

PHYSICAL SCIENCES

INITIATION BY AN AIR SHOCK WAVE ACCUMULATION OF METHANE IN THE ATMOSPHERE OF COAL MINES

Sobolev V.

*Professor of the National Technical University
"Dnipro Polytechnic", Dnipro, Ukraine*

Nalysko M.

*Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor, Ukrainian
State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine*

Skobenko O.

*Associate Professor, Ph, dean of the Faculty of Architecture,
Construction and Land Management, m. Dnipro, Ukraine*

Kulivar V.

*Doctor of Philosophy, Associate Professor of the Department of
Civil Engineering, Geotechnics and Geomechanics, National
Technical University "Dnipro Polytechnic", Dnipro, Ukraine*

ІНІЦІУВАННЯ ПОВІТРЯНОЮ УДАРНОЮ ХВИЛЕЮСКУПЧЕННЯ МЕТАНУ В АТМОСФЕРІ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

Соболєв В.В.

*професор Національного технічного університету
«Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна*

Налисько М.М.

*професор, доктор технічних наук, професор Українського
державного університету науки і технологій, м. Дніпро, Україна*

Скобенко О.В.

*доцент, кандидат технічних наук, декан факультету архітектури,
будівництва і землеустрою, м. Дніпро, Україна*

Кулівар В.В.

*доктор філософії, доцент кафедри будівництва, геотехніки
і геомеханіки Національного технічного університету*

«Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

<https://doi.org/10.5281/zenodo.12578925>

Abstract

The paper presents a methodology and results of solving the problem of initiating a methane-air mixture by a shock wave. The methodology is based on the joint solution of the equations of gas dynamics and chemical kinetics of combustion of a methane-oxygen mixture in air by a numerical method. The observed initiation effects showed a strong influence of gas dynamics on the kinetics of chemical reactions of explosive combustion, which corresponds to the thermal mechanism of ignition and the transition of combustion to detonation.

Анотація

Представлено методику та результати вирішення задачі ініціювання метано-повітряної суміші ударною хвилею. Методику побудовано на спільному розв'язанні рівнянь газодинаміки та хімічної кінетики горіння суміші метан-кисень у повітрі чисельним методом. Спостережувані ефекти ініціювання показали сильний вплив газодинаміки на кінетику хімічних реакцій вибухового горіння, що відповідає тепловому механізму займання і переходу горіння в детонацію.

Keywords: mathematical modeling, mine workings, methane, shock wave, explosion

Ключові слова: математичне моделювання, гірничі виробки, метан, ударна хвиля, вибух

Вступ

Збільшення глибини ведення гірничих робіт на вугільних шахтах України, перехід до відпрацювання віддалених виїмкових полів призводить до підвищення газонасиченості гірничих виробок та ускладнення ліквідації можливих пожеж та вибухів газу та пилу [1]. Джерелом насиченості рудникової атмосфери безпосередньо є вугільна речовина [2-4], у якій фізико-хімічні перетворення активно здійснюються особливо під час складного деформування

(викиди вугілля й газу) [5-7], впливу слабких електричних полів [8-11], магнітних [12-15] та сполученням електричного і механічного активуванням [16, 17]. Небезпека аварій [1], крім іншого, полягає ще й у тому, що вони можуть супроводжуватися повторними вибухами рудничної атмосфери небезпечними для гірничорятувальників та інших ліквідаторів аварій [18]. Вибухи метано-повітряних сумішей (МПС) призводять до утворення повітряних

ударних хвиль (ПУХ), які мають великий запас енергії і здатні поширюватися по мережі гірничих виробок. Одним із способів захисту людей від повторних вибухів є захист відстанню та спорудження вибухостійких перемичок для ізоляції аварійних ділянок. На сьогоднішній день, розрахунок безпечних відстаней проводиться за методиками, заснованими на експериментальних дослідженнях 70-х років минулого століття. Практика показує, що результати розрахунків не завжди надійно встановлюють безпечні відстані та параметри вибухозахисних споруд. Про це свідчать важкі наслідки повторних вибухів у гірничих виробках під час робіт з ліквідації аварій на шахтах, в результаті яких загинули і були травмовані рятувальники, що виконували роботи як під час зведення ізолюючих перемичок, так і працюючи під їх захистом. Аналогічні ситуації виникали під час вибухів на шахтах України, Китаю, Франції та інших держав.

Аналіз останніх досліджень та постановка задачі.

Такий стан справ можливий через неповноту обліку факторів газодинамічних процесів, що виникають при поширенні ПУХ у гірничих виробках в умовах ендегенних пожеж та ізолюваних просторів. Це також ускладнюється відсутністю єдиних підходів до розрахунку параметрів ПУХ [19]. У наукових центрах з безпеки гірничих робіт виконувались роботи з вивчення дії ЛУХ у мережі гірничих виробок з метою вдосконалення методики розрахунку безпечних відстаней [20, 21]. Отримані результати показують, що в емпіричних залежностях, що застосовуються в даний час, не враховуються деякі процеси, наприклад, хвильові ефекти відображення, втрати тиску на сполученнях виробок приймаються без урахування швидкості руху газових потоків та ін. В умовах продовжених ізолюваних виробок може виникати кілька загазованих ділянок або локальних скупчень метану. Взаємодія ударної повітряної хвилі з ними мало вивчена, хоча відомо, що вона має ініціюючу здатність [22, 23] та інш. Встановлюються критерії за масою займистого заряду, і на їх основі вдосконалюються методики випробування запобіжних ВР у кутовій мортир [24]. У роботі [25] вивчається час ініціювання метано-повітряних сумішей ПУХ за умов камери згорянь двигунів. Значна кількість досліджень у цьому напрямі проводиться в університетах Китаю [26, 27]. Проте закономірностей ініціювання МПС з ураху-

ванням хімічної кінетики горіння метану, придатних для інженерних розрахунків за умов гірничих виробок, не отримано.

Мета роботи – підвищення безпеки робіт з ліквідації пожеж у гірничих виробках шляхом обліку в розрахунку безпечних відстаней, закономірностей ініціювання метано-повітряних сумішей ударною повітряною хвилею при ймовірних повторних вибухах рудничної атмосфери, математичне моделювання проходження прямої та відбитої ударної повітряної хвилі через загазовані ділянки виробок.

Матеріал та результати досліджень.

При розгляді завдань газової детонації зазвичай використовують теорії ударних та детонаційних хвиль [28-29], побудовані на основі одновимірної моделі стійкої детонаційної хвилі. Сучасні дослідження показують, що ці теорії, як і будь-які інші, є дещо ідеалізованими і основна причина порушення ідеалізації в реальності це нестійкість газодинамічних, хімічних та кінетичних процесів, що виявляється в посиленні слабких збурень, порушенні одновимірності течії, виникненні зламів хвильового фронту та ін [31]. Було встановлено, що існують сильні і слабкі детонаційні хвилі, що поширюються зі швидкостями відмінними від хвиль Чепмена-Жуге, що має місце взаємозв'язок між інтенсивністю ударної хвилі, що ініціює, і кінетикою хімічної реакції [32]. Все це проявляється в широкій різноманітності видимих ефектів газових вибухів, які на сьогоднішній день, зважаючи на недосконалість теорій ік, методів розрахунку, важко прогнозувати. Для умов гірничих виробок, встановлюється типи вибухів, що відрізняються від класифікацій, прийнятих у рамках єдиного терміну «пожежовибухо-небезпека».

У цій роботі, для встановлення параметрів поширення ПУХ з урахуванням вибухів локальних скупчень метану використовується чисельне моделювання течій газового потоку із застосуванням математичної моделі ударної труби, в якій реалізований газодинамічний підхід.

Математична постановка задачі наступна. Гірська виробка моделюється циліндричним каналом (рис. 1). Канал з одного боку має вільний вихід, з іншого – закритий жорсткою стінкою. Усередині каналу, в розрахунковій області, знаходиться ділянка, заповнена метано-повітряним середовищем (біля тупикової стінки). На деякій відстані від цієї ділянки знаходиться область теплового вибуху, що є джерелом ПУХ.

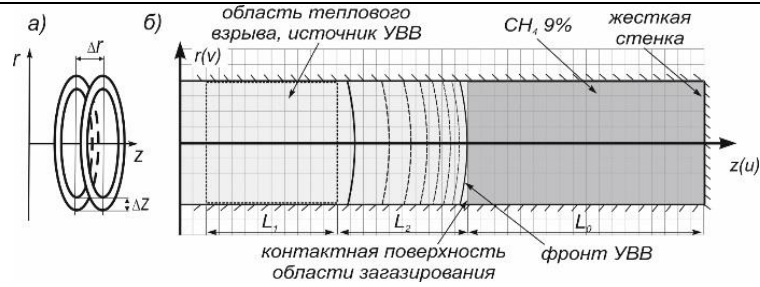


Рис. 1. Загальна структура розрахункової сітки: а) в об'ємному поданні, у циліндричній системі координат; б) у плоскому поданні; Δr , Δz – розміри розрахункового осередку, зліва – тип кордону розрахункової області «вільний вихід», низу, зверху – тип кордону розрахункової області «непротікання», праворуч – тип кордону розрахункової області «жорстка стінка»; v , u – компоненти вектора швидкості

Задача вирішувалася шляхом використання методу чисельного рахунку рівнянь газодинаміки в системі "МПС-навколишнє середовище". Рух середовища в циліндричній системі координат описується рівняннями Ейлера (у дивергентному вигляді):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{W}) &= 0, \text{ нерозривності} \\ \left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \text{div}(\rho u \bar{W}) + \frac{\partial P}{\partial z} &= -\tau_{mp} \frac{\Pi}{S}, \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \text{div}(\rho v \bar{W}) + \frac{\partial P}{\partial r} &= 0 \end{aligned} \right\} \text{ руху (1)} \\ \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \text{div}(\rho E \bar{W}) + \text{div}(P \bar{W}) &= q\Pi + q_x \rho \frac{\partial \alpha}{\partial t}, \end{aligned}$$

де ρ – густина; P – тиск; $\bar{W}$ – вектор швидкості; u , v – компоненти швидкості W по осі z та r відповідно; z , r – циліндричні координати; E – повна енергія; J – внутрішня енергія газу; τ_{mp} – напруження поверхневих сил тертя газового потоку об стінку; q – густина теплового потоку у стінку каналу; S , Π – поперечний переріз і периметр виробки; q_x – тепловий ефект хімічної реакції горіння вуглеводнів; α – мольна частка вуглеводню у шахтній атмосфері; t – час.

Вирішення системи рівнянь (1) проводилося з використанням однорідної схеми наскрізного рахунку. В якості такої схеми був застосований модифікований метод великих частинок.

Для реалізації обліку енергії горіння (1), в розрахунковій схемі використовується сумарне кінетичне рівняння хімічної реакції горіння суміші метану і кисню в повітрі [33]. Хімічна реакція представлена у вигляді однієї бруто-схеми (узагальненого кінетичного механізму):



Швидкість реакції по i -ому компоненту $i=1, 2$ задається у формі Арреніуса:

$$-\frac{dc_i}{dt} = Z \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \prod c_i^{v_i}, \quad (3)$$

де Z , E_a , v_i – ефективні передекспоненційний множник, енергія активації та порядок реакції по i -ому компоненту (приймалися відповідно до роботи

Westbrook C.K. Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuel in Flames, 1981).

Рівняння хімічної кінетики вирішувалося чисельним методом разом із рівняннями газової динаміки та рівняннями стану. Різницький аналог рівняння (3) представлявся у такому вигляді:

$$-\frac{[c_1]_{i,j}^{n+1} - [c_1]_{i,j}^n}{\Delta t} = k \cdot ([c_1]_{i,j}^n)^{v_1} ([c_2]_{i,j}^n)^{v_2},$$

де k – константа швидкості хімічної реакції горіння; i, j – цілочисельні координати розрахункового осередку; n – номер тимчасового шару.

При розрахунку рівняння збереження енергії (1) у праву частину додається доданок:

$$\Delta t \cdot QZ \exp(-E_a / RT) \cdot ([c_1]_{i,j}^n)^{v_1} ([c_2]_{i,j}^n)^{v_2}$$

де Q – теплотворна здатність горіння метану у повітрі при стехіометричному складі метан-кисень.

У задачі приймалися такі припущення: вибухова газоповітряна суміш рівномірно розподілена на прямолінійній загазованій ділянці, граничні умови теплопровідності в стінку каналу – умови третього роду з постійним коефіцієнтом теплообміну газового потоку зі стінкою 50 Вт/(м²·К) та теплопровідністю стінки (аргіліт) 2 Вт/(м·К), шорсткість стінки каналу відповідає встановленому кріпленню типу СВП-19 з кроком установки 1,0 м.

Чисельний експеримент проводився для виробки діаметром 2 м, довжина загазованої ділянки $L_0=5$ м, відстань від границі загазованої області до джерела ПУХ $L_2=3$ м, довжина джерела ПУВ $L_1=3$ м (рис. 1). Ділянка загазування розташовувався біля глухого кута з таким розрахунком, що б ПУХ пройшла крізь нього і відбилася від жорсткої стінки. Таким чином, вихідна суміш стискається двічі і можна простежити дію відбитої ударної хвилі на МПС.

Джерелом ПУХ в моделі є ділянка виробки де відбувається миттєвий об'ємний вибух. Надлишковий тиск початкового вибуху можна задавати довільно, що дозволяє регулювати амплітуду тиску у фронті повітряної ударної хвилі, що моделює різну потужність джерела та відстань від хмар МПС.

При поширенні ПУХ вздовж виробки відбувається падіння амплітуди хвилі, а при її входженні в МПС відбуваються зміни положення контактної поверхні. Змінюється також і концентрація метану всередині його скупчення за рахунок приведення в

рух газу за фронтом ПУХ (рис. 2). Тому характерним параметром взаємодії ПУХ з МПС вважати-

memo амплітуду хвилі в момент проходження фронту хвилі через контактну поверхню загазованої області (рис. 1).

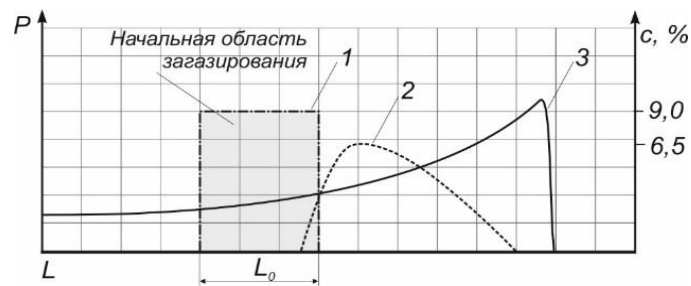


Рис. 2. Динаміка зміни профілю концентрації метану (c) при проходженні УПХ через ГПС без її ініціювання (загазована область знаходиться на певній відстані від глухого кута): 1 – початкова концентрація метану, 2 – профіль після проходження УПХ, 3 – тиск у ударній хвилі (P)

У чинних нормативних методиках розрахунку параметрів поширення ПУХ у гірничих виробках максимальні значення надлишкового тиску обмежується величиною $2,8 \cdot 10^6$ Па, тому область варіювання характерного параметра взаємодії повітряної ударної хвилі МПС становила $(0,1 \dots 3) \cdot 10^6$ Па.

Проведені чисельні експерименти показали, що повітряна ударна хвиля з амплітудою до $1,1 \cdot 10^6$ Па проходячи через МПС не чинить на неї ініціюючої дії, відбувається лише зниження концентрації та зміщення хмари за рахунок руху потоку. При амплітуді $1,1 \cdot 10^6$ Па відбувається спалах МПС, але тільки у відбитій ПУХ. Причому, спалах спостерігається поблизу контактної поверхні, до якої входив фронт прямої МПС і під дією якого він значно змістився від початкового положення (рис. 3, а). На момент приходу відбитої хвилі в точку спалаху, ГПС мав тиск $0,4 \cdot 10^6$ Па, амплітуда відбитої хвилі становила $1,3 \cdot 10^6$ Па. Виникнення спалаху на межі хмари відбувається через максимальний час впливу на цю область прямої хвилі стиснення (тобто. реалізується необхідний час індукції) і зниження енергії активації під тиском.

У діапазоні характерного тиску на фронті ПУХ від $1,4 \cdot 10^6$ Па відбувається запалення МПС (під дією відбитої хвилі), при $1,8 \cdot 10^6$ Па виникає перехід горіння в детонацію (рис. 3,б), що обумовлено початковим адіабатичним стисненням газу в падаючій ударній хвилі. Зародження детонаційної хвилі супроводжується стрибком збільшення тиску майже у 10 разів. Це добре узгоджується з даними робіт

[34, 35] у яких показано підвищення термодинамічної ефективності спалювання газів у режимі детонації та збільшення стиснення газів у 20–30 разів.

Починаючи з величини амплітуди $2,3 \cdot 10^6$ Па відбувається явище, яке характеризується проходженням хвилі, що падає, викликає запалювання суміші, а відбита хвиля, що повертається до осередку горіння, промотує реакцію горіння та переводить її в режим детонації (рис. 3, в). Такий ефект відбувається при синхронізації виділення енергії хімічної реакції горіння та газодинамічних процесів [36].

Стійке запалення та детонацію метано-повітряної суміші викликає пряма ПУХ з амплітудою $2,6 \cdot 10^6$ Па (рис. 3,г). Причому, з початку відбувається запалення суміші, а потім через 1,7 мс горіння переходить у детонацію, хвиля якої наздоганяє фронт ударної хвилі. Запалення відбувається, як і у попередніх експериментах на контактній поверхні (яка встигає зміститися) і поза фронтом ПУХ, тобто. до моменту запалення фронт хвилі встигає просунути вглиб МПС. Зі збільшенням амплітуди ПУХ час від виникнення горіння до переходу процесу в детонацію скорочується, точка запалення зміщується у фронт ударної хвилі, а саме запалення відбувається в момент входу фронту хвилі в локальне скупчення метану. Такий процес спостерігався при амплітуді $3,7 \cdot 10^6$ Па, час від запалення до детонації суміші становив 0,15 мс. При амплітуді $4,9 \cdot 10^6$ Па запалення та детонація змісті виникають одночасно у момент входу фронту УПХ у ГПС.

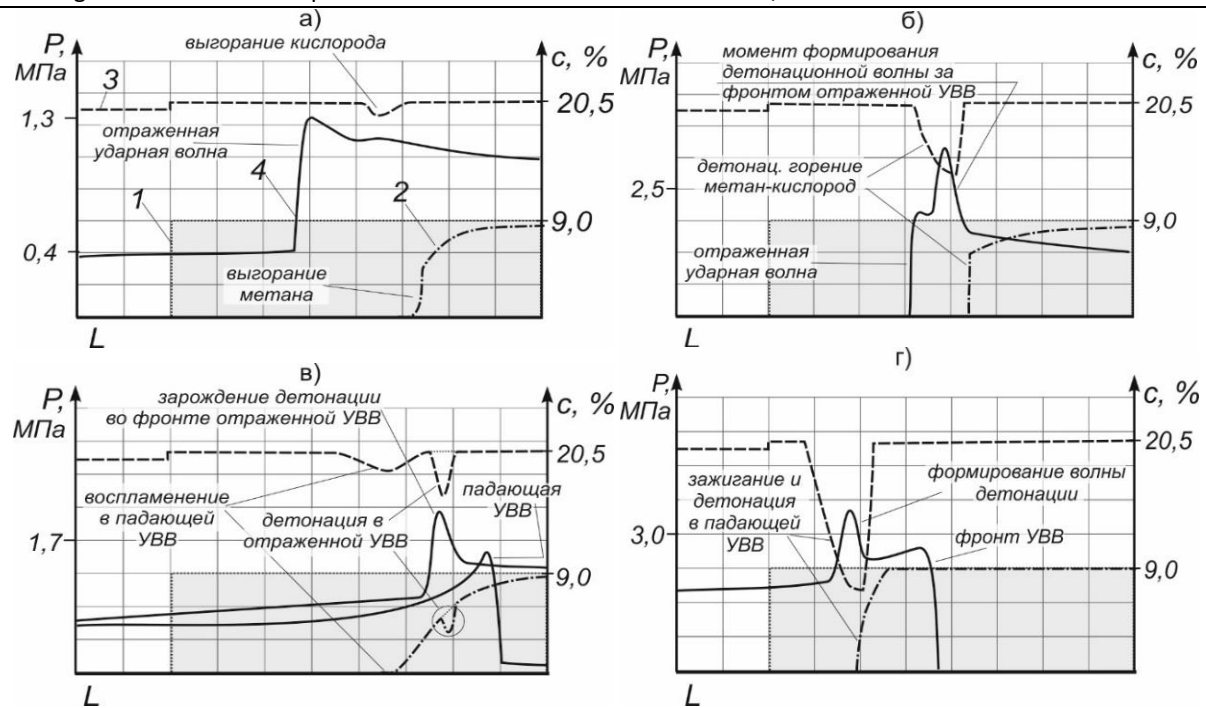


Рис. 3. Профілі тисків і концентрацій газів при різних ефектах ініціювання локальних скупчень метану ударною повітряною хвилею а) спалах у відбитій хвилі; б) займання та детонація у відбитій хвилі, в) займання в падаючій і детонація у відбитій хвилі; г) займання та детонація в падаючій хвилі; 1- профіль початкової концентрації метану в локальному скупченні, 2 - концентрація метану при проходженні УПВ, 3 - концентрація кисню, 4 - тиск у відбитій хвилі

Паралельно з експериментами для стехіометричної суміші (з невеликим збіднінням) виконувалися розрахунки для знижених концентрацій метану. Зменшення концентрації до 6,2% незначно збільшує межі надлишкових тисків в ударній хвилі, при яких настає той чи інший ефект запалення та детонації. В подальшому величина тисків для ініціювання детонації зростає. Від нижньої концентраційної межі горіння і до 3,9% відбувається горіння метану за фронтом ПУХ, при амплітуді не менше $2,7 \cdot 10^6$ Па, без утворення ударних хвиль. Подальше зниження вмісту метану за умовами можливих амплітуд ПУХ у гірничих виробках ініціювання горіння не відбувається.

Результати моделювання мають хорошу кореляцію з експериментальними даними з визначення мінімальних мас запобіжних ВР, що займають метаноповітряне середовище (МПС), проведеними в дослідному штреку [37]. У результатах наведено значення критичних амплітуд у повітряних ударних звихах, що падають, генерованих зарядами ВР з урахуванням вмісту інгібіторів горіння в продуктах детонації. Ці значення перевищують величини, що

отримані у чисельних експериментах, а екстраполяція в нульову сторону вмісту солей-інгібіторів дозволяє вийти на критичні тиски, які визначені в чисельному розрахунку для запалення та ініціювання ГПС у прямій хвилі. Це дозволяє стверджувати, що критичні параметри ударних хвиль, отримані в нашій роботі для різних ефектів ініціювання, є достовірними та порівнянними між собою.

Як видно з результатів чисельних експериментів ударні повітряні хвилі, що поширюються по гірничих виробках, становлять небезпеку з точки зору можливого займання локальних скупчень метану хоча і в невеликому діапазоні амплітуд (від $2,6 \cdot 10^6$ Па), що реалізуються в умовах гірничих виробок. Якщо на шляху розповсюдження ПУХ зустрічаються поверхні, що відбивають у вигляді захаращеного перерізу або різких поворотів, то діапазон амплітуди розширюється до $2,3 \cdot 10^6$ Па (табл.). Оскільки ПУХ з такими амплітудами, в умовах гірничих виробок затухають досить швидко, то ініціююча здатність УПХ зберігається поблизу дії джерел вибухів.

Закономірності ініціювання локальних скупчень метану ударною повітряною хвилею, що розповсюджується по гірничих виробках

Амплітуда у фронті ПУХ*, МПа	Падаюча ПУХ			Відображена ПУХ		
	Ініціувальний ефект	Час переходу горіння у детонацію	Місце ініціювання горіння	Ініціувальний ефект	Амплітуда відбитої хвилі у момент ініціювання МПС, МПа	Тиск 10 ⁶ Па МПС у місці ініціювання, МПа
< 1,1	—	—	—	—	—	—
1,1	—	—	—	спалах	1,3	0,4
1,4	—	—	—	займання у фронті та часткове вигорання метану	1,9	0,8
1,8	—	—	—	займання у фронті, перехід у детонацію за фронтом через 350 мкс	2,4	1,0
2,3	займання	—	за фронтом	детонація	4,6	1,0
2,6	займання, перехід у детонацію	1,26 мс	поблизу фронту	—	—	—
3,6	займання, перехід у детонацію	0,4 мс	поблизу фронту	—	—	—

* характерний параметр взаємодії ПУХ із МПС

З практичної точки зору необхідно знати на якій відстані від джерела вибуху (критичну відстань) і за яких умов може виникати ініціювання локальних ділянок загазування, а також яким чином вибух локальних скупчень метану впливає на процес дисипації енергії ПУХ. Перше питання можна вирішити з використанням стандартної методики розрахунку амплітуди тиску у фронті повітряної ударної хвилі або застосувати регресійні залежності (3, а) і (3, б). Друге питання пропонується вирішувати за таким алгоритмом. Якщо у процесі розрахунку встановлено можливість вибуху локального скупчення метану, необхідно розрахувати, за діючою методикою, величину тиску вибуху в цьому локальному скупченні метану. Якщо отримане значення перевищує надлишковий тиск в ударній хвилі, яка поширилася до протилежної межі скупчення, то подальший розрахунок продовжувати від цієї межі з новим значенням амплітуди ударної хвилі.

За результатами експериментів отримано функціональні залежності, за допомогою яких можна визначити відстані від джерела вибуху (L_k), при яких можливе ініціювання локальних скупчень метану. Ці відстані залежать від розмірів джерела та початкових тисків у ПУХ (P_n). Джерело вибуху є загазованою ділянкою гірничої виробки від точки займання до кордону МПС-повітря. Оскільки швидкість загасання ПУХ впливає не тільки довжина цієї ділянки, а й розмір поперечного перерізу виробки, то залежність було визначено з урахуванням відносної довжини джерела $L_2=L_2/d_n$, где L_2 – довжина джерела, d_n – наведений діаметр виробки.

Регресійні рівняння отримано шляхом обробки результатів чисельних експериментів методом найменших квадратів. Експерименти проведено за планом повного факторного експерименту. При розв'язанні рівнянь нелінійної регресії використовувалася лінеаризація методом логарифмування.

$$L_k = \frac{d_n}{(13,04P_n^{-0,1} + 1,3L^{-0,1} - 11,7)^9}; \quad (3,a)$$

$$L'_k = \frac{d_n}{(8,82P_n^{-0,3} + 1,37L^{-0,3} - 6,1)^3}, \quad (3,b)$$

де L_k – відстань від джерела вибуху на якому можливе ініціювання локальних скупчень метану в прямій хвилі, м; L'_k – відстань на якій можливе ініціювання локальних скупчень метану у відбитій хвилі, розраховується у разі розташування локального скупчення метану у захарашених ділянках або на різних поворотах виробки, м; d_n – наведений діаметр виробки, м.

Висновки. Отримані результати чисельних експериментів з ініціювання метаноповітряної суміші ударною повітряною хвилею, в умовах гірничих виробок вугільних шахт, добре узгоджуються з відомими експериментальними даними.

Отримані закономірності займання і детонації локальних скупчень метану в падаючих і відбитих повітряних ударних хвилях дозволяють суттєво підвищити ефективність методик визначення безпечних відстаней під час виконання аварійних робіт і знизити ризики нещасних випадків для підземних робітників.

Список літератури:

1. 1, Sobolev V.V., Ustimenko E.B., Nalisko N.N., Kovalenko I.L. The macrokinetics parameters of the hydrocarbons combustion in the numerical calculation of accidental explosions in mines.. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2018, (1), 89-98.
2. Алексеев А.Д. Физика угля и горных процес сов. Київ: Наукова думка, 2010.
3. Соболев В.В., Колоколов О.В. О генезисе каменного угля. Горный информаци-онно-аналитический бюллетень. М.: МГГА, 1999, (3), 107-110.
4. Sobolev V., Molchanov A., Rudakov D. Physicochemical transformations in coals induced by electric fields. LAP Lambert Academic Publishing, 2019, 64 p.
5. Soboliev, V., Rudakov, D., Stefanovych L.I., Jach K. Physical and mathematical modelling othe conditions of coal and gas outbursts. *Mining of Mineral Deposits*, 2017, 11 (3), 40-49. <https://doi.org/10.15407/mining11.03.040>.
6. Rudakov D., Sobolev V. A Mathematical Model of Gas Flow during Coal Outburst Initiation. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019, 29, (5), 791-796; <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.02.002>.
7. Frolkov, G.D., Fandeev, M.I., Malova, G.V., Frolkov, A.G., Frantsuzov, S.A., Sobolev, V.V. Effect of natural mechanical activation on coal blow-up hazards. *Khimiya Tverdogo Topliva*, 1997, (5), 22-33.
8. Pivnyak, G.G., Sobolev, V.V., Filippov, A.O. Phase transformations in bituminous coals under the influence of weak electric and magnetic fields. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2012, (5), 43-49. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000023>
9. Molchanov, O., Rudakov, D., Soboliev, V., Kamchatnyi, O. Destabilization of the hard coal microstructure by a weak electric field. *E3S Web of Conferences*, 2018, 60, 00023. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000023>.
10. Soboliev V., Bilan N., Filippov A., Baskevich A. (2011). Electric stimulation of cemical reactions in coal. *Technical and Geoinfrmrational systems in Mining*, 2011, 125-130. <https://doi.org/10.1201/b11586-11>.
11. Соболев В.В., Билан Н.В., Дараган Т.В., Стефанович Л.И. Электростимулированная активация перехода органической массы угля в газ. Перспективи розвитку будівельних технологій Д.: НТУ «Дніпровська політехніка», 2019, 187 с. (70-74).
12. Burchak A.B., Sobolev V.V., Bezruchko K.A., Kovrov O.S., Kurliak A.V., Yakh K.E. Impact of weak electromagnetic fields on the properties of coal substance. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2022, (5), 46-53. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/046>.
13. Soboliev V., Bilan N., Samovik D. (2013). Magnetic stimulation of transformations in coal. *Mining of Mineral Deposits*, 2013, 221-225. <https://doi.org/10.1201/b16354-40>.
14. Sobolev V.V., Holub N.V., Tereshkova O.A. Magnetic stimulation of chemical reactions in coal. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2023, (4), 48-55. <https://doi.org/10.33271/nvngu/20234/048>
15. Sobolev V.V., Rudakov D.V., Molchanov O.M., Stefanovych L.I., Kirillov A.K. (2019) Physical and chemical transformations in gas coal samples influenced by the weak magnetic field. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2019, (6), 52-58. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/8>.
16. Bazaluk, O., Sobolev, V., Molchanov, O., Burchak, O., Bezruchko, K., Holub, N., Tereshkova, O., Kulivar, V., Fedorenko, E., & Lozynskyi, V. Changes in the stability of coal microstructure under the influence of weak electromagnetic fields. *Scientific Reports*, 2024, 14, 1304. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51575-w>
17. Молчанов А.Н., Стефанович Л.И., Кириллов А.К., Какмчатный А.А. Соболев В.В., Рудаков Д.В., Билан Н.В. Физико-химические превращения в механо- и электроактивированных каменных углях. Физико-технические проблемы горного производства. Днепр: ИФГП НАНУ, 2018, (20), 32-54.
18. Брюханов А.М., Мнухин А.Г., Бусыгин К.К. Анализ обстоятельств взрывов метана на шахтах и мероприятия по их предотвращению. *Уголь Украины*, 2003, (4), 37–40.
19. Левченко О.Г., Володченко Н.В. Аналіз методів і методик оцінки уражаючих факторів повітряної вибухової хвилі. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*, 2012, Вип. 22., 211–216.
20. 20 Васенин И.М., Шрагер Э.Р., Крайнов А.Ю. и др. Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты /. *Компьютерные исследования и моделирование*, 2011, 3, (2), 155–163.
21. Чебенко В.М. Пилогазопридушення при підричних роботах // Проблеми охорони праці в Україні: збір. наук. праць. К.: ДУ «ННДІПБОП», 2003, (7), 33–38.
22. Гурин А. А., Назаренко В. Н. Распространение импульса ударных воздушных волн при взрывах в подземных выработках. *Горный журнал «Известия вузов»*, 1973, (12), 54-58.
23. Гурин А. А., Фридман А. Г. О границах опасных зон при взрывных работах в подземных выработках. *Безопасность труда в промьнтленности*, 1976, (4), 45-47.
24. Соболев В.В., Терещук Р.М., Григорьев О.С. Технологія та безпека виконання підричних робіт. Дніпро: НГУ, 2017, 314 с.
25. Поняев С.А., Апевалов И.В., Лебедев А.С. и др. Моделирование процессов задержки поджига смеси метан-воздух ударной волной / // Труды военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, 2013, вып. 641, 61–68.
26. Huang J., Hill P.G., Bushe W.K. and Munshi S.R. Shock-tube study of methane ignition under engine-relevant conditions: experiments and modeling. *Combustion and Flame*, 2004, 136, (1–2), 25–42.
27. Petersen E.L., Davidson D.F., Hanson R.K. Kinetics modeling of shock-induced ignition in low-

dilution CH_4/O_2 mixtures at high pressures and intermediate temperatures. *Combustion and Flame*, 1999, 117, (1–2), 272–290.

28. Зельдович Я. Б., Компанец А. С. Теория детонации. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955, 268 с.

29. Щёлкин К.И., Трошин Я. К. Газодинамика горения. М: Из-во АН СССР, 1963, 254с.

30. Дрёмин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970, 164 с.

31. 8. Васильев А.А. Детонационные свойства предельных углеводородов. *Физика горения и взрыва*, 2009, 45, (6), 82-90.

32. Хмель Т. А., Лаврук С. А., Структура и распространение волн Чепмена-Жуге в водород-кислородной смеси с частицами алюминия. *Челяб. физ.-матем. журн.*, 2023, **8** (4), 580–593.

33. Нетлетон М. Детонация в газах. Пер. с англ.; под ред. Л.Г. Гвоздевой. М.: Мир, 1989, 280с.

34. Чернай А.В., Налисько Н.Н., Деревянко А.С. Кинетика окисления метана кислородом и его роль в формировании взрывной воздушной волны в шахтных выработках // *Науковий вісник НГУ*, 2016, (1), 63–69.

35. Голуб В.В., Баланов Д.И., Володин В.В., Головастов С.В. Влияние энергии инициирования и геометрии канала на переход горения в детонацию. *Горение и плазмохимия*, 2007, 5, (1–2), 95–108.

36. Агафонов Г.Л., Тереза А.М. Воспламенение пропана в ударных волнах. *Химическая физика*, 2015, 34, (2), 49–60.

37. Гельфанд Б.Е., Попов О.Е., Чайванов Б.Б. Водород. Параметры горения и взрыва, М.: Физматлит, 2008, 288 с.

38. Калякин С.А. Определение критических параметров ударных волн при взрыве заряда ВВ, вызывающих воспламенение метановоздушной смеси. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Гірничо-геологічна»*, 2012, 16, 133–139.