

© М.М. Налісько¹, А.С. Беліков¹, Л.В. Маладика², Л.І. Барташевська³

¹ ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», Дніпро, Україна

² Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Черкаси, Україна

³ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

УПРАВЛІННЯ ПОШИРЕННЯМ УДАРНИМИ ПОВІТРЯНИМИ ХВИЛЯМИ У ПІДЗЕМНИХ СПОРУДАХ

© M. Nalysko¹, A. Belikov¹, L. Maladyika², L. Bartashevsk³

¹ SHEE «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», Dnipro, Ukraine

² Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Defense of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

³ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

CONTROL OF FLOW BY SHOCK AIR WAVES IN UNDERGROUND STRUCTURES

Мета. Розробка та дослідження способів управління поширенням ударних повітряних хвиль за рахунок конструктивних і планувальних рішень з метою захисту персоналу при аварійних вибухах, в умовах збереження технологічного перетину каналів і виробок в протяжних спорудах. Обґрунтування параметрів чисельного моделювання в CFD моделях розривної внутрішньої течії газового потоку.

Методика. Дослідження виконувалися на підставі пошуку та аналізу публікацій по темі роботи, застосовувався аналіз об'єкта дослідження для математичної постановки задачі і обґрунтування граничних умов і параметрів чисельного моделювання. Для обґрунтування раціональних конфігурацій хвилевідбивних камер виконувалася аналітична оцінка взаємодії фронту ударної повітряної хвилі зі зворотним уступом, стінкою камери і увігнутих кутами. Шляхом чисельного моделювання вивчені фізичні процеси управління поширенням ударних повітряних хвиль.

Результати дослідження. Аналіз фізичних процесів, що відбуваються при управлінні поширенням ударних повітряних хвиль за допомогою хвилевідбивних камер, дозволив виявити ряд якісних і кількісних закономірностей руху фронту хвилі на сполученні з відповідними каналами. Показано механізм впливу на надзвуковий потік відбитої ударної хвилі, сформованої у хвилевідбивній камері. Для ефективного управління поширенням сильних ударних повітряних хвиль з надлишковим тиском більше 0,1 МПа необхідно застосовувати хвилевідбивну камеру з кутом нахилу поверхні відбивання близько 45°.

Наукова новизна. Обґрунтовано параметри чисельного моделювання поширення ударної повітряної хвилі через систему хвилевідбивних камер в середовищі моделювання FlowVision. Проведена аналітична оцінка параметрів хвильового фронту при дифракції зворотного уступу безпосередньо у хвилевідбивній камері, руху уздовж її стінки і відображення на похилій поверхні. Встановлено залежність ефективності управління ударної повітряної хвилі від параметрів камер.

Практичне значення. Обґрунтовані раціональні параметри хвилевідбивних камер, які дозволяють підвищити ефективність захисту персоналу від дії ударних повітряних хвиль в протяжних спорудах об'єктів цивільної оборони та гірничодобувної промисловості.

Ключові слова: ударні повітряні хвилі, управління розповсюдженням, хвилевідбивна камера, чисельний експеримент, відвідний канал.

Вступ. При проектуванні та експлуатації споруд схильних до впливу внутрішніх вибухів особливого значення набувають методи та способи захисту персоналу та будівельних конструкцій від вибухових навантажень. У багатьох відношеннях, тяжкість наслідків газових вибухів буде визначатися ступенем локалізації факторів, що вражають, і, в першу чергу, ударної повітряної хвилі. Для мінімізації їх наслідків у конструкціях споруд необхідно передбачати як елементи захисту від вибухових навантажень, так і гасіння повітряних ударних хвиль. Особливо це актуально для протяжних споруд підземних АЕС, заводів з виробництва вибухових речовин, боєприпасів, на складах та сховищах вибухонебезпечних матеріалів, а також у підземних спорудах шахт та копалень, небезпечних щодо виділення вибухових газів.

В даний час нормативні методики з розрахунку динамічних навантажень у галузі спеціального будівництва [1] та гірничодобувної промисловості [2] ґрунтуються на квазістатичному підході, основні залежності якого були отримані шляхом обробки експериментальних даних. Сучасні математичні чисельні методи та рівень розвитку обчислювальної техніки дозволяють моделювати газодинамічні процеси на рівні чисельного експерименту і таким чином детально розраховувати динаміку вибухового навантаження та обґрунтовувати способи гасіння ударних повітряних хвиль.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На сьогоднішній день відомо безліч способів гасіння ударних повітряних хвиль та захисту від них у підземних виробленнях гірських підприємств [3]. Однак всі вони засновані на розміщенні у світловому отворі вироблення додаткових потужних захисних конструкцій, які сильно обмежують або унеможливають транспортування по цьому каналу і знижують його вентиляційний перетин.

У галузі споруд цивільної оборони основні дослідження проводилися та відображені у роботах АТ «ЦНДПромбудівель» [4] та роботах МДБУ [5]. В останніх, гасіння ударної повітряної хвилі пропонується здійснювати зауженням каналу діафрагмою або перетиснутим перетином, що природно і прийнятно з технологічної точки зору, для виробничих споруд за умовами транспорту та вентиляції.

Виділення невирішеної частини проблеми. Незважаючи на значний обсяг досліджень, питання про способи і схеми гасіння повітряних ударних хвиль у протяжних каналах повністю не досліджено. У керівних документах з проектування спеціальних споруд [4] відсутні рекомендації з гасіння ударних повітряних хвиль і розсіювання її енергії за рахунок конструктивних і планувальних рішень, при повному збереженні технологічного перерізу каналу. Такі рішення можуть бути економічно вигідними способами локалізації вибуху і підвищити безпеку персоналу.

Ціль. Розробка та дослідження способів управління поширенням ударних повітряних хвиль з метою їх гасіння за рахунок конструктивних та планувальних рішень, за умови збереження технологічного перерізу каналів і виробок у протяжних спорудах. Обґрунтування параметрів чисельного моделювання у CFD моделях розривної внутрішньої течії газового потоку.

Викладення основного матеріалу. У процесі поширення ударних повітряних хвиль у протяжних каналах можуть виникати деформації фронту хвилі та зміни напрямку руху потоку газів за ним при його зустрічі з місцевими опорами та ділянками зміни конфігурації та перерізу каналу. Даний факт пропонується використовувати для управління поширенням вибухової хвилі, перенаправляючи газові потоки в додаткові виробки для розсіювання його енергії (рис. 1а) або зменшувати обсяг затікання надзвукового потоку в канали головного напрямку (рис. 1б). Вплив на потік можна здійснювати, змінюючи конфігурацію поперечного перерізу каналу у вигляді спеціальних відбивальних камер, де буде змінюватися кут набігання фронту хвилі на площину стінки, використовуючи при цьому властивість затікання ударної хвилі у вільний простір. У цьому вирішується головне завдання – збереження технологічного перерізу каналу.

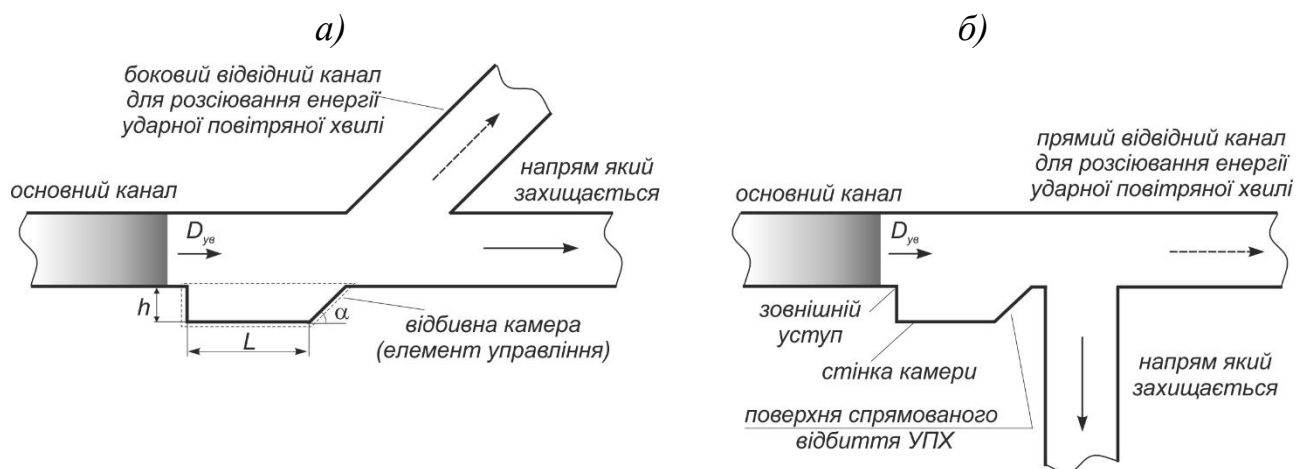


Рис. 1. Управління поширенням ударної повітряної хвилі із застосуванням відбивальних камер: а) перенаправлення надзвукового потоку в додаткові канали; б) зменшення обсягу затікання надзвукового потоку в захищені канали

Для ефективного управління розповсюдженням в даною повітряною хвилею необхідно встановити раціональні параметри камери: довжину L , глибину h , кут нахилу відбивної поверхні α і положення камери щодо каналів відгалуження та напрямків, що захищаються. Глибина та довжина камери буде визначатися необхідною довжиною та кутом нахилу відбивної поверхні, яка забезпечить максимальний імпульс відбитої ударної хвилі для найбільш інтенсивного впливу на газовий потік за фронтом ударної хвилі для його відхилення у канал відгалуження.

Оцінку динаміки впливу отриманої в такий спосіб відбитої хвилі на основний газовий потік зробити аналітичним методом неможливо. Для вирішення даної задачі, а також встановлення ефективності пропонуєваних схем управління поширенням ударних повітряних хвиль, застосований чисельний метод математичного моделювання – метод кінцевих обсягів, який реалізований в системі математичного моделювання руху рідини та газу FlowVision.

У математичній постановці задачі, поширення ударної повітряної хвилі по системі каналів моделюється внутрішнім турбулентним перебігом повністю стисливого середовища, яке можна представити у вигляді системи диференціальних рівнянь у приватних похідних:

– рівняння Нав'є-Стокса

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t} + \Delta(\rho V \otimes V) = -\nabla P + [(\mu + \mu_1)(\nabla V + (\nabla V)^T)] + S; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0; \quad (2)$$

– рівняння стану

$$P_{abc} = \frac{\rho R_0 T_{abc}}{M}; \quad (3)$$

– рівняння збереження енергії

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla(\rho V h) = \nabla \left(\left(\frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right) + Q; \quad (4)$$

де: $S = (\rho - \rho_{hyd})g + \rho B + R$; ∇ – оператор Гамільтона; Δ – оператор Лапласа; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с; $\vec{v} = (v^1 \dots v^n)$ – векторне поле швидкостей, м/с; C_p – питома теплоємність, Дж/(кг·°С); λ – молекулярна теплопровідність, Вт/(м·К); M – молекулярна вага газу; μ_t – турбулентна динамічна в'язкість, Па·с; Pr_t – турбулентне число Прандтля; R_0 – універсальна газова постійна, Дж/(моль·К); Sc – число Шмідта; Sc_t – турбулентне число Шмідта; Q – теплота, Дж; μ – молекулярна динамічна в'язкість, Па·с.

Невідомі P і \vec{v} є функціями часу t та координати x , $x \in \Omega$, где $\Omega \subset R^n$, $n=2, 3$ – тримірна область, у якій рухається газ. Рівняння (1) – (4) замикаються рівняннями стандартної k - ϵ моделі турбулентності.

Цей метод дозволяє моделювати систему каналів із внутрішньою турбулентною течією. Система каналів може бути як лінійна так і розгалужена (рис. 2).

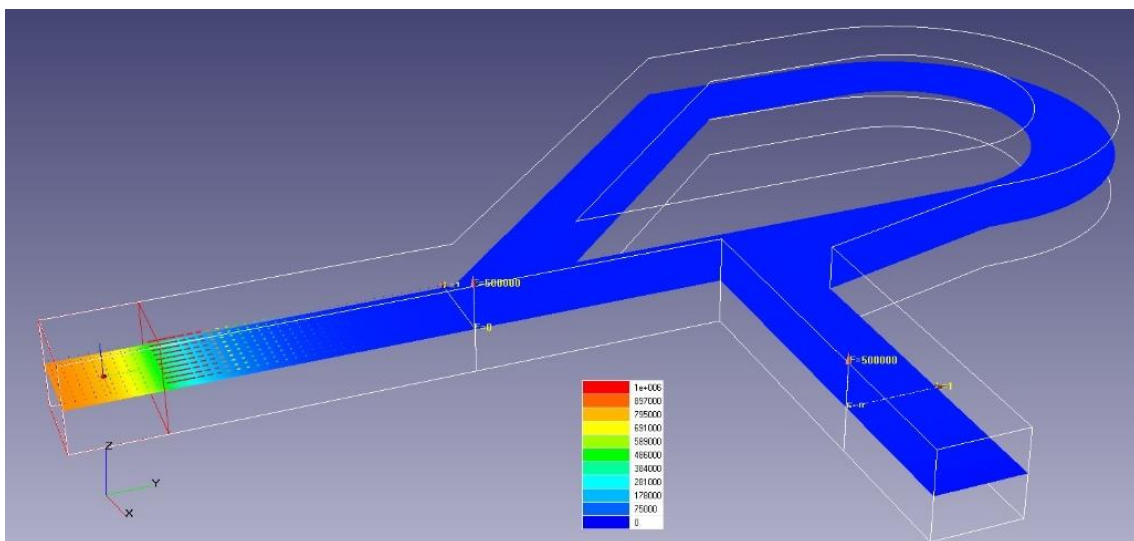


Рис. 2. Розрахункова область конфігурації сполучення з додатковою системою каналів для розсіювання енергії ударної повітряної хвилі (градієнтне поле ΔP)

Моделювання ударної повітряної хвилі виконувалось джерелом теплового вибуху, який був перед системою хвилевідбивних камер на відстані, достатньому для формування плоского фронту хвилі. Чисельний експеримент проведено у діапазоні надлишкового тиску від 0,2 до 3,0 МПа.

На відміну від раніше проведених досліджень розглянемо рух ударної повітряної хвилі вздовж зворотного уступу і на відбивній поверхні камери розташованій безпосередньо в каналі споруди, за схемою рис. 1а. Оскільки задача є автомодельним за числом Рейнольдса, проведено знерозмірювання геометричних параметрів відбивної камери шляхом приведення їх до ширини каналу $h_{o.к.}=0,5d_k$ (рис. 3).

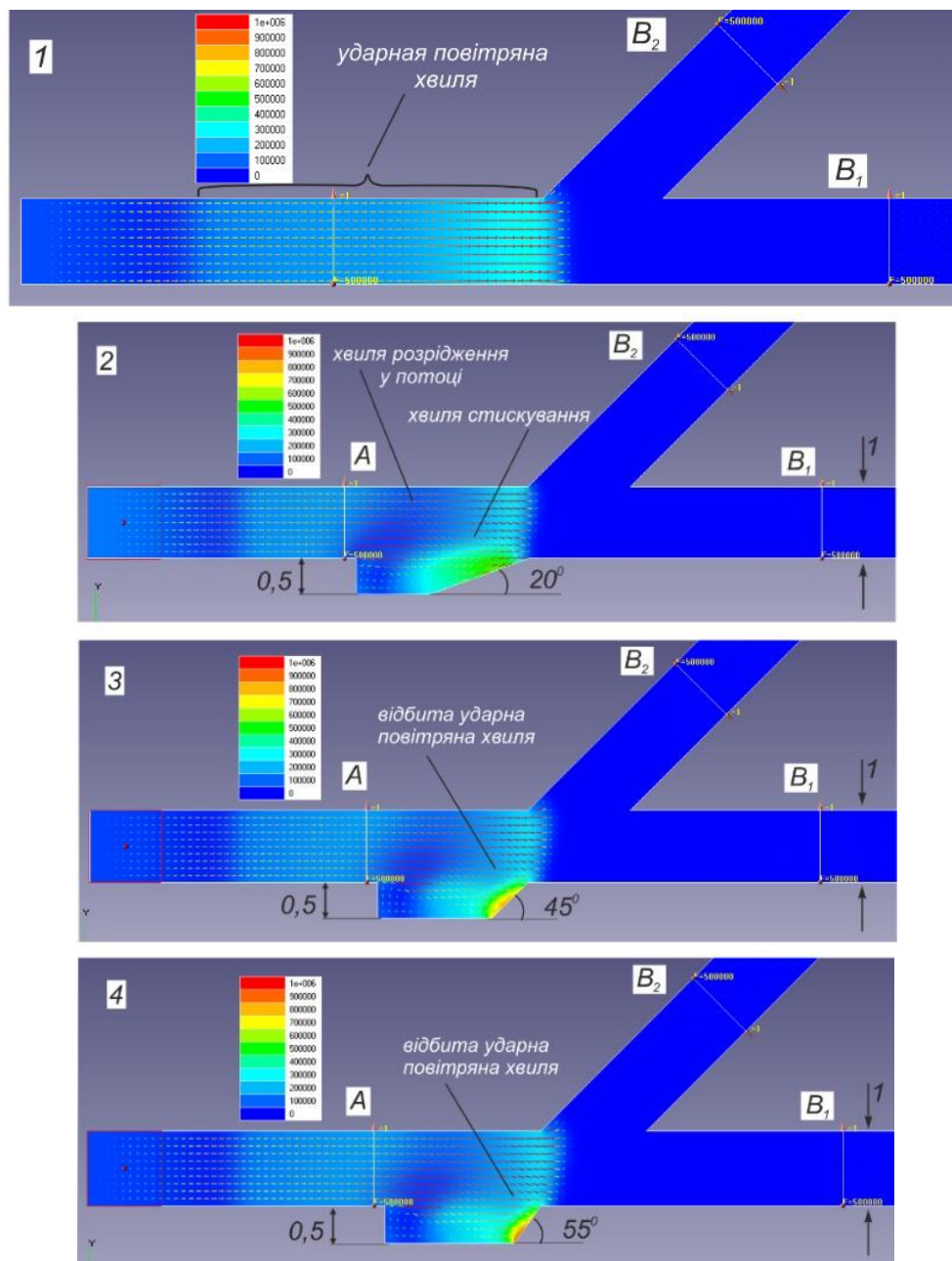


Рис. 3. Газодинаміка формування відбитої хвилі на поверхнях з різними кутами нахилу, безпосередньо у відбивній камері (градієнтне поле ΔP): А – точка реєстрації вхідного імпульсу ударної повітряної хвилі, В1, В2 – точки реєстрації вихідного імпульсу у прямому каналі та відгалуженні 45°

Застосування хвилевідбивної камери викликає появу хвиль розрідження в надзвуковому потоці (рис. 3-1 і 3-2), що позитивно позначається на зменшенні загальної інтенсивності ударної хвилі.

Чисельне моделювання продемонструвало передбачувані ефекти: за невеликих кутів нахилу відбивної поверхні утворюється хвиля стискування (рис. 3-2), що рухається за фронтом основної УПХ (рис. 4-1). Відповідно, її вплив на основний потік практично не викликає зміни його напрямку. Якщо величина кутів перевищує $39,2^\circ$, утвориться відбита УПХ (рис. 3 – 2, 3), яка поширюється в протитечії, викликаючи значне гальмування основного потоку й зміну напрямку вектора його масової швидкості (рис. 4 – 2, 3). Найбільший ефект впливу спостерігається при кутах нахилу поверхні, близьких до 45° . Подальше збільшення кута веде до виникнення протитечії в об'ємі самої камери й втрати в ній енергії відбитої хвилі. Вплив на основний потік відбувається опосередковано через хвилю фронті, утворені всередині камери.

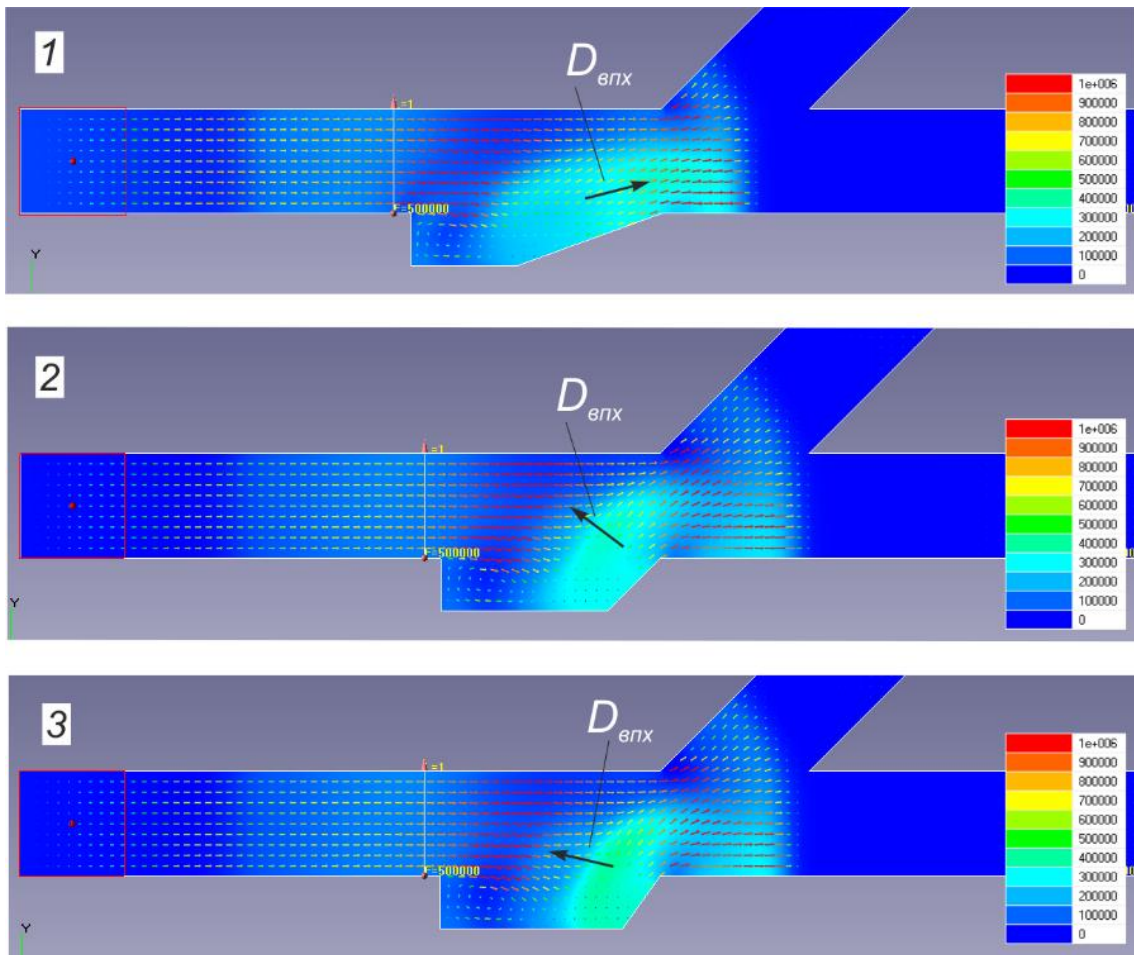


Рис. 4. Газодинаміка дії відбитої ударної хвилі на основний потік при різних кутах нахилу відбивної поверхні

Застосування відбивної камери, розташовуваної в створі перед сполученням відвідного каналу, значно зменшує інтенсивність УПХ, що можна простежити на градієнтному полі ΔP , у газовому потоці за сполученням.

У кількісному вираженні зниження амплітуди тиску УПХ чітко простежується на відповідних графіках імпульсу (рис. 5), які зареєстровані в точці входу A перед сполученням, й у двох точках виходу B_1, B_2 (див. рис. 3).

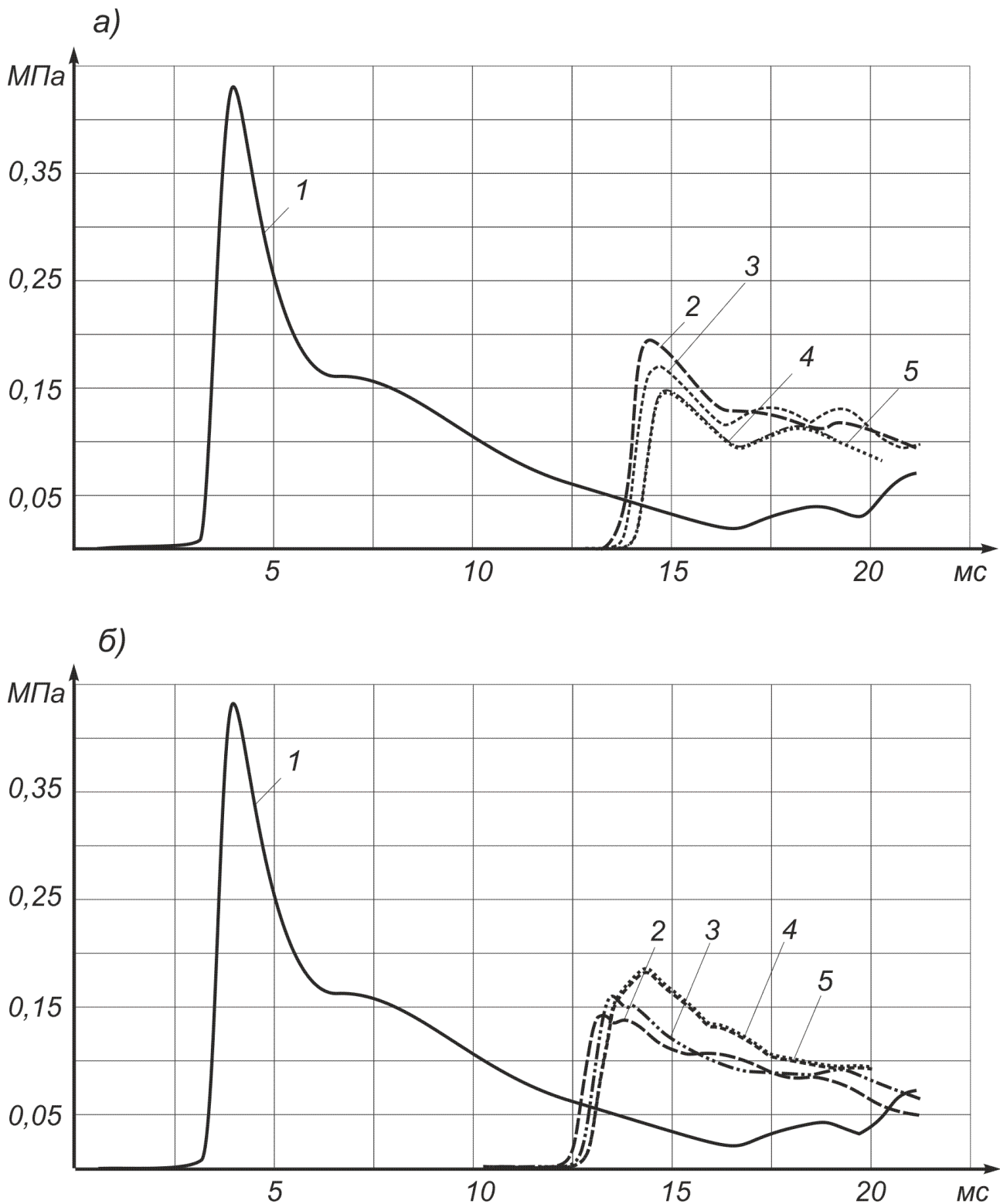


Рис. 5. Імпульс УПХ перед відбивною камерою (А) та за нею:
 а) вихідні імпульси в прямому каналі (B_1); б) у каналі відгалуження (B_2);
 1 – вхідний імпульс; 2 – вихідний імпульс при відсутності камери;
 3, 4, 5 – застосування камери з кутами нахилу відбивної поверхні 20, 45, 55°

У прямому відвідному каналі V_1 , (рис. 5а) падіння амплітуди при застосуванні відбивної камери з кутом нахилу поверхні відбиття 20° , становить 10 % (графік 2–3). Збільшення кута нахилу до 45° викликає падіння амплітуди в цій точці на 21 % (графік 2–4). При подальшому збільшенні кута нахилу поверхні відбиття ефективність гасіння практично не змінюється (графік 2–5).

Падіння амплітуди у фронті УПХ обумовлено збільшенням об'єму затікання надзвукового потоку в канал відгалуження V_2 . Це відображено на графіках рис. 5б. Амплітуда тиску УПХ збільшується на 12 % при куті нахилу поверхні 20° (графік 2–3) і на 18 % при куті 45° (графік 2–4).

Таким чином, раціональним кутом нахилу поверхні у відбивній камері є кут близький до 45° , за умови розташування камери в створі перед каналом відгалуження.

Дослідження процесу захисту каналу від затікання УПХ за допомогою відбивних камер виконувалося безпосередньо у вузлі сполучення з кутом 90° . Вузол сполучення, крім каналів головного напрямку, включає систему відвідних каналів у вигляді петлі, призначених для розсіювання енергії УПХ (див. рис. 1). Основна ідея способу гасіння полягає в тому, що на сполученні напрямку руху УПХ не змінюється й вона не зустрічає на своєму шляху стінок виробок, як у стандартному повороті під прямим кутом. При цьому вона вільно затікає в канали гасіння, розділившись на два зустрічних потоки: один утвориться до сполучення в каналі відгалуження, другий – за сполученням у прямому відвідному каналі. Для збільшення ефекту затікання в необхідні канали й зменшення затікання в канали головного напрямку використовуються елементи управління поширенням УПХ – відбивні камери й розкосина.

Як база порівняння для встановлення ефективності способу гасіння ударних повітряних хвиль були обрані дві ділянки: ділянка прямолінійного руху хвилі (рис. 6а) та її поширення через звичайне Г-подібне сполучення (рис. 6б). В обох випадках відстань між контрольними точками реєстрації імпульсу ударної хвилі $A_{вх.}$, $A_{вих.}$ відповідало відстані, пройденому фронтом ударної хвилі у запропонованому захисному поєднанні (рис. 5в,г,д).

У процесі поширення фронт ударної повітряної хвилі постійно залучає в рух нові маси газу. При цьому на прямолінійних ділянках формується надзвуковий потік з довжиною, що значно перевищує ширину каналу (рис. 6а). Весь цей потік несе у собі силовий імпульс ударної воли. На сполученні виникає два процеси: дифракція хвилі на уступі та відображення хвилі від стінки поперечного каналу. В результаті відображення частина енергії витрачається на рух потоку у зворотному напрямку, проте більша її частина переходить за сполучення (рис. 6б). Згідно з попередніми дослідженнями, для даної геометрії сполучення, ступінь затікання становить не менше 85 % по амплітуді фронту, при надлишковому вхідному тиску 0,52 МПа.

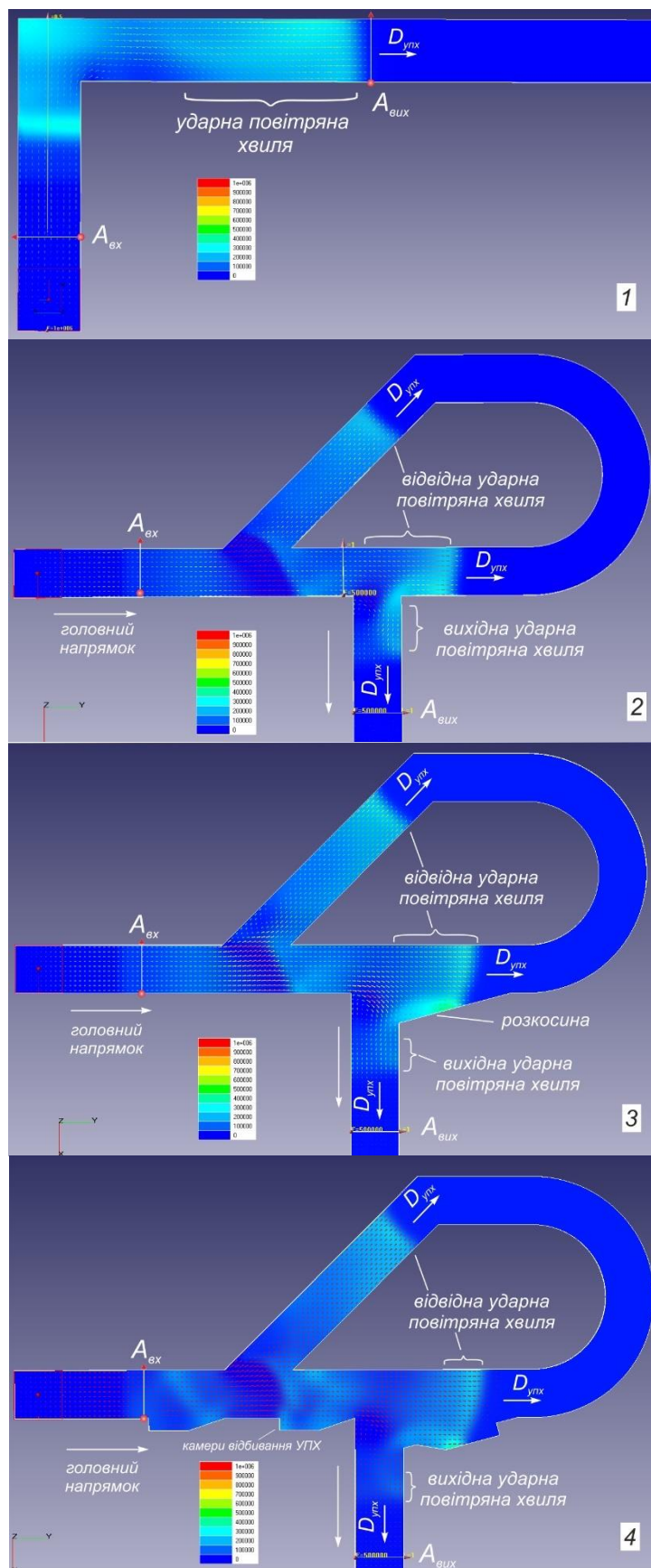


Рис. 6. Динаміка поширення ударної повітряної хвилі: затікання у звичайному поєднанні (1), та затікання у захисних сполученнях: без елементів керування (2), із застосуванням розкоски (3), із застосуванням хвилевідбивних камер (4) (градієнтне поле ΔP)

У запропонованій принциповій схемі гасіння ударних хвиль на сопр-ряже- нии за рахунок відвідних каналів значно знижується інтенсивність затікання хвилі, це чітко показує чисельний експеримент і чітко простежується на градієнтному полі ΔP (рис. 6в).

При підході фронту до відгалуження каналу головного напрямку хвиля де-фрагуватиме і відбиватиметься махівським чином протилежної стінки. Для зме-ншення впливу цих процесів пропонується два елементи управління: застосувати розкіс прямого кута (рис. 6г) і хвилевідбивну камеру перед відгалуженням (рис. 6д). Перший елемент зводить до мінімуму маховське відображення, другий – дозволяє змістити ядро надзвукового потоку до протилежної стінки, створюю-ючи ефект відхилення потоку від вхідного простору каналу головного напрямку.

У петлі відвідних каналів виникають відбиті хвилі, які рухаються у зворот-ному напрямку (рис. 7).

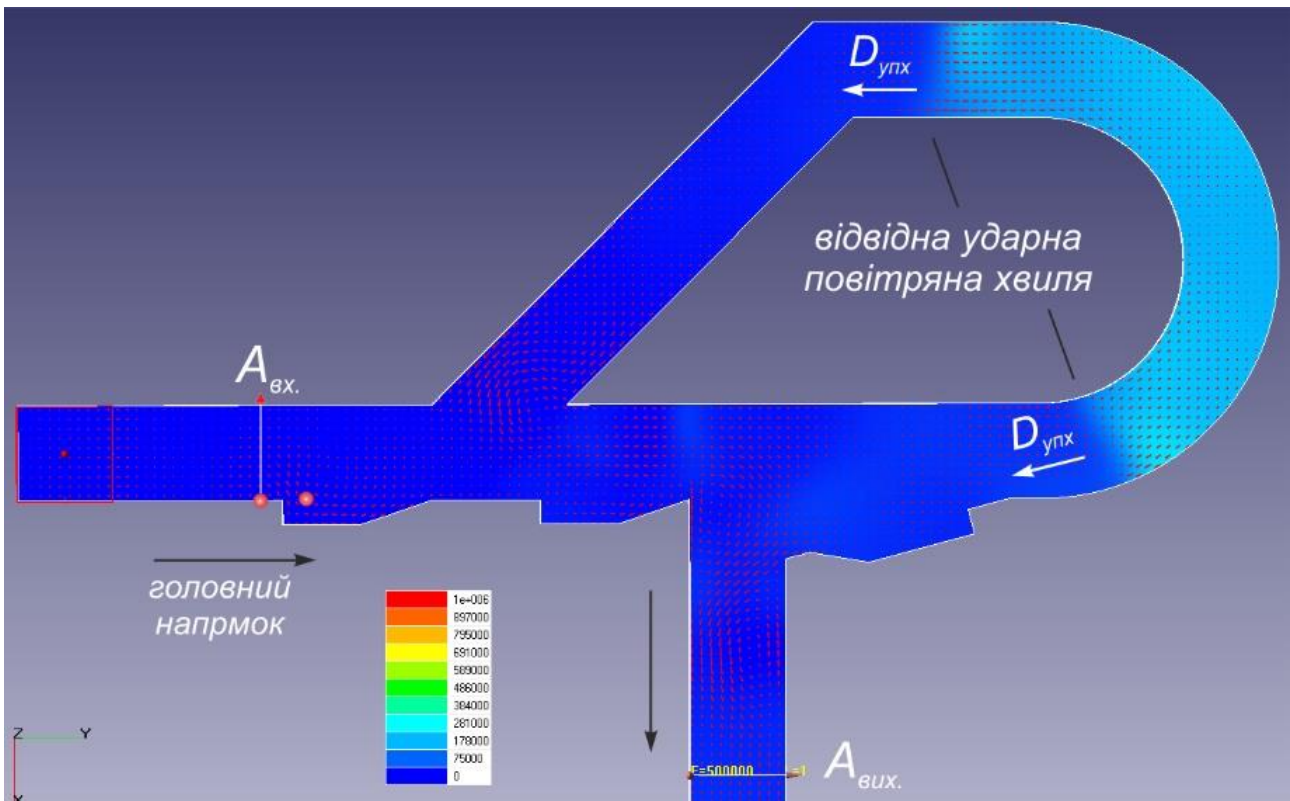


Рис. 7. Відбиті ударні хвилі у відвідних каналах

Для захисту головного напрямку від затікання цієї хвилі також необхідне застосування хвилевідбивної камери на лінії розкоски прямого кута.

Вплив запропонованого способу гасіння ударних хвиль та елементів керу-вання потоком на амплітуду та імпульс хвилі відображені на графіках імпульсу у точці $A_{вих}$. (рис. 8).

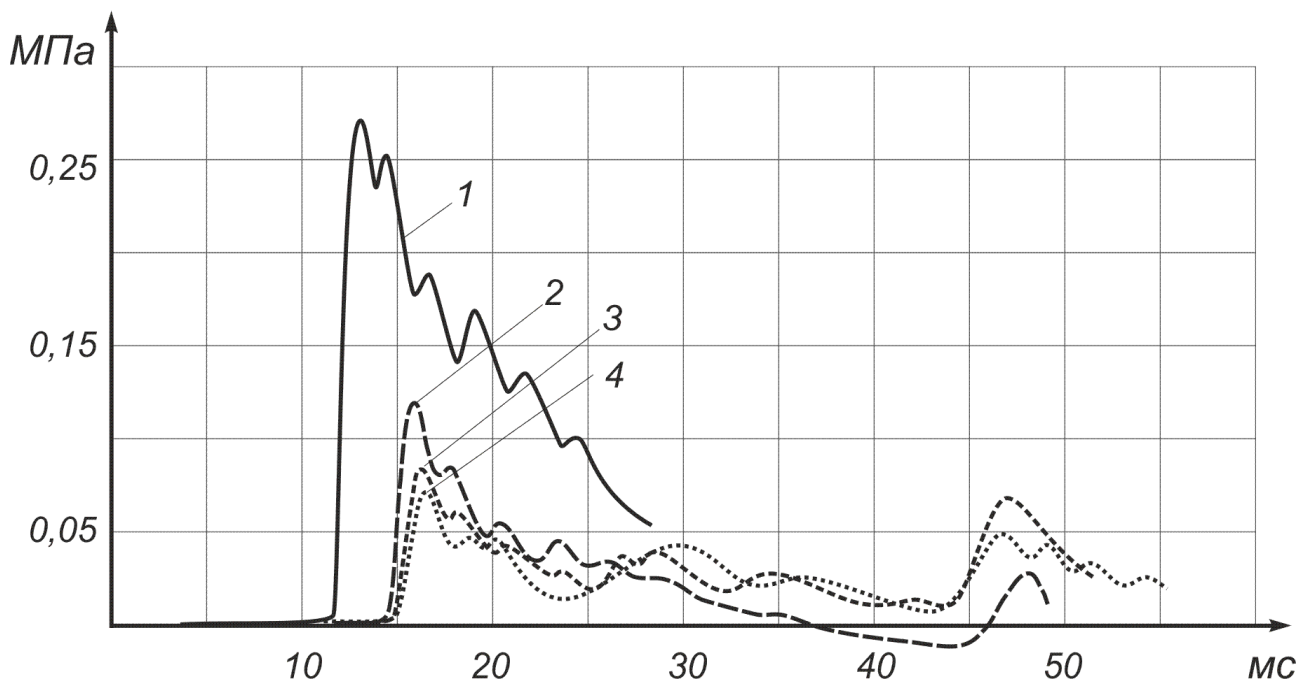


Рис. 8. Імпульс ударної повітряної хвилі у вихідному каналі захисного сполучення: 1 – базове Г-подібне сполучення, 2 – захисне сполучення, 3 – захисне сполучення з розкошкою, 4 – захисне сполучення з хвилевідбивними камерами

У цілому нині, принципова схема з відвідними каналами знижує амплітуду вихідної хвилі на 55 % (графік 1-2) проти базовим Г-образним сполученням. При цьому форма імпульсу, через наявність відбитих хвиль у додаткових каналах гасіння набуває другого вираженого піку, хоча його амплітуда на 10-50 % нижче максимуму.

Застосування розкоски дозволяє знизити амплітуду вихідної хвилі до 70 % (графік 1-3), проте другий пік лише на 10 % нижче максимуму. Для зниження амплітуди другого піку у схемі застосовується хвилевідбивна камера на лінії розкоски. Спільно з двома камерами, розташованими перед відгалуженнями дозволяють знизити амплітуду вихідної хвилі на 74 %.

Висновки. Проведені дослідження дозволяють визначити ефективні методи управління поширенням ударних повітряних хвиль зменшення їх затікання в канали головного напрямки протяжних споруд. За результатами чисельних експериментів обґрунтовано раціональні параметри хвилевідбивних камер та встановлено ефективність гасіння ударних хвиль у пропонуваніх схемах захисних сполучень.

Перелік посилань

1. СНиП 2.01.54-84 (1998). *Защитные сооружения гражданской обороны в подземных горных выработках* ГУП ЦПП.
2. ДНАОП 1.1.30-4.01.97 (1997) *Статут ДВГРС по організації і веденню гірничорятувальних робіт*. Мінвуглепром.
3. Фролов С. М. (1993). Эффективность ослабления ударных волн в каналах различными способами. *Физика горения и взрыва*, (1), 34-39.

4. *Пособие по обследованию и проектированию зданий и сооружений, подверженных воздействию взрывных нагрузок* (2000). АО «ЦНИИПромзданий».
5. Мишуев А.В. (2015). *Воздушная ударная волна в сооружениях*.

АННОТАЦИЯ

Цель. Разработка и исследование способов управления распространением ударных воздушных волн с целью их гашения за счет конструктивных и планировочных решений, при условии сохранения технологического сечения каналов и выработок в протяженных сооружениях. Обоснование параметров численного моделирования в CFD моделях разрывного внутреннего течения газового потока.

Методика. Исследования выполнялись на основании поиска и анализа публикаций по теме работы, применялся анализ объекта исследования для математической постановки задачи и обоснования граничных условий и параметров численного моделирования. Для обоснования рациональных конфигураций волноотражательных камер выполнялось аналитическая оценка взаимодействия фронта ударной воздушной волны с обратным уступом, стенкой камеры и вогнутым углом. Путем численного моделирования изучены физические процессы управления распространением ударных воздушных волн.

Результаты исследования. Анализ физических процессов происходящих при управлении распространением ударных воздушных волн с помощью волноотражательных камер позволил выявить ряд качественных и количественных закономерностей движения фронта волны на сопряжении с отводными каналами. Показан механизм воздействия на сверхзвуковой поток отраженной ударной волной сформированной в волноотражательной камере. Для эффективного управления распространением сильных ударных воздушных волн с избыточным давлением более 0,1 МПа необходимо применять волноотражательную камеру с углом наклона поверхности отражения близкой к 45°. Такого типа камеры, в зависимости от расположения, существенно повышает затекание потока в отводные каналы и уменьшает затекание в защищаемые направления. Предлагаемые планировочные решения по конфигурации сопряжения выработок в комплексе с волноотражательными камерами может снижать амплитуду фронта ударной воздушной волны на выходе из сопряжения до 74 %, в сравнении с базовым вариантом сопряжения.

Научная новизна. Обоснованы параметры численного моделирования распространения ударной воздушной волны через систему волноотражательных камер в среде моделирования FlowVision. Произведена аналитическая оценка параметров волнового фронта при дифракции обратного уступа непосредственно в волноотражательной камере, движения вдоль ее стенки и отражение на наклонной поверхности. Установлена зависимость эффективности управления ударной воздушной волны от параметров камер.

Практическое значение. Обоснованные рациональные параметры волноотражательных камер позволяют повысить эффективность защиты персонала от действия ударных воздушных волн в протяженных сооружениях объектов гражданской обороны и горнодобывающей промышленности.

Ключевые слова: ударные воздушные волны, управление распространением, волноотражательная камера, численный эксперимент, отводной канал

ABSTRACT

Purpose. Development and research of ways to control the propagation of shock air waves due to constructive and planning solutions for the purpose of protecting personnel during emergency explosions, in conditions of preserving the technological section of canals and workings in extended structures. Justification of the parameters of numerical simulation in CFD models of discontinuous internal flow of a gas stream.

Methodology. The research was carried out on the basis of search and analysis of publications on the topic of the work, an analysis of the research object was used for the mathematical formulation of the problem and the justification of the boundary conditions and parameters of numerical simulation. To substantiate the rational configurations of the reflecting-wave chambers, an analytical evaluation of the interaction of the shock air-wave front with the backward step, the chamber wall and the concave angle was performed. By numerical simulation, the physical processes controlling the propagation of shock air waves.

Findings. An analysis of the physical processes occurring during the control of the propagation of shock air waves with the aid of chambers of reflecting waves made it possible to reveal a number of qualitative and quantitative laws governing the motion of the wave front at the interface with the branch channels. The mechanism of action of a reflecting wave formed in a chamber by a reflected shock wave on a supersonic flow is shown. To effectively control the propagation of strong shock air waves with an excess pressure of more than 0.1 MPa, it is necessary to use chambers reflecting waves with an inclination angle of the reflection surface close to 45°.

Originality. The parameters of the numerical simulation of the propagation of the shock air wave through the system of reflected waves in the FlowVision modeling environment are substantiated. An analytical evaluation of the parameters of the wave front is made during diffraction of the backward step directly in the chambers of the reflecting waves, movement along its wall and reflection on the inclined surface. The dependence of the effectiveness of controlling the shock air-wave on the parameters of the chambers.

Practical value. Reasonable rational parameters of the reflecting wave chambers allow to increase the efficiency of personnel protection from the action of shock air waves in the extended structures of civil defense and mining facilities.

Keywords: *shock air waves, propagation control, waveguide camera, numerical experiment, branch channel*