

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХВИЛЕВОДУ СИСТЕМИ ІНІЦІЮВАННЯ ТИПУ “НОНЕЛЬ”**

***В. Г. Кравець, докт. техн. наук, О. О. Фролов, канд. техн. наук  
(НТУУ “КПІ”), А. З. Маргарян (ДержНДІХП, м. Шостка)***

*Приведены методика и результаты исследований силовых и кинематических характеристик процесса распространения ударных волн в волноводе иницирующей системы типа “Нонель”.*

На прикладі США, як провідного споживача промислових вибухових речовин (ВР) і засобів їх підривання, можна прослідкувати поширення нових видів неелектричних систем ініціювання свердловинних та шпурових зарядів, які ґрунтуються на переміщенні ударних хвиль по каналу [1]. Ці системи характеризуються підвищеною безпекою, простотою використання, забезпечують безвідмовне підривання в найскладніших гірничогеологічних умовах і дозволяють складати схеми короткосповільненого підривання з широкими діапазонами інтервалів сповільнення. Найбільш відомою є система “Нонель”, в основі конструкції якої лежить порожнистий пластмасовий шнур – хвилевід, внутрішня поверхня якого покрита шаром вибухової реагуючої суміші. При ініціюванні ця суміш, розкладаючись у каналі хвилеводу, утворює і підтримує ударну хвилю (УХ), що переміщується із швидкістю близько 2000 м/с.

Ударна хвиля несе енергію, достатню для ініціювання спеціального капсуль-детонатора, закріпленого на одному з кінців хвилеводу. Рівень енергії ударної хвилі недостатній для необоротного деформування пластмасової трубки хвилеводу, тому остання виконує в основному роль провідника сигналу.

В рамках дослідних робіт, спрямованих на розробку вітчизняної неелектричної системи ініціювання, проводилась перевірка властивостей та переваг зарубіжних систем “Нонель” [2–4]. Оскільки процеси поширення ударної хвилі у хвилеводі протікають аналогічно детонаційним процесам у низькошвидкісних вибухових речовинах, то використовується традиційна методика досліджень, що базується на застосуванні чутливих датчиків та осцилографічної реєстрації [5, 6].

Об’єктом досліджень є циліндрична поліетиленова оболонка – трубка кругового поперечного перерізу із зовнішнім діаметром 3,2 мм, внутрішнім діаметром 1,3 мм. Ці значення отримані за допомогою мікроскопа МБС-1 з 56-кратним збільшенням. Довжина досліджуваних трубок змінювалась від 150 до 1000 мм в залежності від мети дослідів.

Фізико-механічні параметри матеріалу трубки: поліетилен з щільністю  $\rho = 940 \text{ кг/м}^3$ ; модуль пружності  $E = 0,76 \cdot 10^9 \text{ Па}$ ; коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0,4$ .

Досліджувались два типи поліетиленових трубок. Одні трубки були без внутрішнього покриття, інші були покриті рівномірним шаром ВР – гексогену ( $16 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}$  довжини трубки). Спостереження за напиленим шаром гексогену під мікроскопом показали наявність в ньому крупинок ВР розміром до 0,3 мм. В подальшому поліетиленову трубку з напиленою на внутрішню поверхню ВР називатимемо детонувальним шнуром (ДШ).

Відрізок досліджуваної поліетиленової трубки розміщувався на плоскій поверхні дерев'яної панелі, до якої він кріпився хомутиками (рис. 1). На відстані 10–15 мм від кінця трубки через невеликі отвори, проколоті голкою, розміщувалися тонкі (діаметром 0,07 мм) мідні дротинки довжиною 15 мм. Їх кінці з зовнішньої сторони трубки ДШ припаювались до центральної жили коаксіального високовольтного кабелю. На дротинки в заданий момент подавалась висока напруга від попередньо заряджених конденсаторів електророзрядного пристрою.

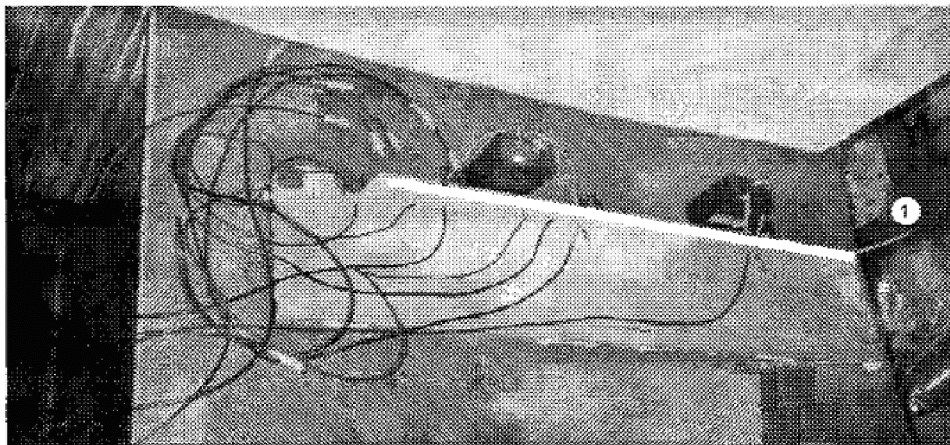


Рис. 1. Загальний вигляд відрізка ДШ, розміщеного на поверхні дерев'яної панелі

В електророзрядному пристрої як накопичувач енергії використовуються високовольтні конденсатори типу ІМК-25-12 загальною ємністю  $4,8 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$ . Імпульс тиску всередині поліетиленової трубки створювався в момент електровибуху провідника. Період коливального процесу, що генерувався електровибухом провідника, дорівнював приблизно  $10^{-4} \text{ с} \pm 20 \%$ .

Протилежний кінець поліетиленової трубки було закрито п'єзокерамічним датчиком тиску. Чутливий елемент датчика із п'єзокераміки ЦТС-19 розмірами  $1 \times 1 \times 0,3 \text{ мм}$  підпаювався до коаксіального антивібраційного високочастотного кабелю АВК-3, при цьому посріблені плоскі поверхні п'єзоелемента розташовувались перпендикулярно до осі кабелю. Після акустичного захисту бічних поверхонь п'єзокераміки та заливки епоксидною сумішшю датчик тиску отримав форму конуса, основа якого сприймала дію хвилі тиску. Щоб датчик тиску не реагував на хвилі стиснення, що

поширюються матеріалом трубки ДШ, він встановлювався на однаковій відстані (в усіх дослідах вона дорівнювала товщині леза – 0,15 мм) від її кінця.

При таруванні датчика тиску встановлювалась відповідність між значенням сигналу датчика в мілівольтах і значенням тиску в хвилі, що поширюється по каналу діафрагмової ударної труби [7].

Якщо ударна хвиля поширюється по каналу з швидкістю  $W_1$  і має число Маха  $M_1 = \frac{W_1}{a_1}$ , то тиск в ударній хвилі  $p_2$  може бути виражений функцією

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{2\gamma \cdot M_1^2 - (\gamma - 1)}{\gamma + 1}, \quad (1)$$

де  $p_1$  і  $M_1$  – тиск і відносна швидкість звуку в газі перед фронтом хвилі (число Маха);  $a_1$  – швидкість звуку в повітрі;  $\gamma$  – співвідношення питомих теплоємностей газу.

Ударна труба, що застосовувалась для тарування датчиків, має прямокутний внутрішній переріз  $210 \times 140$  мм. Камера і канал, заповнені повітрям при атмосферному тиску, розділяються діафрагмою, матеріал якої добирається залежно від бажаної інтенсивності хвилі. В камеру нагнітається повітря доти, поки діафрагма не прорветься.

Вимірявши швидкість поширення прямого стрибка ущільнення  $W_1$ , можна обчислити за співвідношенням (1) величину стрибка тиску, що діє на тарований датчик і виробляє електричний сигнал фіксованої величини.

Час проходження ударною хвилею заданої відстані вимірювався за допомогою датчика з похибкою  $\pm 2$  %. Використовуючи залежність (1), можна визначити величину стрибка тиску у фронті УХ з відносною похибкою  $\pm 5$  %.

При таруванні датчиків у кожному досліді фіксувалась температура повітря з точністю  $\pm 0,2$  %. Вимірювання температури необхідні для визначення швидкості звуку  $a_1$  у повітрі, в якому рухається хвиля.

Профіль хвилі тиску, за яким вимірювався сигнал тарованого датчика, фіксувався на осцилограмах. Відносна похибка тарування склала близько 10 %.

Специфіка реєстрації тиску в хвилі, яка рухається по внутрішньому каналу поліетиленової трубки малого діаметра, дозволяє розташувати датчик тиску, лише перекривши кінцевий зріз трубки. Тому тарування датчика здійснювалось при розміщенні датчика в кінці невеликого (20–50 мм) відрізка відпрацьованої трубки ДШ, другий кінець якої входив у канал діафрагмової ударної труби через отвір у торцевій сталевій пластині. Зміна довжини трубки в межах 20–50 мм не вносила помітних змін в осцилограму тарувальної хвилі тиску.

Крім торцевого датчика тиску, в дослідах використовувались невеликі пластинки п'єзокераміки ЦТС-19 товщиною 0,3 мм, наклеєні на зовнішню поверхню поліетиленової трубки. Сигнали від п'єзокераміки знімалися за допомогою коротких відрізків тонких мідних дротинок діаметром 0,1 мм,

припаяних одним кінцем до посріблених поверхонь п'єзокерамічних пластинок, а другим кінцем – до коаксіального антивібраційного кабелю АВК-3. Отримані при деформації п'єзокерамічного елемента електричні сигнали подавались на електронні осцилографи типу С9-8. Використання двох п'єзокерамічних пластинок з відомою відстанню між ними дозволило обчислити середню швидкість поширення збурення по хвилеводу між п'єзоелементами з похибкою близько 5 %.

Після реєстрації параметрів детонації ДШ поліетиленова трубка використовувалась знову, при цьому в кожному досліді встановлювалась нова дротинка ідентичних розмірів, яка ініціювала запускаючий імпульс тиску при електровибуху.

У перших дослідах визначались характер і швидкість хвилі тиску, яка поширювалась по каналу ДШ. В десяти дослідах електровибух провідника довжиною 15 мм здійснювався не всередині трубки, а поблизу її торця (3–35 мм), попередньо заклеєного тонкою жорсткою пластинкою діаметром близько 5 мм. Такий імпульс не приводив до початку процесу детонації у внутрішньому каналі поліетиленової трубки ДШ, однак генерував у матеріалі хвилеводу слабкі поздовжні хвилі стиснення, швидкість яких  $U$  також обчислювалась за відомою відстанню між п'єзоелементами та інтервалом часу між характерними точками осцилограми.

Деформації поліетиленової трубки ДШ реєструвались за допомогою тензорезисторів типу 5П1-1-200-В-12 (коефіцієнт тензочутливості  $K = 2,12$ ), включених в потенціометричну схему. Тензорезистори наклеювались на зовнішню поверхню трубки так, що при поширенні детонації показання датчиків давали можливість зареєструвати окружні деформації зовнішньої поверхні трубки, а, отже, визначити швидкість радіального переміщення  $u_n$  стінки трубки. Сигнали від тензорезисторів подавались на запам'ятовуючі осцилографи С8-13 і С8-17.

Типові осцилограми, які фіксувались за сигналами від двох пластинок п'єзокераміки, наклеєних на зовнішню поверхню ДШ, показані на рис. 2 а, б. Відстань між п'єзоелементами становила  $50 \pm 1$  мм, час приходу сигналу в мкс відлічувався за характерними точками осцилограм з похибкою  $\pm 10^{-6}$  с.

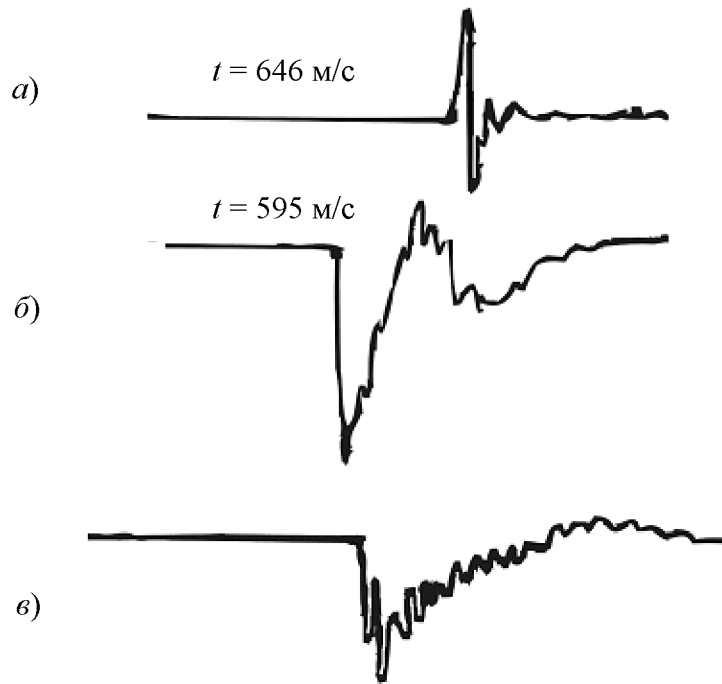


Рис. 2. Характерні осцилограми деформацій хвилеводу: *а* – сигнали від другого датчика; *б* – сигнали від першого датчика; *в* – сигнали від торцевого датчика

На рис. 3 по осі абсцис відкладено координату середніх точок між парами п'єзокерамічних датчиків, що фіксують момент приходу до них фронту збурення. Точками позначено швидкість поширення в каналі ДШ хвилі тиску тільки від електровибуху дротинки. Слід відзначити значний розкид експериментальних точок, пов'язаний з розкидом параметрів ініціюючого електровибуху, і помітну тенденцію падіння швидкості хвилі з віддаленням її фронту від епіцентру джерела електровибуху. Середня швидкість на відстані 0,1–0,15 м від електровибуху дорівнює 1300 м/с, на відстані  $\sim 0,24$  м – 400–500 м/с.

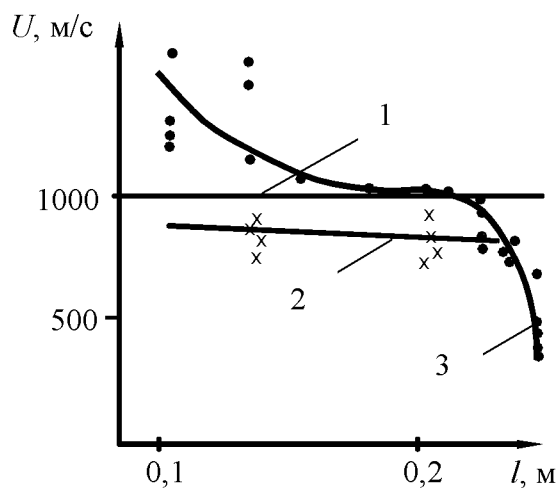


Рис. 3. Характер розподілу швидкості фронту збурення у хвилеводі: 1 – рівень швидкості детонації у хвилеводі з напленням; 2 – залежність швидкості детонації від відстані вимірювання поблизу торця трубки; 3 – залежність швидкості детонації у хвилеводі без наплення (детонація відсутня)

Хрестиками позначено результати вимірювання швидкості  $U$  поздовжньої хвилі стиснення, що виникає поблизу закритого торця поліетиленової трубки. Значення  $U$ , отримане як середнє арифметичне за результатами десяти дослідів, становить 840 м/с.

На рис. 2, в наведено осцилограму, що записана торцевим датчиком тиску при збудженні процесу детонації в поліетиленовій трубці ДШ довжиною 1 м. Перший пік з наростанням тиску протягом 1 мкс в семи дослідах мав значення  $(20 \pm 5) \cdot 10^5$  Па. У другому пікові протягом кількох мікросекунд тиск наростав до  $25 \cdot 10^5$  Па з подальшим спаданням приблизно за  $150 \cdot 10^{-6}$  с.

Результати вимірювання швидкості поширення хвилі детонації по внутрішньому каналу трубки ДШ на різних відстанях від джерела вибуху показані на рис. 4. Досліджувались відрізки трубок довжиною 0,5 м (1) та 1,0 м (2).

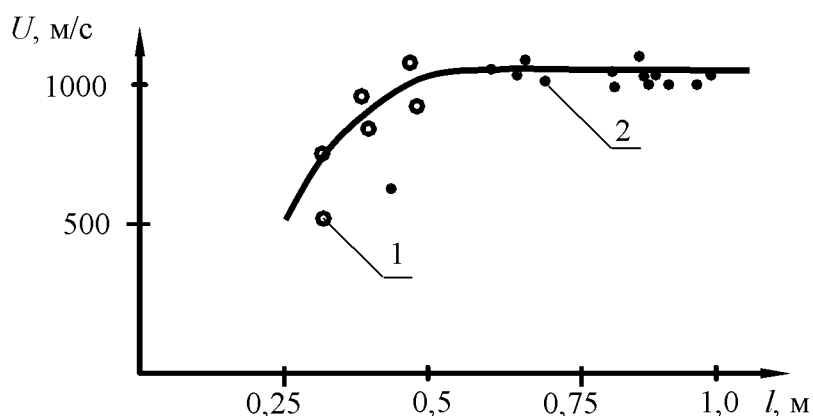


Рис. 4. Розвиток хвилі детонації по довжині хвилеводу

У початковій зоні зародження детонаційного процесу не вдалося виконати вимірювання через великі електричні наведення, що виникають на каналах реєструючої апаратури внаслідок електророзряду. Досліди показують, що після електровибуху механічний процес перетворення напленої ВР відбувається із зростаючою швидкістю в каналі ДШ довжиною 0,5 м (ділянка розгону). У подальшому процес детонації проходить з постійною швидкістю  $\sim 1000$  м/с. Таким чином, можна зробити висновок, що переддетонаційний процес розкладу напленої ВР для даного ДШ відбувається на відрізку 0,5 м від точки ініціювання.

Деформації поверхні трубки в часі фіксувалася тим же датчиком, який фіксував хвилю тиску під час детонації ДШ від електровибуху. Похибки у вимірюваннях деформацій ДШ, які виникають за рахунок дії електровибуху на відстанях більше 0,44 м від точки ініціювання, не перевищують 5 %.

На рис. 5 чітко простежується переддетонаційний процес горіння і утворення детонаційної хвилі в каналі поліетиленової трубки ДШ. Амплітудне значення сигналу тензорезистора зростає, фронт стає більш крутим, загальна тривалість сигналу зменшується. На відстані 0,9 м від електророзряду, де процес детонації стабілізується, середнє значення відносної окружної деформації досягає  $0,5 \cdot 10^{-3}$ , тривалість імпульсу становить  $4 \cdot 10^{-4}$  с.

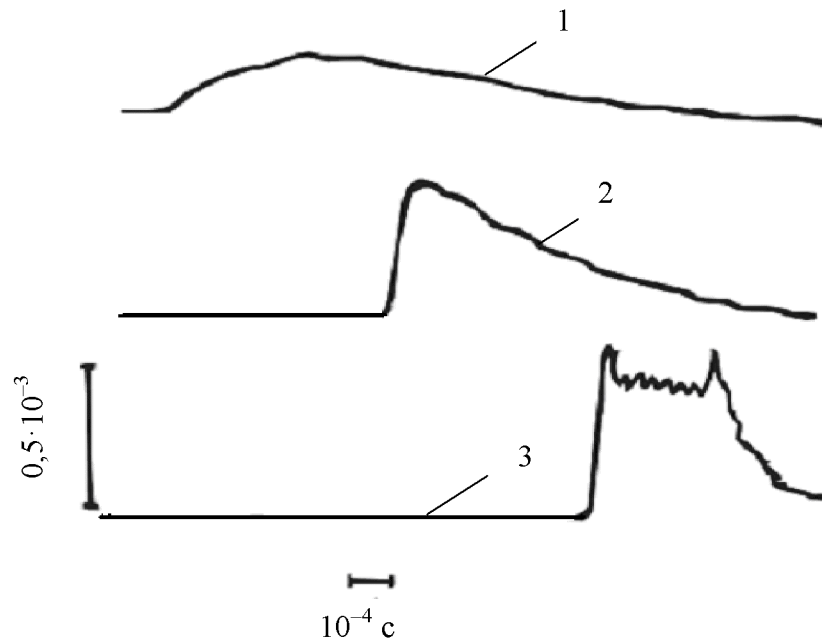


Рис. 5. Осцилограми деформування трубки ДШ на відстані 0,28 м (1), 0,4 (2) і 0,9 м (3) від точки ініціювання

### Висновки

Наведені матеріали мають в першу чергу методичне значення, оскільки вони можуть слугувати основою для подальших досліджень по створенню надійних засобів неелектричного безпечного ініціювання свердловинних і шпурових зарядів та контролю їх якості. Як показує аналіз отриманих результатів, комплексна методика лабораторних досліджень забезпечує достатню точність вимірювання основних експлуатаційних характеристик хвилеводу типу “Нонель” – похибки переважно не перевищують 5 %.

Порівняно з зарубіжними аналогами досліджуваний хвилевід характеризується значно нижчою швидкістю детонації. Це пояснюється крупністю частинок напиленої ВР. Міцність оболонки хвилеводу та висока якість наплення ВР на внутрішню поверхню поліетиленової трубки підтверджується стабільністю отримуваних в серії дослідів детонаційних параметрів хвилеводу.

Коливання енергії ініціюючого електровибуху практично не впливали на довжину розгону детонаційної хвилі в хвилеводі, що склала близько 0,5 м. Крім того, імпульс тиску на протилежному від місця ініціювання кінці хвилеводу (2,0–2,5 МПа) цілком достатній для збудження детонації в

спеціальних проміжних капсулях. Відносно низька швидкість детонації (1000 м/с) дозволить використовувати хвилевід як елемент сповільнення і формувати вибухову мережу з потрібними ступенями сповільнення при меншій витраті хвилеводу.

1. Барон В. Л., Кантор В. Х. Техника и технология взрывных работ в США. – М.: Недра, 1989. – 376 с.

2. Граевский М. М., Кутузов Б. Н. Технико-экономическое сопоставление электрических и неэлектрических систем инициирования зарядов ВВ // Горный журнал. – № 5. – 2000. – С. 54–59.

3. Инструкция по эксплуатации системы «Нонель» / Шведский институт испытаний и исследований, 1998. – 55 с.

4. Биков Д. Г., Фролов О. О. Перспективи використання неелектричної системи ініціювання “Нонель-Юнідет” в умовах ВАТ “Полтавський ГЗК”. Вісник НТУУ “КПІ”. Серія “Гірництво”: Зб. наук. праць. – Київ: НТУУ “КПІ”. – 2000. – Вип. 3. – С. 69–71.

5. Аникиев И. И., Михайлова М. И., Сущенко С. А. Неразрушающий способ определения критических нагрузок многоэлементных стержневых опор. – ДНАН Украины. – 1993. – № 13. – С. 45–47.

6. Механика композиционных материалов и элементов конструкций. – Т. 3 // Под общ. ред. А. Н. Гузя. – К.: Наук. думка, 1983. – 264 с.