

УДК 533.6, 614.841

<https://doi.org/10.31474/1999-981X-2021-2-96-103>

О. В. Васильченко  
О. М. Данілін  
Т. О. Луценко  
О. В. Надьон  
А. В. Рубан

## ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ УДАРНОЇ ХВИЛІ НА СТІНКИ КАНАЛУ РІЗНОЇ ЖОРСТКОСТІ

**Мета.** Визначення умов послаблення руйнуючої дії ударної хвилі при її поширенні в каналах гірничих виробок або довгих комунікаційних приміщеннях промислових будівель при аварійному вибуху.

**Методи.** Використання аналітичного методу досліджень із застосуванням основних положень теорії горіння та вибуху. Побудова та аналіз фізичної моделі утворення та поширення ударної хвилі в каналі.

**Результати.** Розглянуто проблему ослаблення ударної хвилі під час її поширення в довгих каналах гірничих виробок або комунікаційних приміщеннях промислових будівель з потенційно вибухонебезпечною атмосферою. Показано, що при вибуху в каналі утворюється головна ударна хвиля з плоским фронтом, динамічний тиск, на якому значно перевищує тиск на фронтах падаючої і відбитої ударних хвиль, що утворюють головну ударну хвилю. Запропоновано фізичну модель утворення та поширення ударної хвилі в каналі з стінками різної жорсткості. Показано, що якщо одна зі стінок каналу рухлива або легко деформується, це призводить до порушення геометрії плоского фронту головної ударної хвилі та її ослаблення. Причому, відновлення плоского фронту головної ударної хвилі може відбуватися на відстані не менш ніж 6-8 розмірів ширини каналу. На основі цього спостереження обґрунтовано необхідність облаштування легкоскридних конструкцій у каналах гірничих виробок або комунікаційних приміщеннях промислових будівель з потенційно вибухонебезпечною атмосферою.

**Наукова новизна.** Запропоновано фізичну модель утворення та поширення ударної хвилі в каналі зі стінками різної твердості. Обґрунтовано необхідність облаштування легкоскридних конструкцій в каналах гірничих виробок або довгих комунікаційних приміщеннях будівель з потенційно вибухонебезпечною атмосферою для ослаблення ударної хвилі.

**Практична значимість.** Облаштування в довгих комунікаційних каналах гірничих виробок або будівель з потенційно вибухонебезпечною атмосферою розширювачів з легкоскридними конструкціями з розмірами, порівняними з шириною приміщення і проміжками між ними 6-8 розмірів ширини каналу призведе до ослаблення ударної хвилі та зменшення її руйнівної дії.

**Ключові слова:** ударна хвиля, головна ударна хвиля, легкоскридна конструкція.

### Вступ.

Аварійні вибухи в промислових будівлях, що належать до об'єктів з підвищеною вибухонебезпекою є резонансними подіями. Незважаючи на вдосконалення методів забезпечення безпеки при здійсненні технологічних процесів, вибухи при вибоках вибухонебезпечних рідин і газів призводять до людських жертв, пошкоджують обладнання, руйнують результати праці, приносять значні збитки [1, 2, 3]. Також резонансними подіями є аварійні вибухи в гірських виробках шахт і тунелях.

Особливість вибухів в гірських виробках полягає в тому, що ударні хвилі (УХ) поширюються в вузьких каналах (штреках, штольнях, квершлагах) і без застосування спеціальних противибухових заходів довго зберігають руйнівну силу [2, 3, 4].

Для ослаблення впливу ударної хвилі в шахтах застосовують дисипаційні методи, що забезпечують хоча б часткове поглинання

енергії ударної хвилі. Відомо багато способів гасіння вибухової ударної хвилі при вибухових роботах в шахті [5-8]. Всі ці способи використовуються саме під час вибухових робіт, що виключають перебування людей і дорогого устаткування в небезпечній зоні.

Однак, засоби, що забезпечують безпеку при вибухових роботах, не можна застосовувати при інших видах робіт, тому що вони будуть заважати виробничому процесу, перешкоджаючи комунікаціям по штреках, штольнях, квершлагах (узагальнено їх можна представити як комунікаційні канали). Оскільки аварійні вибухи виключити не можна, то при експлуатації комунікаційних каналів шахти необхідно з одного боку забезпечити в них вільне пересування людей і вантажів, а з іншого – знизити негативні наслідки при аварійному вибуху. Актуальність цієї проблеми очевидна.

### Аналіз останніх праць та публікацій.

Проблема ослаблення вибухової хвилі актуальна також при захисті промислових будівель. При обстеженні будівельних об'єктів, які постраждали в результаті аварійних вибухів і викликаних ними пожеж, часто виникає необхідність пояснення причин видимих пошкоджень будівельних конструкцій [9-11]. У промислових будівлях з підвищеною вибухо- і пожежонебезпечністю, як правило основна увага при проектуванні приділяється виробничим приміщенням. Їх оснащують легкоскридними конструкціями (ЛСК), якими найчастіше служать віконні та дверні прорізи. У разі аварійного вибуху ударна хвиля руйнує ЛСК, і надлишковий тиск у приміщенні швидко зменшується. Конструкції в таких приміщеннях розраховують також на можливий вплив вибуху [2, 11]. А в комунікаційних приміщеннях, якими можуть бути коридори або тунелі, що досягають в промислових будівлях значної довжини, і де після подолання ЛСК поширюється УХ, її впливу піддаються огорожувальні конструкції. При цьому їх стан буває непередбачуваним: деякі огорожувальні будівельні конструкції на шляху руху УХ руйнуються, а інші, аналогічні, залишаються практично неушкодженими.

На основі цих спостережень має сенс розглянути проблему ослаблення УХ при її поширенні в каналах гірничих виробок або довгих комунікаційних приміщеннях промислових будівель, допустивши їх принципову схожість.

Якщо комунікаційний канал уявити як вузький напівзамкнений простір (канал), то згідно [12, 13] розсіювання енергії УХ в ньому відбувається повільніше, ніж в звичайному приміщенні. При взаємодії УХ зі стінками каналу підвищуються втрати енергії на нагрів повітря і тертя. Також стінки каналу, як поверхні відбиття, впливають на процес утворення УХ, її поширення та інтенсивність. З цих причин вивчення взаємодії стін і перегородок каналу з УХ представляє інтерес для прогнозування поведінки як самої УХ, так і будівельних конструкцій під час вибуху. Проблеми обліку поведінки УХ в каналах розглядалися в публікаціях [14-16], але при цьому передбачалося, що стінки однаково жорсткі.

Однак, в реальних будівельних об'єктах стіни і перегородки комунікаційних каналів часто різняться і конструктивно, і за матеріалами.

### Мета статті.

Визначення умов послаблення руйнуючої дії ударної хвилі при її поширенні в каналах гірничих виробок або довгих комунікаційних приміщеннях промислових будівель при аварійному вибуху.

Завданням даної роботи є формулювання рекомендацій щодо підвищення безпеки, як для будівельних конструкцій комунікаційних приміщень будівель з потенційно вибухонебезпечною атмосферою, так і для комунікаційних каналів гірничих виробок на підставі формування фізичної моделі утворення і поширення ударної хвилі в каналі зі стінками різної жорсткості, тобто коли одна зі стін помітно деформується в порівнянні з іншого.

### Методика дослідження.

Використання аналітичного методу досліджень із застосуванням основних положень теорії горіння та вибуху. Побудова та аналіз фізичної моделі утворення та поширення ударної хвилі в каналі.

### Виклад основного матеріалу.

Особливістю поширення вибухової хвилі в напівзамкненому просторі є її взаємодія з поверхнею перешкоди (стінки), при якому утворюються відбиті УХ [15, 16]. Для УХ, що утворилася при вибуху, з надлишковим тиском на її фронті менше 700 кПа, коли повітря ще можна вважати ідеальним газом, приведені надлишковий тиск відбитої хвилі  $P_R^*$  розраховують по:

$$P_R^* = 2P_I^* + \frac{(\gamma+1)P_I^*}{2\gamma + (\gamma-1)P_I^*}, \quad (1)$$

де  $P_I^*$  – приведений надлишковий тиск падаючої хвилі;  $\gamma$  – відношення питомих теплоємностей газу падаючої та відбитої хвилі (за рахунок різниці температур).

$$P_R^* = \frac{P_R}{P_0}; \quad P_I^* = \frac{P_I}{P_0}, \quad (2)$$

де  $P_R$  – надлишковий тиск відбитої хвилі;  $P_I$  – надлишковий тиск падаючої хвилі;  $P_0$  – початковий тиск.

Навантаження на поверхню стінки, що виникає, залежить від параметрів УХ, орієнтації фронту УХ щодо поверхні і жорсткості поверхні. При падінні УВ під кутом до поверхні ( $0 < \alpha_I < \pi/2$ ) тиск в зоні контакту буде більше тиску на фронті падаючої УХ ( $P > P_I$ ), тому що при гальмуванні повітря, що рухається за фронтом УХ, його кінетична енергія переходить в потенційну енергію стиснення. Поверхня буде відчувати додаткове навантаження, викликане дією швидкісного напору повітря, який залежить від швидкості потоку повітря ( $u$ ) і його густини ( $\rho_B$ ):

$$P_u = \frac{\rho_B u^2}{2g}, \quad (3)$$

де  $P_u$  – тиск на стінку каналу;  $g$  – прискорення вільного падіння.

Таке відбиття ударних хвиль є нестаціонарним. Воно залежить від інтенсивності УХ, властивостей і характеру розподілу параметрів газового середовища за її фронтом, геометрією хвилі і поверхні, з якою відбувається взаємодія [15-17]. Співвідношення імпульсів падаючої ( $I_I$ ) і відбитої ( $I_R$ ) хвиль оцінюють з міркувань подібності:

$$\frac{I_R}{I_I} \approx \frac{P_R}{P_I}. \quad (4)$$

На малих кутах падіння УХ ( $\alpha_I$ ) відбувається, так зване, регулярне відбиття, при цьому кут відбитої УХ більше падаючої  $\alpha_R > \alpha_I$ . В [12] для випадку регулярного відбиття запропонована формула, що дозволяє обчислювати надлишковий тиск на фронті відбитої УХ:

$$P_R = 2P_I + \frac{(\gamma+1)}{2} \rho_B u^2 \cos^2 \alpha_I. \quad (5)$$

Зі збільшенням кута падіння УХ до критичної позначки ( $\alpha_{kr} = \alpha_I$ ) настає момент, коли регулярне відбиття стає неможливим і можливо тільки нерегулярне (або Маховське) відбиття [18]. Воно характерно тим, що в результаті взаємодії падаючої і відбитої УХ при  $\alpha_{kr} > \alpha_I$  утворюється третя

(Маховська) хвиля. Область з'єднання всіх трьох хвиль називають потрійною точкою.

При переході від регулярного до нерегулярного відбиття при кутах падіння УХ близьких до критичного ( $\alpha_{kr} = \alpha_I$ ) траєкторія потрійної точки буде паралельна до жорсткої стінки. Якщо ж кут падіння УХ при нерегулярному відбитті перевищує критичне значення, то потрійна точка буде переміщатися по траєкторії під кутом до поверхні жорсткої стінки. В результаті цього утворюється безперервно зростаюча «Маховська ніжка», що представляє собою плоску хвилю з фронтом, нормальним до поверхні.

Маховське відбиття – досить складне явище. І якщо для зони регулярного відбиття УХ можна розрахувати тиск (і відповідно, імпульс) на фронті відбитої УХ (див. (5)), то для нерегулярного відбиття зробити це простими методами складно, і залишаються тільки емпіричні методи. За емпіричними оцінками кут траєкторії переміщення потрійної точки в 4...5 разів менше кута Маховського переходу  $\alpha_{kr}$ . Кут Маховського переходу для падаючої хвилі залежить від показника адиабати продуктів детонації і числа Маха УХ (цей кут лежить в межах  $\alpha_M = 39^\circ \dots 47^\circ$ ) [12, 18].

Як було сказано вище, в гірських виробках і на виробництвах з підвищеною небезпекою ймовірними є внутрішні аварійні вибухи газоповітряних сумішей з подальшим поширенням УХ в каналах. Найбільш важливими параметрами таких вибухів є геометричні фактори (форма і перетин каналу, наявність легкоокисних конструкцій), теплота згоряння газу і співвідношення компонентів суміші.

При поширенні продуктів детонації вибуху і/або УХ в каналі на цей процес впливають обмежувальні поверхні (стінки), які є поверхнями відбиття. Енергія, що накопичена ударною хвилею, розсіюється в каналі значно повільніше, ніж в атмосфері, але вона витрачається на нагрів повітря і тертя при взаємодії УХ зі стінками. Інтенсивність УХ в цьому випадку визначається не тільки енергією вибуху, переданою повітряю, але і процесами відбиття.

Дію вибухової хвилі на стінки каналу можна розбити на дві стадії. На першій – стінка навантажується при первісному падінні на неї УХ, а на другій – відчуває

вплив кількох наступних імпульсів тиску. Ця взаємодія може бути дуже складною через багаторазове відбиття ударних хвиль і/або наявність розвантажувальних отворів.

Спрощена модель того, як утворюється і поширюється УХ в каналі з жорсткими стінками показана на рис. 1. Цю модель можна представити в наступній послідовності:

1. Утворення криволінійної поверхні фронту УХ.

2. Оскільки падаюча ударна хвиля (ПУХ) поширюється в каналі в небурхливому повітряному середовищі, а відбиті ударні хвилі (ВУХ) – в середовищі стиснутому і нагрітому ПУХ, що пройшла, то ВУХ поширюються з більшими швидкостями, ніж ПУХ і тому можуть наздоганяти ПУХ і зливатися з нею.

3. Утворення головної ударної хвилі (ГУХ) з плоским фронтом в результаті злиття ПУХ і ВУХ. У створеному ГУХ динамічний тиск значно перевищує тиски на фронтах ПУХ і ВУХ.

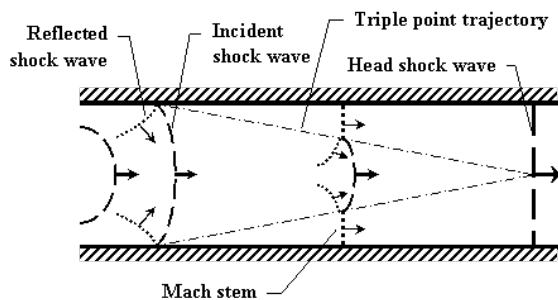


Рис. 1. Схема взаємодії ударних хвиль в каналі зі стінками однакової жорсткості

Формування плоского фронту ГУХ реалізується при косому падінні хвиль. Якщо кут падіння досить великий, то під стінами каналу можуть утворюватися хвилі Маха. З огляду на кут переміщення траєкторії потрібної точки, який, як сказано вище, дорівнює  $(1/4...1/5)\alpha_M$ , можна очікувати, що суцільний фронт плоскої ГУХ сформується в зоні довжиною 6...8 характерних розмірів перетину каналу.

Відомі формули, що описують емпіричну залежність надлишкового тиску ( $P_h$ ) і питомого імпульсу головної ударної хвилі ( $I_h$ ) при вибуху конденсованої вибухової речовини в каналі з жорсткими стінками [17] від маси вибухової речовини, площі перетину і довжини каналу:

$$P_h = \left( a \frac{fm}{xS} + b \sqrt{\frac{fm}{xS}} \right) e^{-\beta x}; \quad (6)$$

$$I_h = c \frac{fm}{S} e^{-\frac{\beta x}{2d}}, \quad (7)$$

де  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – емпіричні коефіцієнти;  $f$  – коефіцієнт ефективності вибухової речовини в порівнянні з тротилом;  $m$  – маса конденсованої вибухової речовини;  $x$  – відстань, пройдену УВ;  $S$  – площа перетину каналу;  $\beta$  – приведений коефіцієнт аеродинамічного опору каналу;  $d$  – приведений діаметр каналу.

Оскільки, як в гірських виробках, так і на виробництвах більш вірогідні аварійні вибухи ГПС, а при поширенні повітряної УХ в каналі немає принципової різниці в природі вибуху, то формули (6, 7) можна перетворити для випадку ГПС:

$$P_h = \left( a \frac{\delta M Q_g}{x S Q_t} + b \sqrt{\frac{\delta M Q_g}{x S Q_t}} \right) e^{-\beta x}; \quad (8)$$

$$I_h = c \frac{\delta M Q_g}{S Q_t} e^{-\frac{\beta x}{2d}}. \quad (9)$$

де  $\delta$  – перехідний коефіцієнт;  $M$  – маса вибухової речовини;  $Q$  – теплота згоряння вибухової речовини;  $Q_t$  – теплота вибуху тротилу.

Навантаження, яке відчувають стінки каналу при проходженні УХ, характеризується приведеними величинами тиску  $P_1^*$  та імпульсу  $I_1^*$ :

$$P_1^* = \frac{P_R F \sqrt{E_1}}{A_1 \sqrt{R_1^3}} \quad (10)$$

$$I_1^* = \frac{I_R h \sqrt{E_1}}{A_1 R_1 \sqrt{\rho_1}}, \quad (11)$$

де  $F$  – площа впливу УХ;  $E$  – модуль пружності;  $A$  – площа перерізу стінки;  $R$  – межа міцності матеріалу стінки;  $\rho_1$  – щільність матеріалу стінки.

З аналізу формул (10, 11) витікає, що якщо протилежні стінки каналу виконані з різних матеріалів, але з близькими значеннями меж міцності та модулів

пружності ( $R_2 \approx R_1$ ;  $E_2 \approx E_1$ ), що не допускають деформацій при впливі УХ, то УХ в каналі буде поширюватися по моделі, як на рис. 1.

У разі, коли міцність і модуль пружності однієї зі стінок значно нижче ( $R_2 < R_1$ ;  $E_2 < E_1$ ), і вона легко деформується, то необхідний для її руйнування наведений імпульс зменшується. Це викликає зниження швидкості ВУХ та збільшення зони формування плоского фронту ГУХ. Фронт УХ при цьому розгортається в сторону нежорсткої стінки, як показано на рис. 2, на цю стінку збільшується тиск, що може привести до її руйнування.

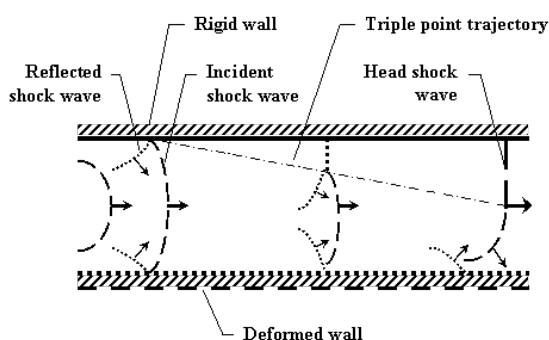


Рис. 2. Схема взаємодії ударних хвиль в каналі з одною стінкою, яка деформується

### Обговорення результатів.

Розворот фронту УХ означає порушення геометрії плоского фронту ГУХ і зниження тиску на фронті УХ. Новий плоский фронт зможе знову сформуватися тільки в зоні довжиною в 6–8 характерних розмірів перетину каналу. На руйнування стінки і формування нового плоского фронту ГУХ також повинна додатково витратитися енергія. Наприклад, згідно з [19] навіть створення відкритого тупикового відгалуження від головного каналу з рівним йому перетином здатне знизити навантаження в 1,2...2 рази.

Таким чином, якщо в комунікаційному каналі великої довжини одна стінка досить міцна, а інша легко деформується, то при проходженні УХ нежорстка стінка може руйнуватися фрагментарно в зонах формування плоского фронту ГУХ.

Запропонована модель дозволяє обґрунтувати спосіб підвищення безпеки в гірських виробках або довгих комунікаційних приміщеннях будівель з

потенційно вибухонебезпечною атмосферою. Для цього необхідно уздовж комунікаційного каналу з інтервалом 6–8 розмірів його ширини передбачити легкоскридні конструкції у вигляді вставок (перегородок), що закривають розширювачі з шириною і глибиною не менш характерної ширини каналу. Такий пристрій комунікаційних каналів стоятиме на перешкоді утворенню ГУХ, сприяти зниженню надлишкового тиску на фронті ударної хвилі і її згасання.

### Висновки.

1. Запропоновано фізичну модель формування і поширення ударної хвилі в довгих комунікаційних каналах, коли одна зі стінок легко деформується.

2. Запропонована фізична модель пояснює фрагментарне ушкодження конструкцій в довгих комунікаційних каналах гірничих виробок і комунікаційних приміщеннях промислових будівель при аварійних вибухах.

3. Представлена модель показує, що в комунікаційних каналах гірничих виробок або комунікаційних приміщеннях будівельних об'єктів, в яких можливі аварійні внутрішні вибухи, для підвищення безпеки, а саме, зниження надлишкового тиску на фронті ударної хвилі, що сприяє її загасанню, слід передбачити легкоскридні конструкції в вигляді перегородок, що закривають розширювачі. Розташовувати розширювачі з легкоскридними конструкціями слід уздовж комунікаційного каналу з інтервалом не менш як 6-8 розмірів ширини цього приміщення.

### Список літератури

1. Мишуев А.В., Казеннов В.В., Хуснутдинов Д.З., Громов Н.В., Лукьянов И.А., Прозоровский Д.В. О состоянии взрывобезопасности в протяженных городских автодорожных тоннелях и путях ее повышения. *Вестник МГСУ*. 2011/ № 8. С. 331-334.
2. Васильченко А.В., Рубан А.В., Луценко Т.А., Анацкая А.В. Оценка безопасного количества взрывчатого вещества, обеспечивающего сохранение огнестойкости металлического каркаса при взрыве. *Проблемы пожарной безопасности: сб. науч. тр. Харьков: НУЦЗУ*. 2020. Вып. 48. С. 22-29.
3. Kolesnichenko I.E., Artmiev V.B., Kolesnichenko E.A., Cherechukin V.G., Lyubomishchenko E.I. Prevention of coal dust and methane explosions in mineworkings: theory and practice. *Mining Industry Journal*. 2017. 4(134). P. 26.

4. Krainov A.Yu., Moiseeva K.M. Mathematical modeling of sparkplug ignition of a coal-dust monodisperse suspension in a methane-air mixture. *MATEC Web of Conferences*, 2017. 115, 03017. <http://doi.org/10.1051/mateconf/20171150301> STS-33 7.

5. Липинский Ю.М., Панасенко А.В. Формирование детонационных волн в каналах и их взаимодействие с проницаемыми перегородками. *Журнал технической физики*. 2010. № 80(8). С. 53-58.

6. Син А.Ф., Черных А.В.. Способ гашения взрывной ударной волны. Патент № RU2404365S2, 2010 Россия.

7. Орлов Г.Г., Корольченко Д.А., Корольченко А.Я. Определение величины и характера взрывных нагрузок при применении инерционных предохранительных конструкций. *Пожаровзрывобезопасность*. 2015. Т. 24. № 4. С. 47-55.

8. Gorev V., Medvedev G. The flexible perforated screens are a protection of buildings against external explosions. *MATEC Web of Conferences*. 2017. 106, 02028. <http://doi.org/10.1051/mateconf/20171060> SPbWOSCE-2016 2028.

9. Otrosh Y., Kovaliov A., Semkiv O., Rudeshko I., Diven V. Methodology remaining lifetime determination of the building structures. *MATEC Web of Conferences*. 2018. 230(02023). <http://doi.org/10.1051/mateconf/201823002023>.

10. Zemlianskiy O., Maladyka I., Miroshnik O., Shkarabura I., Kaplenko G. Forecasting the emergency explosive environment with the use of fuzzy. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 2017. 6(4-90), P. 19-27. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.116839>.

11. Vasilchenko A., Doronin E., Ivanov B., Konoval V. Effect of residual deformation of a steel column on its fire resistance under combined exposure "explosion-fire". *Materials Science Forum Trans Tech Publications Ltd*. 2019. 968, P. 288-293. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.288>.

12. Clavin P. Nonlinear dynamics of shock and detonation waves in gases. *Combustion Science and Technology*, 2017. 189(5), P. 747-775. <https://doi.org/10.1080/00102202.2016.1260562>.

13. Nalisko N.N. The estimation of shock air waves propagation in lengthy buildings subject to dissipation of gas stream internal energy. *Construction, materials science, mechanical engineering*, 2015. 83, P. 154-160. <http://smm.pgasa.dp.ua/article/view/57118/53395>.

14. Поляндов Ю.Х., Добриков С.А., Корольченко А.Я. Взрыв газа в цилиндрической трубе с отверстием на боковой поверхности. *Пожаровзрывобезопасность*. 2016. Т. 25, № 11. С. 17-26. <http://doi.org/10.18322/PVB.2016.25.11.17-26>.

15. Chernyshov Mikhail and Tya Alexandr. Optimal regular reflection of shock and blast waves. *MATEC Web of Conferences*. 2018. 245, 12005. <http://doi.org/10.1051/mateconf/201824512006>.

16. Sui Yaguang, Zhang Dezhi, Tang Shiyang, and Chen Bo. Experimental and Numerical Research on Cylindrical Tubes under Outer Cylindrical Explosive Waves. *Shock and Vibration*. 2017. ID 6150193. <https://doi.org/10.1155/2017/6150193>.

17. Бейкер У., Кокс П., Уэстрайн П. и др. Взрывные явления: оценка и последствия: в 2-х кн. Кн.

1. Пер. с англ.; Под ред. Я.Б. Зельдовича, Б.Е. Гельфанда. Москва: Мир, 1986. 319 с.

18. Sandeman R. J. A simple physical theory of weak Mach reflection over plane surfaces. Australia, Australia/Oceania: Springer, 2015. <http://hdl.handle.net/1885/88972>.

19. Поляндов Ю.Х., Бабанков В.А., Добриков С.А. Особенности развития газового взрыва в помещении при наличии смежной комнаты. *Пожаровзрывобезопасность*. 2016. Т. 25, № 1. С. 38-46. <http://doi.org/10.18322/PVB.2016.25.01.38-46>.

## References

1. Mishuev, A.V., Kazennov, V.V., Husnutdinov, D.Z., Gromov, N.V., Luk'yanov, I.A., & Prozorovsky, D.V. (2011). О состоянии взрывобезопасности в промывочных городских автотрассах и путях ее повышения. *Vestnik MGSU*. 8. 331-334. (in Russian).

2. Vasilchenko, A.V., Ruban, A.V., Lucenko, T.A., & Anackaya, A.V. (2020). Ocenka bezopasnosti kolichestva vzryvchatogo veshchestva, obespechivayushchego sohraneniye ognestojkosti metallichesko karkasa pri vzryve. *Problemy pozharnoj bezopasnosti*. Har'kov: NUCZU. 48. 22-29. (in Russian).

3. Kolesnichenko, I.E., Artmiev, V.B., Kolesnichenko, E.A., Cherechukin, V.G., & Lyubomishchenko, E.I. (2017). Prevention of coal dust and methane explosions in mineworkings: theory and practice. *Mining Industry Journal*, 4(134), 26.

4. Krainov, A.Yu., & Moiseeva, K.M. (2017). Mathematical modeling of sparkplug ignition of a coal-dust monodisperse suspension in a methane-air mixture. *MATEC Web of Conferences*, 115, 03017. <http://doi.org/10.1051/mateconf/20171150301> STS-33 7.

5. Lipinsky, YU.M., & Panasenko, A.V. (2010). Formirovaniye detonatsionnykh voln v kanalah i ih vzaimodeystviye s pronicaemymi peregorodkami. *ZHurnal tekhnicheskoy fiziki*, 80(8), 53-58. (in Russian).

6. Sin, A.F., & ChErnyh, A.V. (2010). Patent Rossiya № RU2404365S2. Rossiya. (in Russian).

7. Orlov, G.G., Korol'chenko, D.A., & Korol'chenko, A.YA. (2015). Opredeleniye velichiny i haraktera vzryvnykh nagruzok pri primenenii inertsionnykh predohranitel'nykh konstruktsiy. *Pozharovzryvobezopasnost'*. 24, 4, 47-55. (in Russian).

8. Gorev, V., & Medvedev, G. (2017). The flexible perforated screens are a protection of buildings against external explosions. *MATEC Web of Conferences*, 106, 02028. <http://doi.org/10.1051/mateconf/20171060> SPbWOSCE-2016 2028.

9. Otrosh, Y., Kovaliov, A., Semkiv, O., Rudeshko, I., & Diven, V. (2018). Methodology remaining lifetime determination of the building structures. *MATEC Web of Conferences*. 230(02023). [doi.org/10.1051/mateconf/201823002023](http://doi.org/10.1051/mateconf/201823002023).

10. Zemlianskiy, O., Maladyka, I., Miroshnik, O., Shkarabura, I., & Kaplenko, G. (2017). Forecasting the emergency explosive environment with the use of fuzzy. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 6(4-90), 19-27. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.116839>.

11. Vasilchenko, A., Doronin, E., Ivanov, B., & Konoval, V. (2019). Effect of residual deformation of a steel column on its fire resistance under combined exposure "explosion-fire". *Materials Science Forum Trans Tech Publications Ltd*, 968, 288-293. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.288>.

12. Clavin, P. (2017). Nonlinear dynamics of shock and detonation waves in gases. *Combustion Science and Technology*, 189(5), 747-775. <https://doi.org/10.1080/00102202.2016.1260562>.
13. Nalisko, N.N. (2015). The estimation of shock air waves propagation in lengthy buildings subject to dissipation of gas stream internal energy. *Construction, materials science, mechanical engineering*, 83, 154-160. <http://smm.pgasa.dp.ua/article/view/57118/53395>.
14. Polandov, YU.H., Dobrikov, S.A., & Korol'chenko, A.YA. (2016). Vzryv gaza v cilindricheskoj trube s otverstiem na bokovoj poverhnosti. *Pozharovzryvbezopasnost'*, 25, 11, 17-26. <http://doi.org/10.18322/PVB.2016.25.11.17-26>. (in Russian).
15. Chernyshov, M., & Tya, A. (2018). Optimal regular reflection of shock and blast waves. *MATEC Web of Conferences*, 245, 12005. <http://doi.org/10.1051/mateconf/201824512006>.
16. Sui, Yaguang, Zhang, Dezhi, Tang, Shiyang, & Chen, Bo. (2017). Experimental and Numerical Research on Cylindrical Tubes under Outer Cylindrical Explosive Waves. *Shock and Vibration*. ID 6150193. <https://doi.org/10.1155/2017/6150193>.
17. Bejker, U., Koks, P., & Uestrajn, P. (1986). *Vzryvnye yavleniya: oценка i posledstviya*. YA.B. Zel'dovich, & B.E. Gel'fand (red.), (Kn. 1). Moskva: Mir. (in Russian).
18. Sandeman, R. J. (2015). *A simple physical theory of weak Mach reflection over plane surfaces*. Australia, Australia/Oceania: Springer, <http://hdl.handle.net/1885/88972>.
19. Polandov, YU.H., Babankov, V.A., & Dobrikov, S.A. (2016). Osobennosti razvitiya gazovogo vzryva v pomeshchenii pri nalichii smezhnoj komnaty. *Pozharovzryvbezopasnost'*, 25(1), 38-46. <https://doi.org/10.18322/PVB.2016.25.01.38-46>. (in Russian).

Надійшла до редакції 22.11.2021

Рецензент д-р. техн. наук, с.н.с. Вадим ТЮТЮНИК

**Васильченко Олексій Володимирович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри наглядово-профілактичної діяльності, Національний університет цивільного захисту України (вул. Чернишевська, 94, м. Харків, 61023, Україна). E-mail: avas2006@ukr.net

**Данілін Олександр Миколайович** – канд. техн. наук, доцент, начальник кафедри наглядово-профілактичної діяльності, Національний університет цивільного захисту України (вул. Чернишевська, 94, м. Харків, 61023, Україна). E-mail: danilin7887@gmail.com

**Луценко Тетяна Олексіївна** – канд. наук з держ. упр., старший викладач кафедри наглядово-профілактичної діяльності, Національний університет цивільного захисту України (вул. Чернишевська, 94, м. Харків, 61023, Україна). E-mail: lutsenkota13@gmail.com

**Надьон Олена В'ячеславівна** – канд. юр. наук, доцент кафедри наглядово-профілактичної діяльності, Національний університет цивільного захисту України (вул. Чернишевська, 94, м. Харків, 61023, Україна). E-mail: elena.nadyon@ukr.net

**Рубан Артем Вікторович** – канд. наук з держ. упр., доцент кафедри наглядово-профілактичної діяльності, Національний університет цивільного захисту України (вул. Чернишевська, 94, м. Харків, 61023, Україна). E-mail: ruban\_artem1979@ukr.net

## FEATURES OF THE BEHAVIOR OF A SHOCK WAVE IN A CHANNEL WITH WALLS OF DIFFERENT STIFFNESS

**Purpose of work.** Determination of the terms of weakening the destructive action of a shock wave during its propagation in the channels of mining workings or long communication premises of industrial buildings in an emergency explosion.

**Methods.** Using an analytical research method based on the main provisions of theory of combustion and explosion. Construction and analysis of the physical model of formation and distribution of a shock wave in the channel.

**Results.** The problem of weakening of a shock wave during its propagation in long channels of mining workings or communication passageways of industrial buildings with a potentially explosive atmosphere is considered. It is shown that when an explosion in the channel is formed by a head shock wave with a flat front, dynamic pressure which significantly exceeds the pressure on the fronts of falling and reflected shock waves that form the head shock wave. A physical model of formation and distribution of a shock wave in a channel with walls of different rigidity is proposed. It is shown that if one of the walls of the channel is mobile or easily deformed, it leads to a violation of the geometry of the plane front of the head shock wave and its weakening. Moreover, the reconstruction of the plane front of the head shock wave can occur at a distance of not less than 6-8 channel width. On the basis of this observation, the need to arrange explosion-relief valves in channels of mining workings or communication premises of industrial buildings with a potentially explosive atmosphere is substantiated.

**Novelty.** A physical model of the formation and propagation of a shock wave in a channel with walls of different stiffness is proposed. The necessity of equipping explosion-relief valves in the long communication channels of mine workings and buildings with increased explosion hazard to attenuate the shock wave is substantiated.

**Practical significance.** Arrangement of expanders with explosion-relief valves with dimensions comparable to the channel diameter and intervals between them up to 8 channel diameters in long communication channels of mine workings and buildings with increased explosion hazard will lead to weakening of the shock wave and reduction of its destructive effect.

**Keywords:** shock wave, head shock wave, explosion-relief valve.

**Vasilchenko Alexey** – Doctor of Philosophy in Technic, Associate Professor, Associate Professor of the Department of prevention activities and monitoring, National University of Civil Defence of Ukraine (Chernyshevsky str., 94, Kharkiv, 61023, Ukraine).

E-mail: avas2006@ukr.net

**Danilin Olexandr** – Head of the Department of prevention activities and monitoring, National University of Civil Defence of Ukraine (Chernyshevsky str., 94, Kharkiv, 61023, Ukraine).

E-mail: danilin7887@gmail.com

**Lutsenko Tatiana** – Candidate of Sciences in Public Administration, Senior lecturer of the Department of prevention activities and monitoring, National University of Civil Defence of Ukraine (Chernyshevsky str., 94, Kharkiv, 61023, Ukraine).

E-mail: lutsenkota13@gmail.com

**Nadyon Elena** – Doctor of Law, Associate Professor of the Department of prevention activities and monitoring, National University of Civil Defence of Ukraine (Chernyshevsky str., 94, Kharkiv, 61023, Ukraine).

E-mail: elena.nadyon@ukr.net

**Ruban Artem** – Candidate of Sciences in Public Administration, Associate Professor of the Department of prevention activities and monitoring, National University of Civil Defence of Ukraine (Chernyshevsky str., 94, Kharkiv, 61023, Ukraine).

E-mail: ruban\_artem1979@ukr.net