

## Список літератури

1. Глушко В.Т. Инженерно-геологические особенности железорудных месторождений / Глушко В.Т., Борисенко В. Г. – М.: Недра, 1978. – 253 с.
2. Технология комплексной переработки и использования богатых руд гидродобычи КМА / Л. А. Ломовцев, А. В. Максимов, Ф. М. Журавлев [и др.] // Горный журнал. –1995. – №1. – С. 39-42.
3. Тарасютин В. М. Геотехнологические свойства высококачественных маритовых руд глубоких горизонтов шахт Кривбасса / В. М. Тарасютин // Науковий вісник НГУ. – 2015. – №1. – С. 54-59.
4. Чернококур В. Р. Добыча руды с поэтажным обрушением / В. Р. Чернококур, Г. С. Шкробко, В. И. Шелегада. – М.: Недра, 1992. – 271 с.
5. Черненко А. Р. Подземная добыча богатых железных руд / А. Р. Черненко, В. А. Черненко. – М.: Недра, 1992. – 224 с.
6. Дулин А. Н. Управление качеством на предприятии при раздельной и валовой выемке ископаемых / А. Н. Дулин, Б. Ю. Сердюновский, Р. А. Дулина – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2002. – 34 с.
7. Волков В. М. Основные направления развития геотехнологии и геотехники подземной разработки рудных месторождений / Волков Ю. В., Соколов И. В. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2007. – №11. – С. 270-272.
8. Ступнік М. І. Стан і перспективи розвитку підземних гірничих робіт у Криворізькому басейні / Ступнік Н. І., Колосов В. О., Калініченко В. О. // Розробка родовищ: зб. наук. пр. – 2013. – Т.7 – С. 223-228.
9. Ступник Н. И. Пути совершенствования технологии подземной разработки богатых руд Кривбасса / Н. И. Ступник, М. И. Кудрявцев, А. М. Басов // Вісник Криворізького технічного університету. – 2010 – Вип. 26. – С. 23-26.
10. Кудрявцев М. И. Сравнительная оценка систем поэтажного обрушения по фактору извлечения чистой руды в условиях подземного Кривбасса / М. И. Кудрявцев, Н. И. Ступник, Т. С. Грищенко // Вісник КТУ. – 2011 – Вип. 28. – С. 3-5.
11. Проблемы геотехнологических процессов комплексного освоения суперкрупных рудных месторождений / под ред. К. Н. Трубецкого, Д. Р. Каплунова. – М.: ИПКОН. – 2005. – 248 с.
12. Колесников В. И. Особенности рационального недропользования при освоении месторождений богатых руд / В. И. Колесников, В. И. Стрельцов, С. Э. Мининг // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). – 2000. – №9. – С. 31-36.
13. Сквжинная гидродобыча полезных ископаемых / В. Ж. Аренс, О. М. Гридин, Е. В. Крейнин и др. – М.: Изд-во «Горная книга», 2007. – 295 с.
14. Тарасютин В.М. Экспериментальные исследования процессов скважинной гидротехнологии в шахтных условиях / Тарасютин В. М., Гирич В. С., Монастырский Ю. А. // Разработка рудных месторождений. – 1998 – Вип. 63. – С. 16-20.
15. Курленя М. В. Техногенные геомеханические поля напряжений / М. В. Курленя, В. М. Серяков, А. А. Ерёмченко. – Новосибирск: Наука, 2005. – 264 с.
16. Савич И. Н. Современные тенденции в развитии технологии с обрушением и их совершенствование при подземной разработке апатитовых месторождений Хибин / И. Н. Савич, А. С. Кузьменко // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). – 2005. – №13. – С. 218-220.

Рукопись поступила в редакцию 18.04.17

УДК 539.3: 622.233

В.М. ЗДЕЩИЦ, д-р техн. наук, проф., А.В. ЗДЕЩИЦ, аспирант  
Криворізький державний педагогічний університет

## ПОШИРЕННЯ ПРУЖНИХ ХВИЛЬ В СТЕРЖНЯХ ЗМІННОГО ПЕРЕРІЗУ

**Мета.** Вимірювання тривалості удару та швидкості поширення пружних хвиль в металевих стрижнях змінного перерізу, а також визначення залежності швидкості від геометричних та фізичних характеристик стрижня.

**Методи дослідження** засновані на використанні відомих положень теорії удару, розв'язку задач про подовжене зіткнення стрижнів. Для проведення вимірювань застосовувалися сучасні цифрові прилади. Експериментальна обробка даних виконувалася, в основному, методом найменших квадратів. Розрахунки і аналіз експериментальних даних виконувалися з використанням сучасної обчислювальної техніки і програмного забезпечення.

**Наукова новизна.** Вперше отримана синусоподібна функціональна залежність швидкості поширення пружної хвилі від калібру ступінчастого стрижня, тобто від форми бічної поверхні стержня.

**Практична значимість.** Розроблено спосіб отримання величини максимальної швидкості подовжньої хвилі в зразках гірської породи. Ці дані можна використовувати для аналізу напружено-деформованого стану гірського масиву та інших об'єктів при їх ударному навантаженні.

**Результати.** При ударі в стрижні як у твердому тілі поширюються хвилі кількох типів з різними швидкостями. Проведений аналіз поширення пружних хвиль в круглих стрижнях показав, що значення середньої швидкості поши-

рення хвилі в коротких стрижнях відрізняється від швидкості хвилі, яка визначається в одновимірній теорії. Для вимірювання швидкості пружних хвиль використовувалися два способи: а) за часом розповсюдження пружної хвилі в стрижні (реєстратор – п'єзодатчик), б) за часом зіткнення двох стрижнів (електроконтактний метод). Тривалість контакту визначалася як різниця часу з моменту початку контакту до моменту, коли всі точки торця стрижня відійдуть від перешкоди. Досліджувалися ступінчасті стрижні довжиною 100 мм та діаметром 10 мм. Довжина сходинки діаметром 5 мм змінювалася в межах 0-100 мм. Теоретичні та експериментальні дослідження на розроблених та виготовлених установках довели, що існують дві характерні області, в яких швидкість поширення пружної хвилі в трьохвимірному стрижні кінцевої довжини відрізняється від величини швидкості хвилі в одновимірному стрижні. Максимальної швидкості хвиля досягає, коли довжина сходинки становить 0,2 від довжини стрижня. Для заліза ця швидкість склала величину 5958 м/с, алюмінію 6098 м/с, латуні 4065 м/с. Існує значення калібру, при якому середня швидкість поздовжньої хвилі мінімальна, що обумовлено істотним впливом на неї поперечних коливань. Це доводить помилковість обчислення напружено-деформованого стану стрижня в одновимірному наближенні.

**Ключові слова:** швидкість поширення пружної хвилі, тривалість удару, одновимірні, двовимірні стержні

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Швидкість поширення пружних хвиль в гірській породі є одним з основних параметрів для розрахунків, пов'язаних з енергоефективністю вибуху свердловинного заряду, визначенням місцезнаходження неоднорідностей та порожнин в гірській породі, вимірюванням показників деформації (модуля Юнга і коефіцієнта Пуассона) безпосередньо в тілі гірського масиву тощо. Розробка теоретичних представлень в геомеханіці, як правило, починається і закінчується натурним експериментом [1, с.28]. Значення швидкості найчастіше визначають в зразках гірської породи циліндричної форми, причому обчислюють напружено-деформований стан стержня в одновимірному наближенні не враховуючи поперечних хвиль розвантаження, що йдуть від бічної поверхні стрижня.

З іншого боку енергоємність руйнування гірської породи при бурінні шпурів і свердловин, залежить від форми ударних імпульсів інструменту, їх амплітуди, частоти і тривалості [2].

Процес зіткнення стрижнів один з одним або з перешкодою є предметом численних теоретичних і експериментальних досліджень [3-15]. Кількість робіт в цій галузі безперервно зростає, оскільки питання сучасного машинобудування, військової, гірничої справи змушують дослідників все глибше проникати у внутрішні закономірності процесу удару.

У зв'язку з цим слід визнати, що провідна роль у дослідженні явищ, пов'язаних з ударом твердих тіл, належить в даний час експериментальним роботам.

Отже, робота з експериментального дослідження поширення пружних хвиль в стрижнях змінного перерізу є актуальною, а результати роботи мають практичну значимість.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Класична теорія зіткнення твердих тіл, створена рядом дослідників, починаючи з Галілея; розглядала співудар тіл як абсолютно твердих, а процес зіткнення - як миттєвий. Ця теорія дозволяла визначити лише результат удару - зміна швидкостей тіл. Внутрішні закономірності процесу удару - його тривалість (час удару), величина контактних сил і деформацій - залишалися нерозкритими.

Г. Герцу вдалося розрахунковим шляхом встановити залежність величини контактної сили і тривалості зіткнення тіл від їх мас і швидкостей до удару на основі гіпотези про те, що зв'язок між контактною силою і місцевою деформацією тіл при ударі така ж, як і при статичному їх стисканні. Поряд з теорією Герца, яка враховує тільки місцеві деформації і не бере до уваги деформації тіл далеко від майданчика контакту, розроблена теорія удару пружних тіл, що враховує їх загальні деформації і не враховує місцевих деформацій в перші миті ударної взаємодії.

Хвильова теорія удару, яка пристосована до поздовжнього удару по стрижню постійного перерізу, була вперше запропонована Нав'є. Невдала форма рішення в тригонометричних рядах не дозволила Нав'є виявити всі особливості поздовжнього удару і перш за все, виключала можливість визначення напружень. Пізніше Сен-Венан і Буссінеск знайшли розв'язок задачі одновимірного поздовжнього удару за допомогою розривних функцій, що дозволило безпосередньо простежити поширення хвиль деформації вздовж стрижня. Проведена низкою дослідників експериментальна перевірка хвильової теорії удару не дала цілком задовільних результатів, що змусило критично поставитися до лежачих в її основі гіпотези плоских перерізів і нехтування поперечним рухом частинок стрижня, а також припущення, що поверхні зіткнення є паралельними площинами.

Наявні в дійсності відхилення від гіпотези плоских перерізів повинні бути особливо помітні поблизу фронту хвилі; наявність цих відхилень призводить до того, що фронт хвилі поступово розмивається, крутизна його зменшується. Очевидно, що відхилення від гіпотези плоских перерізів будуть позначатися тим сильніше, чим більше відношення діаметра стрижня до його довжини.

Недостатність як тих теорій, які враховують тільки місцеві деформації, але нехтують загальними, так і тих, які враховують лише загальні і нехтують місцевими деформаціями, змусила шукати «синтетичну» теорію удару, яка враховувала б місцеві і загальні деформації.

Для поздовжнього удару така теорія була розроблена Сірсом. Розглядаючи зіткнення стрижнів із сферичними кінцями Сірс припустив, що гіпотеза плоских перетинів справедлива для всього стрижня, за винятком невеликої прилеглої до кінця стрижня ділянки, в межах якої напружений стан є різко неоднорідним. Деформації ділянки, що лежать поблизу кінця стрижня, розраховуються за формулами Герца, для розрахунку решти стрижня використовується хвильова теорія. Розрахунки Сірса були підтверджені експериментами.

Як видно із сказаного вище, труднощі пов'язані з теоретичним описом процесу удару, змушують вводити ряд спрощених гіпотез, в більшості випадків вони не підтверджуються в достатній мірі експериментами, а всі методи розрахунку процесу удару є наближеними.

Так, в роботах [9-11], проведено числове моделювання процесу відскоку стержнів кінцевої довжини від абсолютно жорсткої перешкоди, а також поширення пружних хвиль в круглих стержнях в двовимірній постановці. Рівняння руху, що були використані для описання напружено-деформованого стану середовища в лагранжевих координатах, мали вигляд [3-5]

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} &= \left[ \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} + \alpha \frac{u}{r} \right], \\ \rho \frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{\partial S_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial S_{rz}}{\partial z} + \alpha \frac{S_{rr} - S_{\theta\theta}}{r} - \frac{\partial p}{\partial r}, \\ \rho \frac{\partial w}{\partial t} &= \frac{\partial S_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial S_{zz}}{\partial z} + \alpha \frac{S_{rz}}{r} - \frac{\partial p}{\partial z}, \\ \frac{\partial e}{\partial t} &= \frac{p}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \left[ S_{rr} \frac{\partial u}{\partial r} + S_{zz} \frac{\partial w}{\partial z} + \alpha S_{\theta\theta} \frac{u}{r} + S_{rz} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right) \right], \\ \frac{\partial r}{\partial t} &= u, \quad \frac{\partial S_{rr}}{\partial t} = 2\mu \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{3\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} \right), \\ \frac{\partial z}{\partial t} &= w, \quad \frac{\partial S_{zz}}{\partial t} = 2\mu \left( \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{3\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} \right), \\ \frac{\partial S_{\theta\theta}}{\partial t} &= 2\mu \left( \alpha \frac{u}{r} + \frac{1}{3\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} \right), \quad \frac{\partial S_{rz}}{\partial t} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\rho$  - густина середовища;  $u, w$  — компоненти вектора швидкості в проекції на вісь координат  $r, z$  відповідно;  $t$  — час;  $e$  — питома внутрішня енергія. Тензор напруги представлений у вигляді

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + S_{ij} \quad (i=1, 2, 3, j=1, 2, 3),$$

де  $p = \frac{1}{3} \sum_1^3 \sigma_{ii}$ ;  $S_{ij}$  - девіатор напруги з компонентами  $S_{rr}, S_{zz}, S_{\theta\theta}, S_{rz}$ ;  $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i=j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$ ;  $\mu$  - модуль зсуву. Вважається, що напруги при розтягуванні позитивні і негативні при стисканні. Величина  $\alpha=1$  відповідає осесиметричному деформованому стану.

Для замикання системи рівнянь (1) використовується модель пластичної течії, тобто другий інваріант девіатора тензора напружень в області пластичності задовольняє умову текучості Мізеса

$$S_{rr}^2 + S_{zz}^2 + S_{\theta\theta}^2 + 2S_{rz}^2 \leq \frac{2}{3} Y_0^2, \quad (2)$$

де  $Y_0$ - межа текучості, яка визначається із результатів експериментів на одновісний розтяг. Рівняння стану середовища представлялась у вигляді

$$P = a_1(\eta - 1) + a_2(\eta - 1)^2 + a_3(\eta - 1)^3 + a_4\eta e, \quad (3)$$

де  $\eta = \rho/\rho_0$ ;  $\rho_0$  - початкова густина;  $a_1, a_2, a_3, a_4$  - постійні:  $a_1 = K, a_2 = a_3 = a_4 = 0$ .

Результати цих робіт підтвердили вплив розмірів стрижня на швидкість поширення пружної хвилі та час контакту із перешкодою.

Ще раніше Александров Е.В. показав, що коефіцієнт передачі енергії залежить не лише від маси ударника і його швидкості, але і від геометричної форми тіл, що ударяються. Отже, слід визнати, що закінченої теорії удару тіл складної геометричної форми не існує. Тому експериментальне дослідження поширення пружних хвиль в круглих стрижнях змінного перерізу для верифікації результатів числового моделювання в двовимірній постановці є актуальною, а результати роботи затребувані.

**Постановка завдання.** При чисельному моделюванні відскоку осесиметричних стрижнів від твердої перешкоди передбачається, що швидкість поширення пружних хвиль в стрижнях дорівнює подвійній довжині стрижня, поділеній на час контакту. При цьому передбачається, що внесок в кінетичну енергію доданків, що описують поперечний рух частинок стрижня, дуже малий. Оскільки не враховуються дотичні напруження, внесок потенціальної енергії зсувів також не враховується. Для таких стрижнів використовується одновимірна теорія і швидкість поширення хвиль в таких стрижнях визначають як  $c = \sqrt{E/\rho}$ .

Для доведення необхідності врахування поперечних хвиль розвантаження, що йдуть від бічної поверхні стрижня, в наших експериментах використовуються ступінчасті стрижні зі змінною довжиною сходинки, а також стрижні в формі усіченого конуса. Результати експериментів повинні довести істотну залежність швидкості поширення пружних хвиль від форми бічної поверхні і тим самим довести помилковість обчислення напружено-деформованого стану стрижня в одновимірному наближенні. Для доведення цієї гіпотези було проведено:

аналіз результатів чисельного моделювання процесу зіткнення стрижня кінцевої довжини з абсолютно жорсткою перешкодою;

аналіз поширення пружних хвиль в однорідних круглих стрижнях;

вимірювання тривалості удару та швидкості поширення пружних хвиль в металевих стрижнях круглого східчасто-змінного перерізу.

**Викладення матеріалу та результати.** Проведемо аналіз залежності швидкості поширення пружної хвилі в однорідних стрижнях від геометричних і фізичних параметрів стрижня. При симетричному зіткненні двох однакових круглих стрижнів, в разі, якщо площа контакту розглядається як жорстка перешкода, задача зіткнення стає еквівалентною задачі про удар об жорстку перешкоду стрижня довжиною  $L$  і радіусом  $R$  зі швидкістю  $v_0$ .

Координата  $z$  відраховується від перешкоди вздовж осі стрижня в напрямі, протилежному до напрямку його руху. Матеріал стрижня вважаємо абсолютно пружним.

У табл. 1 наведено характеристики матеріалів, використані в даній роботі ( $\rho$  - густина,  $K$  - об'ємний модуль пружності,  $\mu$  - модуль зсуву,  $\lambda$  - постійна Ляме,  $\nu$  - коефіцієнт Пуассона,  $c_e$  - швидкість поширення пружної хвилі в одновимірному стрижні,  $c_p$  - швидкість поздовжніх хвиль,  $c_s$  - швидкість поперечних хвиль,  $c_\lambda$  - швидкість хвиль в тонкому шарі).

При ударі стрижня об жорстку перешкоду в початковий момент часу торець стрижня в усіх точках стикається з перешкодою і залишається в контакті з нею протягом деякого часу, після чого він відразу або поступово відділяється від перешкоди. В якості часу контакту вибирається час з моменту початку контакту до моменту, коли всі точки торця стрижня відійдуть від перешкоди.

Таблиця 1

Характеристики матеріалів

Матеріал	$\rho \cdot 10^7, \text{ кг/м}^3$	$K, \text{ ГПа}$	$\mu, \text{ ГПа}$	$\lambda, \text{ ГПа}$	$\nu$	$c_e \cdot 10^3, \text{ м/с}$	$c_p \cdot 10^3, \text{ м/с}$	$c_s \cdot 10^3, \text{ м/с}$	$c_\lambda \cdot 10^3, \text{ м/с}$
Алюміній	2,70	69	27	51	0,33	5,14	6,23	3,16	5,44
Залізо	7,88	170	80	117	0,29	5,13	5,92	3,19	5,37
Мідь	8,90	137	48	105	0,34	3,80	4,75	2,32	4,05

З розв'язку пружної задачі про контакт одновимірного стрижня з перешкодою при ударі відомо, що час контакту дорівнює

$$t_K = 2L / c_e. \quad (1)$$

У загальному випадку в стрижні як у твердому тілі поширюються хвилі кількох типів з різними швидкостями. На підставі формули (1) припустимо, що в стрижні поширюється хвиля з невідомою середньою швидкістю  $c$ , такою що після проходження хвилею відстані, рівної двом довжинам стрижня, за час  $t_K$  відбувається відскік стрижня. Таким чином, середню швидкість хвилі знайдемо за формулою

$$c = 2L / t_K, \quad (2)$$

а час контакту візьмемо, виходячи з результатів роботи [14], де він визначався за допомогою програмного комплексу KRUG, призначеного для чисельного розв'язування динамічних задач механіки. Для визначеності розглянемо удар однорідного стрижня діаметром  $D=10$  мм і калібром  $L/D=0,1 \div 10,0$  об абсолютно жорстку перешкоду. Поперечні напруги в стрижні відсутні.

На рис. 1 наведено розрахункову залежність відносної середньої швидкості хвилі  $c'$  від калібру для однорідних стрижнів з алюмінію [11] ( $c'$  - відношення швидкості хвилі  $c$ , знайденої за формулою (2), до швидкості  $c_e$ ).

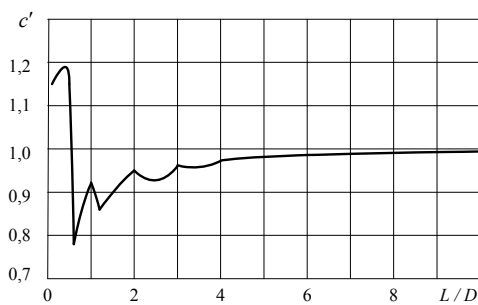


Рис. 1. Залежність відносної середньої швидкості хвилі від калібру стрижня

Аналіз даних, представлених на рис. 1, дозволяє зробити наступні висновки:

при малих значеннях калібру стрижня ( $L/D < 1$ ) швидкість поширення хвилі близька до швидкості поздовжніх хвиль  $c_p$  (це пояснюється тим, що більш повільні поперечні хвилі, що зароджуються на вільній циліндричній межі, не встигають вплинути на поздовжню хвилю, довжина шляху поширення якої незначна в порівнянні з радіусом стрижня);

при збільшенні калібру середня швидкість хвилі  $c$  прямує до швидкості  $c_e$  (починаючи з розміру стрижня, рівного трьом калібрам, відмінність між

швидкістю хвилі і швидкістю  $c_e$  становить менше 3%);

існує таке значення калібру ( $L/D=0,6$  для алюмінію), при якому середня швидкість поздовжньої хвилі мінімальна, що обумовлено істотним впливом на неї поперечних коливань.

Для кожного матеріалу мінімальне значення середньої швидкості різне відповідно до калібру стрижня. Для оцінки калібру, при якому має місце мінімум відносної середньої швидкості, використовуємо відношення поперечної і поздовжньої швидкостей  $c_s/c_p$ , значення якого є постійною величиною для матеріалу стрижня.

На рис. 2 показано залежність значення калібру  $K_{min}$ , при якому швидкість хвилі досягає мінімуму, від відношення  $c_s/c_p$  для стрижнів з різних матеріалів [11].

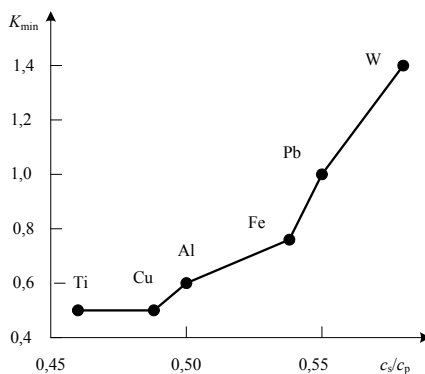


Рис. 2. Значення калібру, при якому настає мінімум відносної середньої швидкості

З рис. 2 випливає, що калібр стрижня, при якому спостерігається мінімальне значення швидкості хвилі, збільшується з ростом значення  $c_s/c_p$ .

Проведений аналіз поширення пружних хвиль в круглих стрижнях показує, що значення середньої швидкості поширення хвилі в коротких стрижнях відрізняється від швидкості хвилі, яка визначається в одновимірній теорії.

Отже, при відбиванні хвилі від торця стрижня такі самі процеси і області виникнуть і на другому кінці стрижня. Тобто нанесення удару по другому кінцю стрижня не змінить картини зміни швидкості пружної хвилі вздовж стрижня - вона буде симетричною.

“Проявити” ці ефекти можна втручаючись у вищезгадані процеси, наприклад, зменшуючи діаметр стрижня в цих областях з  $D$  до  $d$ , утворюючи ступінчастий стрижень.

Для доведення можливості управління швидкістю розповсюдження пружних хвиль були розроблені експериментальні установки та проведені дослідження. Використовувалися два способи вимірювання швидкості пружних хвиль: а) за часом розповсюдження пружної хвилі в

стрижні (реєстратор – п'єзодатчик), б) за часом зіткнення двох стрижнів (електроконтактний метод). Для цього були використані три типи установок: а) з біфілярним підвісом стрижнів, б) з використанням направляючого жолоба, в) з використанням направляючої трубки. Для одночасної реєстрації тривалості електричного контакту стержнів та пружних коливань використовувався осцилограф TPS2014В.

Як показали досліди, вимірювання швидкості пружної хвилі на установці біфілярного типу не є доцільним оскільки забезпечити паралельність торців стрижнів при ударі та їх співвісність у більшості дослідів неможливо. Похибка визначення швидкості поширення пружної хвилі цим способом складає до 10%. Установка з направляючим жолобом забезпечує паралельність торців стрижнів при ударі та їх співвісність. Похибка визначення швидкості пружної хвилі в металевих стрижнях складає до 7%. Спосіб вимірювання швидкості пружних хвиль за допомогою направляючої трубки виявився найбільш точним з похибкою до 1%. Тому саме за допомогою цього способу визначалась залежність швидкості пружної хвилі від геометричних і фізичних параметрів однорідних стрижнів кінцевої довжини ступінчастої форми. Результати спектральних та осцилографічних вимірювань швидкості пружних хвиль відображені в табл. 2- 5 та графіках рис. 3.

Таблиця 2

Результати осцилографічних вимірювань (сталь Ст3пс, густина 7850 кг/м <sup>3</sup> )							
Калібр $l/L$	0	0,1	0,2	0,25	0,5	0,75	1,0
$v_{\text{ср}}$ , м/с	5000	5587	5942	5848	4926	4000	5263

Таблиця 3

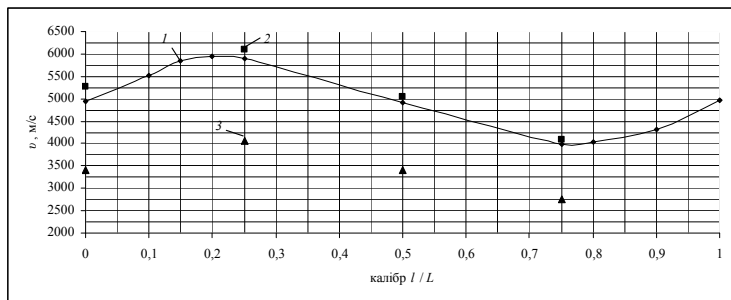
Результати вимірювання (матеріал – алюміній Д16Т, густина 2770 кг/м <sup>3</sup> )				
Калібр $l/L$	1,0	0,75	0,5	0,25
$v_{\text{ср}}$ , м/с	5263	6098	5050	4098

Таблиця 4

Результати вимірювання (матеріал – латунь ЛС59, густина 8400 кг/м <sup>3</sup> )				
Калібр $l/L$	1,0	0,75	0,5	0,25
$v_{\text{ср}}$ , м/с	3401	4065	3401	2747

Таблиця 5

Результати спектральних вимірювань (сталь Ст3пс, густина 7850 кг/м <sup>3</sup> )										
Калібр $l/L$	0	0,1	0,15	0,2	0,25	0,5	0,75	0,8	0,9	1,0
$v_{\text{ср}}$ , м/с	4932	5514	5840	5958	5899	4922	3985	4025	4301	4962



**Рис. 3.** Залежність швидкості пружних хвиль від відношення  $l/L$  для залізного (1), алюмінієвого (2), латунного (3) стержня діаметром 10 мм довжиною 100 мм, діаметром сходинок 5 мм довжиною  $l$

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Доведено, що швидкість розповсюдження пружної хвилі в стрижні кінцевої

довжини залежить від форми його бічної поверхні. Існують дві характерні області, в яких швидкість відрізняється від величини швидкості хвилі в одновимірному стрижні. Максимальної швидкості хвиля досягає, коли довжина сходинок становить 0,2 від довжини стрижня. Для заліза ця швидкість склала величину 5958 м/с, алюмінію 6098 м/с, латуні 4065 м/с.

Проведені численні експерименти на розроблених та виготовлених установках підтвердили теоретичні висновки та надали спосіб отримання величини максимальної швидкості поздовжньої хвилі в зразках гірської породи.

#### Список літератури

1. **Баклашов І.В.** Геомеханика: Учебн. для вузов. В 2 т. // М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2004. – Т. 2. Геомеханические процессы. – 249 с.
2. **Гуливец А.А.** Моделирование ударных импульсов в стержневых системах / А.А. Гуливец. // Гірничий вісник. Кривий Рог: КНУ, 2013. - Т. 1. - №96. - С. 241-244.
3. **Станюкович К. П.** Физика взрыва. //М., Наука.- 1975.

4. Уилкинс М. Л. Удар цилиндра по жесткой преграде / М.Л. Уилкинс, М.У. Гуинан // Сб. пер. Механика.- 1973.- № 3.
5. Wilkins, M.L. Computer simulation of dynamic phenomena/ M.L. Wilkins. // Berlin-Heidelberg-N.Y.: Springer, 1999. – 246 p.
6. Коротких Ю. Г. Некоторые результаты численного исследования процесса соударения стержня с жесткой преградой / Ю.Г. Коротких, С.М. Белевич // В кн.: Методы решения задач упругости и пластичности. Горький.- 1972.
7. Веклич Н. А. О распространении и взаимодействии упругопластических волн в стержне при ударе о преграду. / Н.А. Веклич // Изв. АН СССР. МТТ.- 1970.- № 4.
8. Веклич Н. А. Продолжительность удара упругопластического стержня. / Н.А. Веклич, Б.М. Малышев // Изв. АН СССР. МТТ. – 1976.- № 2.
9. Гулидов А.И. Численное моделирование отскока осесимметричных стержней от твердой преграды / А.И. Гулидов, В.М. Фомин. // ПМТФ. 1980. №3. С. 126-132.
10. Фомин В.М. Высокоскоростное взаимодействие тел / В.М. Фомин, А.И. Гулидов, Г.А. Сапожников и др.// Новосибирск: Изд-во СО РАН. - 1999.
11. Баянов Е.В. Распространение упругих волн в однородных по сечению круглых стержнях / Е.В. Баянов, А.И. Гулидов // ПМТФ. - 2011. -Т. 52. - №5. - С. 155-162.
12. Тимошенко С.П. Курс теории упругости // Киев: Наукова думка.- 1972. - 508с.
13. Санкин Ю.Н. Нестационарные колебания стержневых систем при соударении с препятствием / Ю. Н. Санкин, Н. А. Юганова; под общ. ред. Ю. Н. Санкина // Ульяновск: УлГТУ, 2010. - 174 с.
14. Жуков И. А. Разработка научно-методических основ исследования и совершенствования ударных систем (на примере машин, применяемых при разрушении хрупких сред). - дис. на соиск. уч. ст. докт. техн. наук. 2010. 201с.
15. Слепухин В.В. Моделирование движения и восстановления скорости ступенчатого стержня при ударе о жесткую преграду // Информационные системы и технологии. - 2009. - №5. - С. 48-55.

Рукопис подано до редакції 12.04.17

УДК 622.235.62:622.271

Б.І. РИМАРЧУК, д-р техн. наук, проф.

Т.С. ГРИЩЕНКО, старший викладач, М.А. ГРИЩЕНКО, асистент

Криворізький національний університет

П.О. МІНЕНКО, д-р фіз.-мат. наук, проф., ДВНЗ "КДПУ"

## ВИБІР ТЕХНОЛОГІЇ ВИБУХОДОСТАВКИ РУДИ У КАМЕРНИХ СИСТЕМАХ РОЗРОБКИ

**Мета.** Метою даної роботи є розробка методу зменшення втрат руди на лежачому боці за рахунок використання ВКЗ та ГКЗ. Відбійка руд у камері за допомогою свердловинних зарядів показує, що втрати чистої руди на лежачому боці рудного покладу становлять приблизно до 20%, так як еліпсоїд випуску становить близько 90°, а кут падіння покладів Криворізьких залізрудних родовищ становить 35-70°.

**Методи дослідження.** Розглядалося технологія вибухоставки руди з відбійкою у два етапи, на першому етапі відбивається руда прилегла до висячого боку, а після випуску руди на створений таким чином компенсаційний простір відбивається руда яка прилегла до лежачого боку, використовуючи вибухоставку, руда буде відкинута під дучки висячого боку, що знизить втрати чистої руди по лежачому боці.

**Наукова новизна.** Розв'язання даної задачі складає актуальність роботи. Її метою є математичне обґрунтування руху відбитої породи для її вибухоставки з лежачого боку на висячий, що знизить втрати руди на лежачому боці. Для суттєвого запобігання втрат корисної копалини слід застосувати зміни порядку відбійки руди в блоці.

**Практична значимість.** Технологія БПР на відбійку стелини виконується у два етапи: першим відбивається заряд ГКЗ, а потім із сповільненням – заряд ВКЗ. Пуста порода на стелиною не встигне впасти раніше на дачку за рахунок того, що швидкість вибухоставки вище ніж швидкість довільного падіння. Отже враховуючи те, що зарядження глибоких свердловин у буровому штреку за правилами техніки безпеки унеможливує знаходження робітників в межах зсуву порід лежачого боку.

**Результати.** Отримані результати між відбійкою свердловинними зарядами, та відбійкою ВКЗ показують, що при першому варіанті 36% загальної енергії вибуху йде на формування УВВ, а в другому варіанті енергії вибуху буде достатньо для відбійки руди у стелині з лежачого боку на дучки висячого боку.

**Ключові слова:** ВКЗ, ГКЗ, відбійка стелини, втрати на лежачому боці.

Порівнюються технології вибухоставки руди з відбійкою руди свердловинними зарядами й вертикальними концентрованими зарядами (ВКЗ). Пропонується порядок відбійки руди у камері, що забезпечує зниження втрат руди на лежачому боці. Пропонується порядок відбійки стелини, що також знижує ймовірність потрапляння руди на лежачий бік камери. Наведено