sqrt{L^2 + r_c^2}}, \quad (1)$$

а швидкість руху хвилі вздовж стінки свердловини

$$V_c = \frac{a_0}{\cos \beta}, \quad (2)$$

де  $r_c$  – радіус свердловини;  $L$  – відстань від центру вибуху вздовж твірної свердловини;  $a_0$  – швидкість звуку в рідині.

Як відомо, у безмежних ізотропних циліндричних оболонках можуть поширюватись три типи пружних хвиль з швидкостями:

$$\text{поздовжньої хвилі у пластині } c_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}};$$

$$\text{у стержні } c_2 = \sqrt{\frac{E}{\rho}};$$

$$\text{поперечної хвилі } c_3 = \sqrt{\frac{G}{\rho}},$$

де  $E$  і  $G$  – модулі пружності і зсуву;  $\rho$  – щільність матеріалу оболонки (обсадної труби);  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона.

Спочатку, при великих значеннях  $\beta$ , швидкість  $V_c$  перевищує швидкості  $c_1, c_2, c_3$  в обсадній трубі. Збурення в рідині характеризуються прямими і відбитими хвилями. Відбиття буде регулярним. При деякому значенні кута  $\beta = \beta_1$  швидкості  $V_c$  і  $c_1$  зрівняються, тобто

$$\frac{a_0}{\cos \beta_1} = c_1 \text{ або } \beta_1 = \arccos \frac{a_0}{c_1}. \quad (3)$$

Кут  $\beta_1$  називається кутом повного внутрішнього відбиття поздовжніх хвиль у пластині. При  $\beta < \beta_1$  відбувається перше нерегулярне відбиття.

Поздовжні збурення в обсадній трубі випереджають пряму ударну хвилю і утворюють додаткове хвильове збурення в рідині. При подальшому поширенні ударної хвилі вздовж поверхні труби її швидкість зменшується і при деякому  $\beta = \beta_2$  дорівнює стержневій швидкості  $c_2$ :

$$\frac{a_0}{\cos\beta_2} = c_2; \quad \beta_2 = \arccos \frac{a_0}{c_2}. \quad (4)$$

Кут  $\beta_2$  називається кутом повного внутрішнього відбиття стержневих хвиль. При  $\beta < \beta_2$  стержневі хвилі у трубі обганяють пряму ударну хвилю і утворюють нову хвильову систему в рідині. Відбувається так зване друге нерегулярне відбиття.

Третє нерегулярне відбиття відбувається при  $\beta < \beta_3$ :

$$\frac{a_0}{\cos\beta_3} = c_3; \quad \beta_3 = \arccos \frac{a_0}{c_3}, \quad (5)$$

де  $\beta_3$  – кут повного внутрішнього відбиття поперечних хвиль. Поперечні хвилі у стінці свердловини обженуть пряму ударну хвилю і викличуть ще одну додаткову хвильову систему в рідині.

Існування режиму нерегулярного відбиття при вибухові сферичного заряду в обсадженої свердловині вперше було відмічене в [5]. Це явище було використане для оцінки частки енергії, що припадає на зону регулярного відбиття. Слід відзначити, що виконана оцінка виявилась дещо заниженою, оскільки для визначення кута повного внутрішнього відбиття поздовжніх хвиль брали значення їх швидкості для безмежного масиву з матеріалу обсадної труби, а не для циліндричної оболонки. Та навіть занижена оцінка свідчить про те, що повне внутрішнє відбиття в умовах реальних свердловин забезпечує перенесення по рідині 50 % енергії падаючої хвилі у стовбур свердловини [5].

У зонах нерегулярного відбиття поблизу стінки свердловини перед фронтом ударної хвилі утворюється зона підвищеного тиску (провісник), що виникає внаслідок суперпозиції хвильових збурень, утворених випереджаючими “пластинчастими”, “стержневими” і поперечними хвилями. Цим явищем може пояснюватись наявність значної кількості високочастотних складових на осцилограмах вибухових хвиль у заповнених рідиною свердловинах на малих відстанях від заряду (40...120 $r$ ). Оскільки акустична жорсткість сталі і міцних гірських порід більша, ніж у води – типової свердловинної рідини, то амплітуди провісника малі [4] і слабо впливають на результати вимірювань. Тому в міру поширення вибухової хвилі амплітуда високочастотних складових падає і на відстанях понад 350 $r$ , вони практично зникають [5]. Затухання амплітуди вибухових хвиль, що поширюються по свердловинній рідині, має неоднаковий характер у ближній і дальній зонах вибуху. При вибухах сферичних зарядів у свердловині, заповненій рідиною, на відстані 30...120 $r$ , падіння амплітуди більш різке, ніж у дальній зоні. Можливо, це пояснюється тим, що в зонах регулярного відбиття тиск значно збільшується, а потім ефекти типу повного

внутрішнього відбиття ініціюють розвиток похідних процесів, що закінчуються на відстанях біля  $120r_s$ . На більших відстанях від центру вибуху відбувається незначне згасання амплітуди вибухової хвилі.

Наведений вище аналіз хвильових явищ виконано для вибуху точкового заряду в циліндричній свердловині, заповненій рідиною. Вияснимо, як впливають геометричні розміри сферичного заряду на характер хвильових процесів. Для цього запишемо (1) у такому вигляді:

$$\beta = \arccos \frac{L}{\sqrt{L^2 + (r_c - r_s)^2}}. \quad (6)$$

З (6) випливає, що при деякому збільшенні  $r_s$  кут  $\beta$  зменшуватиметься, а це автоматично спричинить зменшення розмірів зон регулярного відбиття, підвищення у них тиску, збільшення крутизни спаду амплітуди з віддаленням від місця вибуху.

Такі висновки якісно збігаються з експериментальними результатами. При  $r_s = r_c$  кут  $\beta = 0$  і дія вибуху заряду, який повністю перекидає у перерізі свердловину, практично зводиться до поршневої. При зменшенні  $r_c$  зменшується кут  $\beta$ , а, отже, й зона регулярного відбиття. В рідину переходить більша кількість енергії і згасання хвилі вздовж свердловини буде менш інтенсивним.

При аналізі фізичних явищ, які супроводжують вибух у свердловині [3], береться до уваги те, що газоподібні продукти вибуху діють на рідину, що оточує заряд, і утворюють газовий пухир. По завершенні розширення пухиря тиск у ньому досягає гідростатичного або стає меншим від нього і порожнина починає стискатися, а по рідині поширюється хвиля розрідження. Рухаючись до центру пухиря, рідина стискає газ до деякого надлишкового (відносно гідростатичного) тиску, після чого знову починається розширення пухиря, який починає спливати. Вирази для визначення періоду пульсації і радіусу пухиря  $r_{II}$  відомі [6, 7], зокрема радіус визначається за формулою [6]

$$r_{II} = r_s \left( 1 + \frac{3150\tau}{r_s} \right), \quad (7)$$

де  $\tau$  – час, що пройшов з моменту вибуху, мкс.

Згідно з (7) вибухи сферичних зарядів можна розділити на два види. До першого належать вибухи, описані вище, тобто ті, для яких  $r_c > r_{II}$ . Для другого виду вибухів при  $r_c < r_{II}$  значно зменшуються зони регулярного відбиття і зростають пікові тиски на стінки свердловин в області дії вибуху заряду. Природно, зменшуються і зони перехідних процесів, крутішим буде спад амплітуди тиску з віддаленням від заряду, зростає ймовірність зруйнування цементного каменю.

Здійснений аналіз фізико-механічних явищ, які супроводжують вибух сферичних зарядів у свердловинах, вказує на те, що локалізатори вибухової дії найдоцільніше встановлювати у зоні перехідних процесів, де при достатньо високих тисках відбувається взаємодія і перебудова фронтів ударних хвиль.

Цей висновок підтверджується попередніми експериментами [5], де показано, що з наближенням до джерела вибуху ефективність дії локалізатора підвищується.

У праці [8] показано, що удар по рідині в циліндричній оболонці викликає деформацію оболонки у формі біжучої хвилі. Цей факт вказує на необхідність використання теорії дії рухомих навантажень на циліндричній оболонці при описі прострільно-підривних робіт у свердловинах. Пройшовши через локалізатор вибуху, вибухова хвиля при досягненні певної критичної швидкості може справити руйнівну дію при відносно невисоких амплітудах.

1. Григорян Н.Г., Пометун Д.Е., Горбенко А.А. и др. Прострелочные и взрывные работы в скважинах. – М.: Недра, 1972. – 248 с.

2. Лисюк М.О., Михалюк А.В. Підвищення безпечності прострільно-підривних робіт у свердловинах // Інф. бюл. з охорони праці. – 2000. – № 3. – С. 20–21.

3. Гошовський С.В. Застосування енергії вибуху в технологіях спорудження свердловини. – К.: Наукова думка, 2000. – 171 с.

4. Замышляев Б.В., Яковлев Ю.С. Динамические нагрузки при подводном взрыве. – Л.: Судостроение, 1967. – 387 с.

5. Чуриков В.А., Колодий В.И., Черевко М.А. Динамика скважин при взрыво-прострелочных работах. – К.: Наукова думка, 1994. – 173 с.

6. Кнудсен В.С. Поведение газового пузыря в трубе или сфере с отверстиями. Устранение пульсации // Дж. амер. акустик сосаетис. – 1984. – Т. 23. – 440 с.

7. Коул Р. Подводные взрывы. – М.: Изд-во «Иностр. лит-ра», 1950. – 293 с.

8. Мукоид В.П., Луговой П.З. Численные исследования задачи о распространении интенсивной гидроударной волны внутри упругой цилиндрической оболочки // Приклад. механика. – К.: 1998. – Т. 2. – № 5. – С. 42–47.