УДК 62.783

ЗАХИСТ ОБСАДНИХ КОЛОН СВЕРДЛОВИН ЗА ДОПОМОГОЮ НЕРУХОМИХ МОСТІВ І ПРОБОК

М. О. Лисюк, канд. техн. наук, А. В. Михалюк, докт. техн. наук (ННДІОП)

Приведены результаты аналитических расчетов эффективности гашения взрывных волн неподвижными преградами в зависимости от соотношения акустических свойств скважинной жидкости и материала преграды (моста), диссипативной способности этого материала, размера моста. Исследована гасящая способность разноэлементных (несплошных) преград. Приведены расчетные и экспериментальные данные исследований затухания взрывных волн после прохождения защитных мостов из различных материалов.

Відомо [1, 2], що при проведенні прострільно-підривних робіт в глибоких свердловинах обсадна колона зазнає інтенсивного вибухового навантаження, яке може спричинити її перехід в аварійний стан чи вивести з ладу. Тому проблемі захисту обсадних колон здавна приділялась серйозна увага. Однак, незважаючи на досить істотний пакет різноманітних пропозицій щодо локалізації дії вибуху в свердловині [3], ще й досі в практиці промислових робіт перевагу надають спорудженню нерухомих перешкод у вигляді цементних мостів чи пробок з піску, солі та інших матеріалів [4, 5], розміри яких встановлюються інтуїтивно або з використанням мало обґрунтованих формул. Так, наприклад, у [5] висоту цементного мосту рекомендується визначати за формулою

$$h = 14\sqrt{Q},$$

де Q – маса заряду, кг.

Згідно з цим співвідношенням для цілком безпечного заряду масою 5 кг [5] висота моста повинна становити близько 30 м, хоча добре відомо, що навіть при використанні торпед з зарядами в кілька десятків і сотень кілограмів бризантних вибухових речовин міст руйнувався всього на кілька метрів. Подібні ситуації характерні і для інших типів мостів і пробок, висота яких вибирається без урахування особливостей поширення вибухових навантажень в стовбурах свердловин. Нижче пропонується обґрунтування раціональних розмірів і конструкцій нерухомих мостів і пробок і його перевірка шляхом маломасштабного натурного моделювання.

В [1–3] було показано, що основна енергія вибухового навантаження поширюється по свердловинній рідині у вигляді плоскої вибухової хвилі, що повільно затухає з відстанню r від осередку вибуху, підкоряючись степеневому закону

$$p(r) = k_1 \left(r/r_3\right)^{-\mu_1}, \qquad (1)$$

де k_1 і μ_1 – експериментальні коефіцієнти; $r_з$ – радіус заряду.

Якщо така хвиля *1* (рис.1) падає на нерухому перешкоду (наприклад цементний міст) з акустичною жорсткістю, відмінною від акустичної жорсткості свердловинної рідини, вона розпадається на дві хвилі – відбиту *1′* і заломлену *2*, амплітуди яких в акустичному наближенні визначаються відомими співвідношеннями [6]

$$p_1' = p\left((A_2 - A_1)/(A_2 + A_1)\right); \tag{2}$$

$$p_2 = p(\rho_1/\rho_2)\left(2A_2/(A_1 + A_2)\right), \tag{3}$$

де p – амплітуда падаючої хвилі; ρ_1 і ρ_2 – густина свердловинної рідини і перешкоди відповідно; $A_1 = \rho_1 v_1$; $A_2 = \rho_2 v_2$; v_1 і v_2 – швидкості поширення пружних хвиль у свердловинній рідині і перешкоді відповідно.

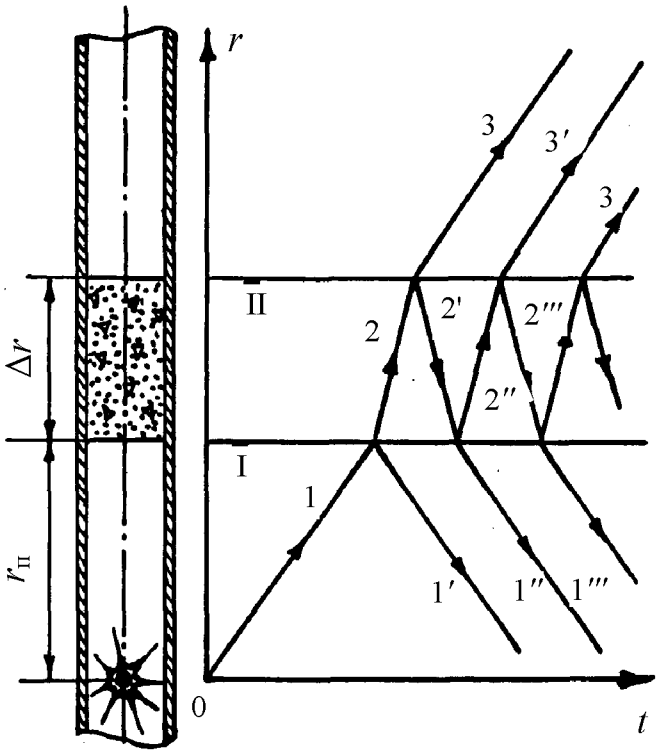

Рис. 1. Хвильові процеси в осередку суцільної нерухомої перешкоди

Заломлена хвиля *2*, поширюючись по перешкоді, втрачає частину своєї енергії на дисипативні процеси, також затухаючи за законом (1), але з коефіцієнтами $k = k_2$ і $\mu = \mu_2$, характерними для середовища перешкоди. Падаючи на верхню межу розділу між перешкодою і свердловинною рідиною, хвиля, в свою чергу, розпадається на відбиту *2′* і заломлену *3* хвилі. Процеси відбиття і заломлення тривають до повного затухання вибухових збурень. Зрозуміло, що найбільше навантаження на обсадну колону несе хвиля *3*. Знайдемо її амплітуду, користуючись акустичним наближенням розпаду хвильових процесів на межах розділу середовищ з різною акустичною жорсткістю.

Згідно з (3) початкова амплітуда заломленої хвилі *2* дорівнює

$$p_2^n = \eta_1 k_1 \left(r_п / r_з\right)^{-\mu_1},$$

де $$\eta_1 = (\rho_1/\rho_2)(2A_2/(A_1 + A_2)); \quad (4)$$

$r_п$ – відстань між осередком вибуху і перешкодою (рис. 1).

На підході до межі II амплітуда хвилі становитиме

$$p_2^k = k_2((r_п + \Delta r)/r_з)^{-\mu_2}, \quad (5)$$

де Δr – довжина перешкоди.

Значення коефіцієнта μ_2 досить часто зустрічається в літературі [6, 7]. Коефіцієнт k_2 визначимо за умови, що при $\Delta r = 0$ амплітуда заломленої хвилі повинна відповідати (4), тобто

$$\eta_1 k_1 (r_п/r_з)^{-\mu_1} = k_2 (r_п/r_з)^{-\mu_2},$$

звідки

$$k_2 = \eta_1 k_1 (r_п/r_з)^{\mu_2 - \mu_1}.$$

Тоді

$$p_2^k = \eta_1 k_1 (r_п/r_з)^{-\mu_1} (1 + \Delta r/r_п)^{-\mu_2} \quad (6)$$

і, згідно з (3), початкова амплітуда хвилі *3* дорівнюватиме

$$p_3^n = 4(\rho_1/\rho_3)(A_2 A_3/((A_1 + A_2)\cdot(A_2 + A_3)))k_1 (r_п/r_з)^{-\mu_1} (1 + \Delta r/r_п)^{-\mu_2}. \quad (7)$$

Хвиля *3* (або результуюче збурення від суперпозиції заломлених хвиль *3*, *3'*, *3''* і т.д.) і її затухання з відстанню по суті визначає розподіл вибухових навантажень на колону за межами захисного бар'єра. Якісно зміна амплітуди вибухової хвилі при проходженні через перешкоду ілюструється схемою на рис. 2.

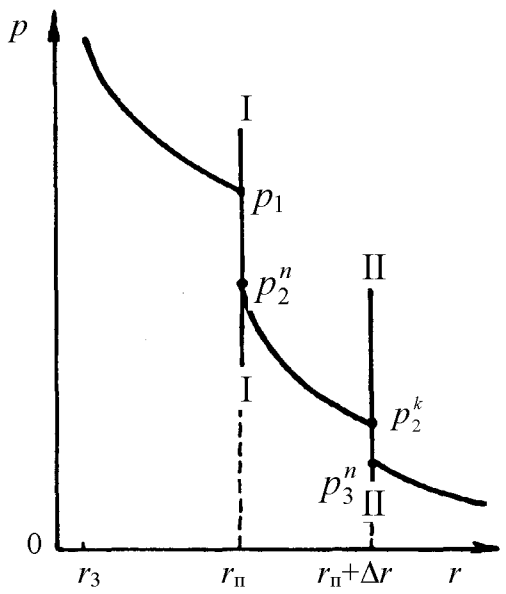

Рис. 2. Зміна амплітуди вибухової хвилі при проходженні через одноелементну нерухому перешкоду

Якщо ефективність захисту свердловини характеризувати відношенням χ тисків перед і за перешкодою, то для захисних бар'єрів, подібних до показаного на рис. 1,

$$\chi = \lambda_* \left(1 + \Delta r / r_{\text{п}}\right)^{\mu_2}, \tag{8}$$

де $$\lambda_* = \left(\rho_3 / (4\rho_1)\right) \cdot \left(\left(\left(A_1 + A_2\right) \cdot \left(A_2 + A_3\right)\right) / \left(A_2 A_3\right)\right).$$

Звичайно свердловина заповнена одним флюїдом, тому властивості середовищ перед і за перешкодою збігаються і формула для λ_* спрощується:

$$\lambda_* = \left(A_1 + A_2\right)^2 / \left(4 A_1 A_2\right). \tag{9}$$

Саме такі випадки будемо розглядати в подальшому.

З (8) і (9) можна зробити кілька корисних висновків.

1. Якщо акустичні властивості свердловинної рідини і матеріалу перешкоди збігаються, її захисні можливості визначаються лише інтенсивністю затухання вибухової хвилі в середовищі перешкоди.

2. Ефективність застосування нерухомих мостів як засобів локалізації дії вибуху тим вища, чим більша різниця між акустичними опорами свердловинного середовища і перешкоди, чим більші розміри перешкоди і дисипативні властивості її матеріалу.

3. Найбільшою ефективністю відзначаються мости, встановлені поблизу осередку вибуху; якщо $\Delta r << r_{\text{п}}$, захисна здатність моста не залежить від дисипативних властивостей його матеріалу, а визначається лише акустичними характеристиками.

4. За інших рівних умов амплітуда вибухової хвилі, яка випромінюється в свердловину за межами перешкоди, нелінійно зростає із збільшенням величини заряду.

Звернемо увагу на те, що при великих тисках (понад $10^3 ... 10^4$ МПа) механічна поведінка більшості середовищ (в тому числі рідин і твердих мінеральних матеріалів) є нелінійною, а тому нелінійними є й хвильові процеси такої інтенсивності. Це вимагає спеціального обґрунтування можливості використання формул (2) і (3) при таких навантаженнях. В практиці промислових робіт захисні пристрої встановлюються в області значно менших навантажень, що забезпечує достатню надійність викладених вище методів розрахунку ефективності локалізації дії вибуху за допомогою нерухомих перешкод.

Зрозуміло, що з точки зору раціонального захисту свердловини важливо, щоб максимальна амплітуда результуючого збурення, яке випромінюється в стовбур свердловини за захисним пристроєм, була щонайменшою, тому, зважаючи на подвійний механізм гасіння вибухового навантаження засобами захисту типу нерухомої перешкоди, іноді важливо встановити, що ефективніше: застосування одного суцільного пристрою довжиною Δr або кількох менших за розмірами елементів з такою ж сумарною довжиною. Для відповіді на це питання зробимо кілька припущень:

акустичні і дисипативні властивості матеріалу одноелементної і мультиелементної перешкод однакові;

зважаючи на слабке затухання вибухових хвиль у рідинах і невелику відстань між окремими елементами, вважатимемо, що поширення хвильових збурень між окремими елементами відбувається без зміни їх амплітуди;

поширення хвильових процесів в межах окремого елемента підкоряється степеневому закону (1).

Принципова схема хвильових процесів при проходженні вибухової хвилі через мультиелементну захисну перешкоду показана на рис. 3, де введено такі позначення: I, II, III,..., n – номери окремих елементів перешкоди; *1*, *3*, *5*,... – поверхні меж розділу середовищ з боку падаючої хвилі; *2*, *4*, *6*,... – те ж з боку заломленої хвилі; r – відстань; t – час; l – довжина окремого елемента.

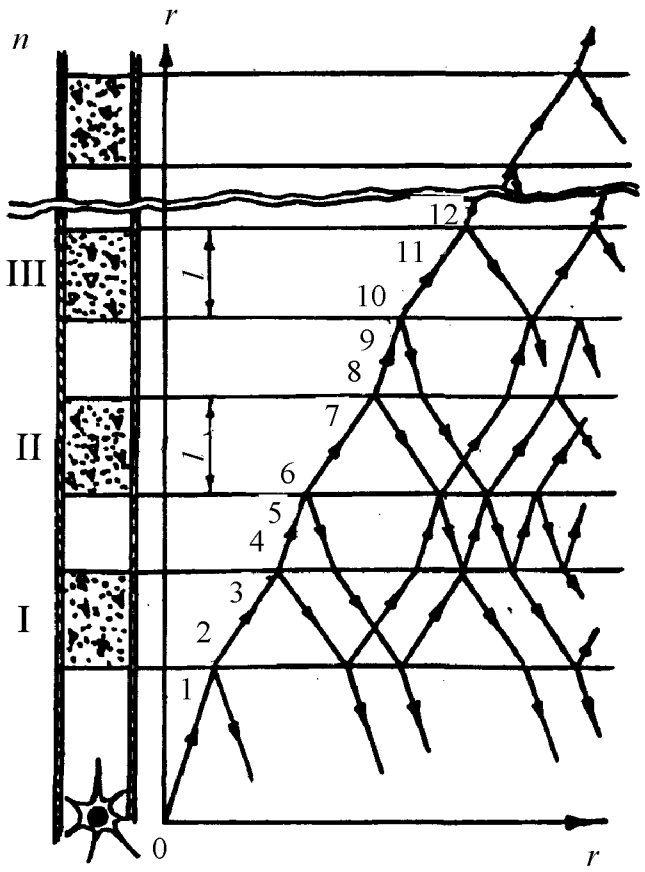

Рис. 3. Особливості хвильових процесів у мультиелементній перешкоді

Якщо всі елементи мають однакову довжину $l = \Delta r/n$, то з співвідношень (1)–(9) легко встановити, що інтенсивність вибухового збурення на виході з n-ого елементу перешкоди визначається за формулою

$$p_{4n} = \left(k_1/\lambda_*^n\right)\left(r_{\text{п}}/r_{\text{з}}\right)^{-\mu_1}\left(1+\Delta r/\left(nr_{\text{п}}\right)\right)^{-n\mu_2}, \qquad (10)$$

де n – кількість окремих рівновеликих елементів у конструкції захисного бар'єра.

Ефективність захисного бар'єра становить

$$\chi = \lambda_*^n\left(1+\Delta r/\left(nr_{\text{п}}\right)\right)^{n\mu_2}. \qquad (11)$$

З цієї формули видно, що ефективність мультиелементного захисного

бар'єра завжди вища, ніж одноелементного, причому основну роль тут відіграє співвідношення між характеристичними імпедансами свердловинного флюїду і матеріалу захисного елемента. Дійсно, через те, що $\Delta r/r_{\text{п}} < 1$, а $n > 1$, вираз в дужках у формулі (11) із збільшенням числа структурних елементів наближається до одиниці і χ цілком залежить від параметра λ_*, який визначається тільки акустичними властивостями середовищ.

Щоб проаналізувати вплив окремих факторів на захисні властивості мультиелементного бар'єра, проведемо розрахунки для умов застосування нерухомих пробок з сухого піску для локалізації дії вибуху торпеди із зарядом масою 5 кг тринітротолуолу, розташованої на відстані 3 м від осередку вибуху. Згідно з експериментальними даними акустичні властивості середовищ такі: вода – $\rho_1 = 1000$ кг/м^3, $v_1 = 1480$ м/с; пісок – $\rho_2 = 1550$ кг/м^3, $v_2 = 100$ м/с. Згідно з [6] коефіцієнт μ_2 може сягати 1,5, тому в розрахунках він варіювався в діапазоні $0{,}5 \le \mu_2 \le 1{,}5$.

Деякі результати розрахунків у вигляді залежностей $\chi = f(n)$ подані на рис. 4, де крива *1* відповідає $\mu_2 = 1{,}5$ і $\Delta r/r_{\text{п}} = 0{,}1$; крива *2* – $\mu_2 = 1{,}5$ і $\Delta r/r_{\text{п}} = 0{,}4$; крива *3* – $\mu_2 = 0{,}5$ і $\Delta r/r_{\text{п}} = 0{,}1$; крива *4* – $\mu_2 = 0{,}5$ и $\Delta r/r_{\text{п}} = 0{,}4$.

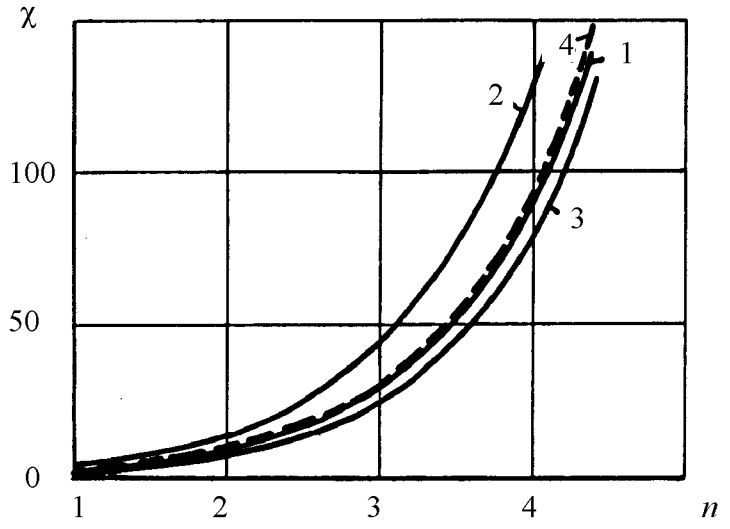

Рис. 4. Вплив кількості структурних елементів на ефективність роботи нерухомого захисного бар'єра

Аналізуючи ці криві, можна зробити такі висновки:

захисні властивості нерухомих бар'єрів швидко зростають із збільшенням кількості їх окремих елементів;

зміна відносних розмірів захисних бар'єрів залежно від їх відстані до осередку вибуху та дисипативних властивостей матеріалу (середовища) структурних елементів порівняно мало впливає на ефективність захисту свердловин;

відносне зниження амплітуди навантаження залежить від величини $nl/r_{\text{п}}$ і не залежить від величини заряду; абсолютна величина амплітуди вихідного вибухового навантаження нелінійно зростає із збільшенням масштабу вибуху;

навіть при застосуванні обмеженої кількості елементів бар'єра стає

можливою практично повна локалізація дії вибуху, що перевірено в промислових умовах при торпедуванні свердловини 85-АХ-10 нафтового родовища “Teapot Dome” (США) і деяких свердловин Мамонтовського родовища нафти і газу (Росія).

Зауважимо, що за викладеною схемою можна розрахувати захисні властивості перешкоди, яка складається з прошарків різних за акустичними і дисипативними властивостями матеріалів, а також з елементів різної величини.

Формулу (11) можна використати і для розв’язання оберненої задачі – вибору раціональної схеми захисного бар’єра, що забезпечує необхідний ступінь зниження інтенсивності вибухового навантаження. В цьому випадку, задаючись технічно доцільною кількістю окремих елементів n, визначають загальну довжину перешкоди і раціональну величину окремого елемента:

$$l = \omega r_{\text{п}}; \quad \Delta r = n\omega r_{\text{п}}; \quad \omega = \left(\chi/\lambda_*^n\right)^{1/(n\mu_2)} - 1. \tag{12}$$

Одним з факторів, що обумовлюють необґрунтоване завищення розмірів цементних мостів і подібних захисних споруд, є забезпечення їх нерухомості під дією вибухового навантаження, яке залежить від сил зчеплення і тертя на контакті цементу (або іншого матеріалу) з обсадною трубою. Враховуючи деякий запас опору перешкоди, умова нерухомості набуває вигляду

$$k^* pd \le 4l\left(c + \left(\nu f/(1-\nu)\right)p\right), \tag{13}$$

де d – діаметр обсадної труби; c і f – коефіцієнти зчеплення і тертя між матеріалами обсадної труби і захисної споруди; n – коефіцієнт Пуассона матеріалу перешкоди; k^* – коефіцієнт запасу, $k^* \approx 1{,}5...2$.

З формули (13) неважко визначити мінімальну величину окремого елемента перешкоди:

$$l_{\min} = k^* pd/4\left(c + \left(\nu f/(1-\nu)\right)p\right). \tag{14}$$

Як бачимо, мінімальна довжина елемента захисного бар’єра, що забезпечує його нерухомість під дією вибуху, прямо пропорційна діаметру обсадної колони і нелінійно зростає із збільшенням амплітуди падаючої вибухової хвилі, асимптотично наближаючись до граничного значення при $p \to \infty$, яке, згідно з правилом Лопіталя, становить

$$\lim_{p\to\infty} l_{\min} = k^* d\left(1-\nu\right)/\left(4\nu f\right), \tag{15}$$

тобто мінімальна величина l не залежить від сил зчеплення між бар’єрним елементом і обсадною трубою (або стінками свердловини), а визначається тільки силами тертя по поверхні контакту.

Зважаючи на те, що стінки обсадної труби змочуються свердловинним флюїдом (водою, нафтою тощо), коефіцієнт тертя може набувати досить малих значень. Згідно з [8] величина $f \approx 0{,}05...0{,}1$. Нескладні розрахунки за формулою (15) показують, що за несприятливих умов $l_{\min}$ може становити 3 м і більше, тобто бути одного порядку з величинами Δr і l, визначеними за формулами (8) і

(12). Це означає, що коефіцієнт тертя між середовищем перешкоди і обсадною трубою відіграє важливу роль у визначенні оптимальної конструкції засобу захисту такого типу. На жаль, детальна інформація про величину f залежно від матеріалів обсадних труб і перешкоди, стану труб, типу свердловинного флюїду і т.п. відсутня, що значно ускладнює оптимізацію конструкції захисних бар'єрів нерухомого типу.

Як приклад проведемо обчислення одноелементного бар'єра для умов торпедування свердловини, обсадженої трубами 146×10 згідно з ГОСТ 632-64, зарядом тринітротолуолу масою 5 кг. Для захисту свердловини від руйнування використаємо міст з шлако-піщаного цементу, встановлений на відстані $r_п = 3$ м від заряду. Акустичні властивості цементу: $\rho_2 = 2000$ кг/м^3, $v_2 = 3200$ м/с, $A_2 = 6{,}4 \cdot 10^6$ кг/(м^{2}с). Згідно з формулою (9) $\lambda_* = 1{,}64$. Відповідно до даних, наведених в праці [2], $k_1 = 148$ МПа, $\mu_1 = 0{,}226$. За допомогою формули (1) знаходимо, що амплітуда вибухової хвилі на підході до мосту становить майже 70 МПа. Як зазначено в [9], максимальний тиск, який витримує незацементована труба вказаного вище розміру, становить 45,5 МПа, тобто враховуючи подвійний запас надійності, міст повинен забезпечити зниження амплітуди вибухового навантаження в

$$\chi = 2 \cdot 70 / 45{,}5 \cong 3 \text{ рази.}$$

Для плоскої хвилі в шлако-піщаному цементі $\mu \approx 0{,}8$, тоді згідно з формулами (8) або (12)

$$\Delta r = 3\left[(3/1{,}64)^{1/0{,}8} - 1\right] \cong 3{,}4 \text{ м.}$$

В разі використання двоелементного моста

$$l = 3\left[\left(3/1{,}64^2\right)^{1/(2\cdot 0{,}8)} - 1\right] = 0{,}21 \text{ м,}$$

тобто необхідний технологічний ефект може бути забезпечений бар'єром значно меншого розміру. Проте тут слід враховувати вимогу нерухомості бар'єру за формулою (14).

З цих розрахунків видно, що надійний захист колони може бути забезпечений цементним мостом майже на порядок меншого розміру, ніж це прогнозується традиційними методами розрахунків [5].

Для визначення потенційних можливостей застосування цементних мостів з метою захисту свердловин від вибухових навантажень були проведені експериментальні дослідження методом маломасштабного натурного моделювання з реєстрацією амплітуд вибухових збурень і їх еволюції з відстанню від осередку вибуху. В експериментах застосовували мости з цементно-піщаної суміші та пінобетону (табл. 1).

ТАБЛИЦЯ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА МОСТІВ

Матеріал моста	Δr, м	ρ_2, кг/м^3	v_2, м/с	$A_2 \cdot 10^{-6}$, кг/(м^{2}с)
Цементно-піщана суміш	0,4	2500	4480	11,20
Пінобетон	0,4	2250	3720	8,37

Для дослідів використовували свердловини діаметром до 160 мм, пробурені по наносам, складеним суглинками щільністю $(1{,}9...2{,}01)\cdot 10^3$ кг/м^3, пористістю 32,5...37,0 %, вологістю 7,7...16,1 %. Свердловини обсаджували трубами 114,3×7, ГОСТ 632-64. Затрубний простір цементували цементно-піщаною сумішшю на основі портландцементу М400. Всередину обсадної труби вставляли трубу 73×11, ГОСТ 631-75 нафтового сортаменту. По осі труби розміщували заряд гексогену, маса якого у тротиловому еквіваленті варіювалась від 1,5 до 10 г, запускаючий пристрій вимірювальної і реєстраційної апаратури, датчики тиску, локалізатор (міст), довжина якого приблизно відповідала половині довжини падаючої вибухової хвилі. Перед вибухом обидві труби заповнювали водою. Така конструкція свердловини забезпечувала незалежність результатів досліджень від коливань властивостей заколонного простору. Детальне обґрунтування методики спостережень і контрольно-вимірювальної апаратури подане в [3].

Результати спостережень у вигляді залежностей $p(r/r_3)$ наведені на рис. 5, де крива *1* відображає затухання вибухової хвилі в свердловині з цементним мостом, крива *2* – з мостом з пінобетону і крива *3* – без застосування засобів захисту. Прямокутниками відзначено інтервали між засобами захисту.

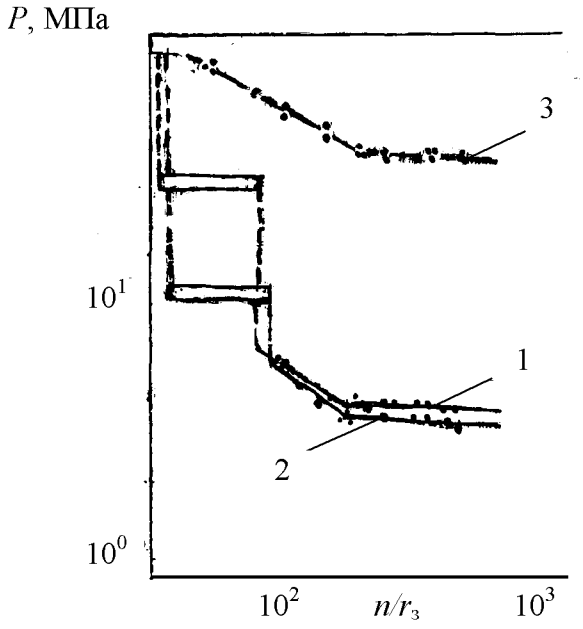

Рис. 5. Особливості затухання вибухових хвиль у стовбурах свердловин при застосуванні засобів захисту колон у вигляді нерухомих мостів

Слід відзначити, що зареєстроване затухання вибухових хвиль має всі особливості, на які зверталась увага в роботі [2], а саме: степеневий закон зниження амплітуди збурення та існування двох областей з коефіцієнтами k і μ (табл. 2).

ТАБЛИЦЯ 2. ПАРАМЕТРИ ВИБУХОВИХ ПРОЦЕСІВ

№ кривої	k_1, МПа	μ_1	$r_*/r_з$	k_2, МПа	μ_2
1	76,0	0,567	166	5,73	0,0605
2	58,5	0,534	170	5,21	0,0628
3	918,5	0,588	184	61,24	0,0707

Примітка. r_* – відстань, що розмежовує області швидкого (k_1, μ_1) і повільного (k_2, μ_2) затухання вибухових хвиль.

Однак найважливішим результатом експериментів є підтвердження того факту, що застосування нерухомих бар'єрів сприяє значному зниженню інтенсивності вибухового навантаження обсадних колон свердловин. У табл. 3 наведені відомості про їх усереднену ефективність, розраховані за викладеними вище рекомендаціями ($\chi_{розр}$) і встановлені експериментально ($\chi_{експ}$), а також інформація про їх розбіжність.

ТАБЛИЦЯ 3. ЕФЕКТИВНІСТЬ ГАСІННЯ ВИБУХУ

Тип мосту	$\chi_{розр}$	$\chi_{експ}$	$\Delta\chi$	
			$\chi_{експ} - \chi_{розр}$	%
Цементно-піщаний міст	9,40	10,45	+1,05	+10,05
Пінобетонний міст	10,29	10,83	+0,54	+4,99

Як випливає з таблиці, застосування таких мостів дозволить більш ніж на порядок зменшити амплітуду вибухового навантаження на колону. Зважаючи на те, що амплітуда вибухової хвилі при пострільно-підривних роботах в свердловинах не перевищує 150...250 МПа, таке зниження навантаження достатнє для захисту обсадних труб від руйнування [9].

1. *Лисюк М. О., Михалюк А. В.* Вибухові навантаження в обсадних колонах свердловин при торпедуванні та розрахунок гранично допустимих зарядів // Проблеми охорони праці в Україні. – К.: ННДІОП. – 2001. – № 4. – С. 30–47.
2. *Михалюк А. В., Лысюк Н. А.* Динамическое нагружение обсадной колонны при взрыве внутри скважины // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2001. – № 6. – С. 59–65.
3. *Чуриков В. А., Колодий В. И., Черевко М. А.* Динамика скважин при взрыво-пострелочных работах. – К.: Наук. думка, 1994. – 174 с.
4. *Вайхельт Ф.* Руководство по промышленным взрывным работам. - М.: Госстройиздат, 1960. – 496 с.
5. *Пострелочные и взрывные работы* в скважинах / Н. Г. Григорян, Д. Е. Пометун, Л. А. Горбенко и др. – М.: Недра, 1972. – 288 с.
6. *Ляхов Г. М., Полякова Н. И.* Волны в плотных средах и нагрузки на сооружения. – М.: Недра, 1967. – 232 с.
7. *Поведение грунтов* под действием импульсных нагрузок / А. А. Вовк, Б. В. Замышляев, Л. С. Евтерев и др. – К.: Наук. думка, 1984. – 288 с.
8. *Енохович А. С.* Краткий справочник по физике. – М.: Высшая школа, 1976. – 288 с.

9. *Иогансен К. В.* Спутник буровика. – М.: Недра, 1981. – 199 с.