

УДК: 622.817+622.822.22

Зав'ялова О.Л., канд. техн. наук, доцент,
Костенко В.К., д-р техн. наук, професор
(ДонНТУ МОН України)

МЕХАНІЗМ РОЗВИТКУ ВИБУХІВ ВУГІЛЬНОГО ПИЛУ В МЕРЕЖІ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК ШАХТИ

Завьялова Е.Л., канд. техн. наук, доцент,
Костенко В.К., д-р техн. наук, професор
(ДонНТУ МОН Украины)

МЕХАНИЗМ РАЗВИТИЯ ВЗРЫВОВ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В СЕТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ШАХТЫ

Zavyalova O.L., Ph. D. (Tech.), Associate Professor,
Kostenko V.K., D. Sc. (Tech.), Professor
(Donetsk National Technical University MES of Ukraine)

MECHANISM OF DEVELOPMENT EXPLOSIONS OF COAL DUST IN THE NETWORK OF MINE WORKINGS

Анотація. Мета роботи полягає в розкритті механізму формування умов розповсюдження вибуху по виробці задля вибору та обґрунтуванню ефективних мір по профілактиці надзвичайних ситуацій.

Проаналізовано теорії, які розглядають умови і механізм розвитку вибуху аерозавісів в мережі гірничих виробок. З опублікованих результатів досліджень встановлено, що процес вибуху в експериментальних штольнях носить пульсуючий характер. Це призводить до виникнення хвиль як у повітрі виробок (повітряна ударна хвиля), так в оточуючому гірничому масиві (сейсмічна складова хвильової енергії).

Встановлено, що швидкість розповсюдження хвиль в гірських породах і повітрі відрізняється в кілька раз, тому сейсмічні хвилі випереджають повітряні. Результати проведених досліджень дозволяють розкрити особливість механізму нерівномірного розповсюдження вибухів по гірничих виробках шляхом переводу відкладень пилу на підшві і стінках виробок в рухомий и завислий стан з утворенням вибухонебезпечних концентрацій. Це дасть можливість вибору та обґрунтування ефективних мір по попередженню виникнення вибухонебезпечних ситуацій в мережі гірничих виробок шахти.

Ключові слова: вугільний пил, вибухонебезпечна концентрація, вибухи пилоповітряних сумішей, розповсюдження вибухових хвиль.

Проблема і її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Статистичні дані свідчать про те, що протягом всієї історії видобутку вугілля вибухи аерозолів в шахтах приводили до найчисленнішим катастрофам, що обчислюються десятками і сотнями жертв. На початку ХХІ ст. актуальність проблеми не зменшилася, про це свідчать триваючі вибухи пилогазових сумішей на шахтах України, Росії, Китаю, Казахстану і майже всіх інших вугледобувних країнах [4]. Вибухи вугільного пилу відбуваються також на збагачувальних фабриках транспортних терміналах і теплоелектростанціях, наприклад на Вуглегірській ТЕС в Донбасі в 2013р.

Розслідування обставин і причин вибухів в основному свідчить про нормальне провітрювання виробок, задовільний стан їх вибухозахисту, малої потужності потенційних джерел займання аерозолів, виконанні інших вимог техніки безпеки. Як правило в мережі виробок або приміщень не було в повітрі вибухонебезпечних концентрацій пилу. Проте аварії такого роду продовжуються, наприклад вибухи на шахті ім. О.Ф. Засядька і деякі інші. Причиною цього є недостатня вивченість механізму ініціації і поширення в підземних гірничих виробках вибухів суміші вугільного пилу з повітрям або з газоповітряною сумішшю (гібридні аерозавіси).

Результати аналізу останніх досліджень і публікацій. Протягом майже двох століть в різних країнах досліджують вибуховість вуглегазових сумішей в лабораторіях, на стендах і в дослідних виробках. На основі результатів досліджень, виконаних в останні десятиліття вітчизняними і зарубіжними вченими, склалися домінуючі уявлення про вибухи, що відбуваються в підземних виробках вугільних шахт [2 - 4].

Ризик виникнення вибуху аерозавіси в конкретній виробці, а також його поширення, залежать, зокрема, від таких природних факторів:

- маси вугільного пилу, що осів у виробці;
- дисперсності пилових частинок;
- об'ємної частки летких речовин у вугіллі.

Джерела виникнення аерозавіси в гірських виробках вугільних шахт - робота прохідницьких і виїмкових механізмів, бурових установок; пересування кріплень; руйнування вугілля при вибухових роботах; транспортування гірської маси, особливо її перевантаження; переробка вугілля, зокрема сортування і дроблення. Дані ВостНДІ показують, що при роботі очисних комбайнів концентрація пилу в повітрі привибійного простору досягає $50...70 \text{ г}\cdot\text{м}^{-3}$, прохідницьких $20...25 \text{ г}\cdot\text{м}^{-3}$.

Відомо, що не менше 2...3% видобутку вугілля перетворюється в пил. Вентиляційним струменем пил переноситься на значні відстані. При цьому частина дрібних пилинок, що проходять через сито з розміром осередку 75 мкм , осідає в верхній частині вироблення, а решта - в нижній. Під час вибуху найбільшу небезпеку внаслідок легкості звихрювання і тонкої дисперсності представляють прикрівельне відкладення пилу. Мінімальна концентрація пилу, при якій можливе виникнення і розвиток вибуху в гірських виробках, дорівнює $50 \text{ г}\cdot\text{м}^{-3}$, а максимальна - близько $1700 \text{ г}\cdot\text{м}^{-3}$. Верхні значення концентрації виникають внаслідок переходу у зважений стан відкладень на стінках і підшві виробок. Отримані при лабораторних та полігонних випробуваннях екстремальні значення верхніх та нижніх концентраційних меж вибуховості вугільного пилу рівні 10 і $2500 \text{ г}\cdot\text{м}^{-3}$ відповідно. Найбільша енергія виділяється при концентрації в повітрі $300 \text{ г}\cdot\text{м}^{-3}$ вугільного пилу.

У вибухах беруть участь вугільні частинки розміром менше 1000 мкм . Зі збільшенням дисперсності до певної межі вибуховість вугільного пилу зростає. Найбільш небезпечною вчені МакНДІ вважають фракцію $75...100 \text{ мкм}$, польські дослідники 45 мкм . Окремі дані свідчать про найбільшу вибуховість фракції

10...60 мкм. Очевидно, що ці результати багато в чому визначені різницею фізико-хімічних властивостей вугілля і неоднаковими умовами проведення випробувань.

Спрощена схема розвитку вибуху виглядає наступним чином. По виробці рухається хвиля високого тиску повітря, так званий ударний фронт, за неї переміщується вогневий фронт в якому відбуваються процеси термодеструкції та окислення вугільної речовини. Позаду вогневого фронту відбувається інтенсивне охолодження продуктів вибуху та різке зменшення тиску повітря. Виміри швидкості переміщення вибуху по дослідним металевим штольням та виробкам у міцних породах показали що її максимальна величина сягає $1800...1968 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ [1].

Механізм вибуху вугільного пилу в тупиковій частині гірничої виробки численними дослідниками прийнято розглядати наступним чином:

- виникнення джерела займання, первинного вибуху і формування фронту хвилі тиску;
- утворення пилової хмари і її займання;
- розвиток і переміщення зони горіння;
- переміщення ударної хвилі, що піднімає нові хмари пилу з подальшим їх займанням.

На жаль авторам не вдалось знайти джерела в яких розглянуто механізм утворення пилової хмари в ударному фронті де відбувається миттєве скачкоподібне підвищення тиску, що може призводити до загущення відкладень пилу, а не звірювання.

Вибухи пилоповітряних сумішей відбуваються в газовій фазі за рахунок газифікації пилових частинок під дією інфрачервоних променів. Нагрівання вуглеповітряних аерозолів призводить до піролізу дисперсної фази (вугільної речовини), що супроводжується його газифікацією з виділенням горючих газових компонентів (летких речовин) [3].

Вибух пилоповітряних сумішей розвивається по виробках наступним чином:

- нагрів аеровзавису вугільного пилу;
- піроліз вугільної речовини, що супроводжується її газифікацією з виділенням горючих газових компонентів (летких речовин);
- утворення вибухової суміші летких речовин з повітрям і її займання;
- горіння твердого залишку вугільного пилу.

Аналізуючи відому інформацію що до механізму розвитку вибухів по мережі гірничих виробок шахти викликає питання яким чином ударна хвиля підвищеного тиску що опереджає вогняний фронт сприяє формуванню горючої повітряно-пилової суміші. Підвищений тиск навпаки призводить до згущення середовища, запресовування дисперсної речовини в щілини та кутові простори.

Вибухи вугільного пилу (так само, як вибухи газів і іншого пилу) належать до теплових. Вони були описані теоріями [Sapko V.J., Watson R.W., 1985] і [Frank Kamenetzki, 1947]. Опис явищ згорання одиночних частинок можна знайти в публікаціях [Vanpee, M., 1964] і Пруста [Poradnik gornika, t. V, 1976]. У

моделі Джонес [7] фронт полум'я трактується як площина уривчастості, що переміщається із заданим прискоренням. У моделі [Arginstall G., 1961] застосовано розроблену Шапманом - Йоугетом теорію вибухів суміші горючих газів з повітрям в тунелі постійного перетину. Перед фронтом полум'я пил створює однорідну з повітрям суміш постійної концентрації в площині поперечного перерізу штольні. Модель Хі - Перлі [Shi D.N.H., Parlee H.E., 1973] описує однорозмірний процес дефлагації (вигорання), ініційований в закритому кінці циліндричної штольні і який розходить в напрямку до її протилежного, відкритого, кінця. [Kanasa E., Parlee H.E., 1980] и [Korobeynikov V.P., 1980] піддали детальному аналізу поширення вибуху пилоповітряної суміші, розглядаючи багато явищ, специфічних для цього процесу, таких як відображення (відносна сублимація або плавка) частинок пилу, вплив частинок на хвилю тиску, виділення летких речовин, згорання частинок пилу і летких речовин, течія продуктів згорання або передача тепла через провідність. Піклес [Opis patentovy 1.533.811 REN 18.10.1973] вибух пилоповітряної суміші описав способом, схожим на модель Джонес, але відніс його до дещо іншої геометрії: поширенню полум'я в штольні з обома відкритими кінцями. На підставі аналізу результатів досліджень Річмонда і ін. [Rice G.S., 1911, 1922]. Піклес прийшов до висновку, що прискорення фронту полум'я не є результатом впливу на закритий кінець штольні, але відбувається, можливо, завдяки інерції продуктів згорання, що знаходяться за фронтом. [Clark D.P., Smoot L.D., 1985] описують модель поширення і турбулентного згорання пилоповітряної суміші на основі мікроскопічних рівнянь збереження маси, витрати і енергії. Основою сучасної моделі вибуху пилу Ван Вінгердена [8] є спеціальна програма FLACS (Flame Acceleration Simulator). У цій програмі безперервний простір поділений на осередки «простір-час». Простір ділиться на невеликі обсяги, в яких властивості середовища (такі, як швидкість, щільність, тиск) є в своїй основі постійними в певний період часу. Роботи над моделлю вибуху, заснованої на швидкості виділення тепла, проводив на дослідній шахті «Барбара» З. Дидух [6].

Аналіз наведених прикладів вказує на відсутність інформації яким шляхом утворюється необхідна для розвитку вибуху по мережі гірничих виробок концентрація пилу в суміші його з повітрям. У всіх механізмах враховується що вибухова концентрація існує *apriori*. Але це не дає можливості розкриття механізму формування умов розповсюдження вибуху по виробці і, відповідно, приймати ефективні міри по профілактиці надзвичайних ситуацій.

Постановка завдання досліджень. Наукова задача полягає в розкритті механізму формування умов розповсюдження вибуху по виробці задля вибору та обґрунтування ефективних мір по профілактиці надзвичайних ситуацій.

Результати досліджень. При вибуху заряду вибухової речовини виникає значний тиск газоподібних продуктів. У результаті утворюється зона сейсмічних деформацій, що поширюється в геологічному просторі, параметри якого цілком залежать від тиску, що створюється вибухом, і характеристик оточуючих середовищ. Коливання, що поширюються в геологічному

середовищі при техногенних землетрусах, мають назву сейсмічні технохвилі. Вони є складною комбінацією різних типів механічних хвиль, то відрізняються особливостями поширення і характером сейсмічної дії. Основними їх різновидами є: об'ємні поперечні, об'ємні подовжні, поверхневі [Азаркевич А.Е., 1984] (використана аналогія з природними землетрусами).

Об'ємні хвилі поширюються всередині товщі геологічного середовища. Більшу швидкість поширення мають подовжні (P) хвилі, які ще називають первинними, оскільки вони першими досягають об'єкту. Ці хвилі характеризуються змінним стисненням і розтяганням ділянок середовища в напрямку поширення хвилі. P -хвилі здатні проходити як через тверді породи (наприклад, гранітні масиви), так і через рідини.

Поперечні (S) хвилі мають меншу швидкість поширення в порівнянні з P -хвилями, тому їх називають вторинними. У S -хвилях відбувається зсування часток речовини в площині, перпендикулярній напрямку руху хвилі. Ці хвилі у водному середовищі не існують.

Швидкості поширення об'ємних (P і S) хвиль залежать від щільності ρ і пружних властивостей геологічного середовища, через яке хвиля проходить. Пружні властивості характеризуються коефіцієнтами пропорційності між напруженнями і деформаціями, які одержали назви модулів. Кожному виду деформації відповідають власні модулі: модуль лінійного розтягання (модуль Юнга, E), модуль об'ємного (всебічного) стиску k , модуль зміщення μ , постійні Ламе (I, G). Значення швидкостей подовжніх V_p і поперечних V_s хвиль визначаються в такий спосіб [Азаркевич А.Е., 1984]:

$$V_p = \sqrt{\left(k + \frac{4}{3}\mu\right) / \rho}, \quad (1)$$

$$V_s = \sqrt{\mu / \rho} \quad (2)$$

Зокрема, для граніту при $k = 2,7 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}$ і $\mu = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}$ маємо $V_p = 5,5 \cdot 10^3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $V_s = 3 \cdot 10^3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Максимальні ушкодження споруджень і конструкцій викликають S -хвилі [5]. Поширення поверхневих хвиль обмежено зоною, розташованою поблизу земної поверхні. Найбільші коливання відбуваються на самій поверхні, а з глибиною амплітуда коливань швидко зменшується. Розрізняють два типи таких хвиль: хвилі Лява (L) і хвилі Релея (R). Хвилі Лява за своєю природою нагадують поперечні хвилі без складової коливань у вертикальній площині.

Хвилі Релея характеризуються коливаннями як у горизонтальному, так і у вертикальному напрямках у площині, перпендикулярній напрямку їх поширення. Частки геологічного середовища під дією цих хвиль здійснюють еліпсоїдний рух [Азаркевич А.Е., 1984].

Об'ємні хвилі (P і S) при розповсюдженні в геологічному середовищі відбиваються і заломлюються на межі розподілу порід, крім того, утворюються

хвилі іншого типу. У твердих (скельних) породах пружні хвилі поширюються з меншими втратами і передаються на відносно великі відстані, ніж у незв'язаних породах (пісок, гравій і т.п.), де вони швидко втрачають свою енергію внаслідок загасання. При сейсмічних коливаннях у піщаних розріджених шарах енергія поперечних хвиль зменшується і, в остаточному підсумку, проходять тільки подовжні хвилі (під розрідженням ґрунту ми маємо на увазі процес, що відбувається в пухкому ґрунтовому шарі чи в лінзах піску, в результаті якого при землетрусі породи поводяться не як волога тверда маса, а як щільна рідина).

У таблиці 1 наведені швидкості поширення поздовжніх і поперечних хвиль в різних породах і середовищах.

Швидкість поширення хвиль в великій мірі залежить від ступеня ущільнення порід, швидко зростає модуль Юнга, внаслідок чого відбувається збільшення швидкості.

У пухких утвореннях швидкість сильно залежить від ступеня насиченості породи вологою. Як правило, швидкість у зволжених пухких породах більше, ніж в сухих. У злитих, вельми ущільнених породах величина швидкості практично не залежить від ступеня зволоження.

Таблиця 1 - Швидкості хвиль в геологічних середовищах [Ляхов Г.М., 1962]

Порода	$V_p, \text{м/с}$	$V_s, \text{м/с}$
Повітря (в залежності від температури, тиску і вітру)	310-360	-
Глина	1200-2500	100-750
Вода (в залежності від температури і солоності)	1430-1590	-
Пісковик пухкий	1500-2500	600-1000
Пісковик щільний	1800-4000	700-2500
Крейда	1800-3500	700-1800
Сланці глинуваті	2700-4800	1300-3000
Вапняк, доломіт щільний	2500-6000	1200-3500
Мергель	2000-3500	1100-1800

Оскільки ступінь ущільнення порід у великій мірі залежить від випробовуваного ними навантаження, то природно, що одні й ті ж породи, що залягають на різній глибині, характеризуються різною швидкістю поширення хвиль, причому тим більшою, чим більше глибина залягання.

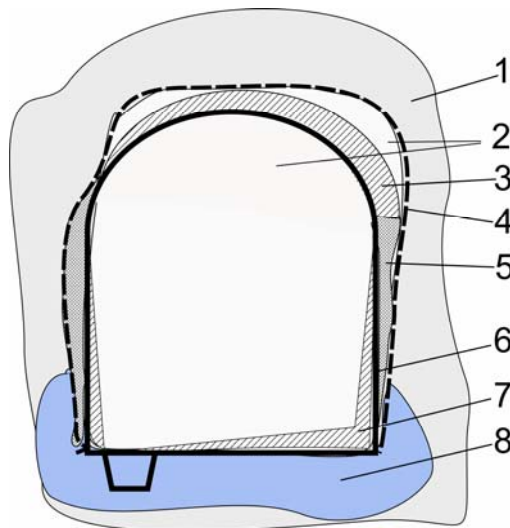
Швидкості поширення поперечних хвиль V_s змінюються в ще більшому відносному діапазоні і також залежать від перерахованих вище факторів. У більшості гірських порід відношення $n = V_p/V_s$ становить приблизно 1,7-2. У глинистих водонасичених породах і пливунях це відношення може значно

зростати, досягаючи значень 7 ... 10, внаслідок різкого зменшення швидкості поперечних хвиль в породах.

Декременти поглинання поздовжніх θ_p і поперечних θ_s хвиль мають однакові по порядку величин значення. У міцних, консолідованих породах, декремент поглинання має величину менше 0,01; в поверхневих частинах розрізу він виростає до 0,1 і більше.

Вибух метаноповітряної суміші або вугільного пилу в гірничих виробках призводить до розповсюдження хвиль в повітрі, яке заповнює порожнечі в надрах, а також в гірничому масиві. Шахтне повітря відрізняється підвищеною, внаслідок гідростатичного натиску, густиною, а також значною, більш 80%, вологістю. Це визначає підвищену, порівняно з поверхнею, швидкість розповсюдження ударних хвиль в порожнечах, а саме близько $V \sim 360 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ (див табл.1).

Оточуючий виробки гірничий масив внаслідок техногенного впливу має складну структуру (рис.1).



1- область техногенної тріщинуватості порід; 2 – порожнечі виробки та зводу; 3 – відкладення вугільного пилу в порожнечі зводу; 4 – породний контур в проходці; 5 – забутований закріпний простір; 6 – кріп виробки; 7 – відкладення пилу на стінках та підшві виробки; 8 – область обводнення порід.

Рисунок 1 - Схема гірничої виробки і характерних областей в оточуючому породному просторі

Під дією буровибухових робіт та гірничого тиску породний масив порушений мережею тріщин, що має різні параметри, а саме довжину, розкриття, орієнтацію, частоту та ін. Швидкість хвиль в такому середовищі вочевидь близька до показників розрихленого пісковику $V_p \sim 1500...2000$, $V_s \sim 600...1000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ (див табл.1). Наявність структурних послаблень обумовлює зменшення швидкості вибухових хвиль, а також можливість їх накладення та інтерференції. Така ситуація призводить до появи нових видів хвиль різної направленості, орієнтації та амплітуди. Ці хвилі генерують коливання породних та конструктивних поверхонь що передається контактуючому пилу та повітрю.

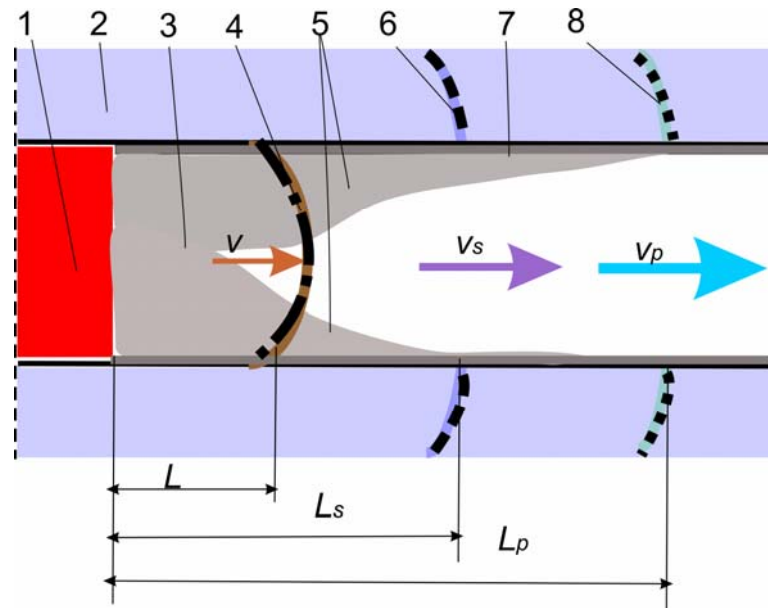
Це обумовлює виведення відкладень пилу зі стабільного до зрушеного та навіть зваженого у повітрі стану. Слід підкреслити що таке відбувається раніше ніж наближається повітряна ударна хвиля. Як звичай, так званий "в проходці", контур виробки суттєво більший ніж контур кріплення, це обумовлено технологією проведення виробок. Тому простір між породним масивом та кріпленням заповнюють подрібненою породою. У зводі неможливо якісно виконувати заповнення, тому залишаються порожнини у вигляді куполів. Купола можуть мати значні, до одного m^3 та більше, розміри, вони мають аеродинамічний зв'язок з порожниною вироблення тому в них накопичується значний об'єм пилу. Швидкість ударної хвилі в купольній порожнечі маже така ж як у повітрі в виробці.

Основна частина пилу накопичується на підшві виробки та на стінках, незначна кількість збирається на елементах кріплення, в щілинах затяжки тощо. Також значна частина пилу може знаходитись в кусковатому забутованому середовищі, яке значно ущільнюється під взаємодією гірничого тиску та відперу кріплення. Дія сейсмічних хвиль призводить до мікроколиваний кусків та переводу пилу в завислий стан до наближення ударного фронту у повітрі.

Висока вологість більшості підготовчих виробок є наслідком недосконалої системи водовідведення, що відбувається самотечією по канавках та підшві виробок. Це призводить до насичення гравітаційною та капілярною водою тріщинуватого середовища у підшві виробки. В такій обводненої області умови для розповсюдження вибухових хвиль благоприємні, а швидкість максимальна. В Україні майже 70% пластів, а відповідно і підготовчих виробок, залягають в аргілітах, решта в пісковиках, алевролітах та вапняках, тому швидкість сейсмічної складової ударної хвилі може становити $V_p \sim 1500 \dots 6000$, $V_s \sim 600 \dots 4000$ м/с (див табл.1). Тому ще до наближення повітряного фронту ударної хвилі накопичений пил під впливом сейсмічних хвиль переходить в рухоме та зависле становище.

Узагальнення вищесказаного показує, що найліпші умови для розповсюдження вибухових хвиль існують в обводнених породах що підстиляють виробку. В тріщинуватому середовищі зони непружних деформацій швидкість вибухових хвиль менша ніж у суцільних породах. Тим не менш показник перевищення швидкостей в породах над швидкістю у повітрі складає 2...5 та більше. Це вказує на то що пил, який знаходиться у стабільному стани на підшві, стінках, щілинах тощо, в першу чергу достає дії сейсмічної складової вибухових хвиль до підходу ударного фронту в повітрі виробки. Основні відкладення пилу знаходяться на підшві та стінках виробки, де рівень та швидкість сейсмічних хвиль найбільші, тому за рахунок значної амплітуди коливаний утворюються найбільші концентрації завислого пилу. Крім того, підпокрівельні та таки що знаходяться у зводах відкладення мають найактивніші тонкодисперсні фракції що також провокує утворення вибухонебезпечних сумішей під дією сейсмічних коливаний до підходу повітряної ударної хвилі.

Таким чином, ініціюючий вибух призводить до розповсюдження як сейсмічних хвиль у масиві так і утворенню ударного фронту у повітрі (рис.2). В різних середовищах швидкість розповсюдження коливань суттєво відрізняється.



1 – вогневий фронт вибуху; 2 – гірські породи в яких проведено виробку; 3 – область турбулентного перемішування пилу та повітря; 4 – фронт ударної хвилі в повітрі; 5 – область звихрювання пилу поперечної хвилею; 6 – фронт поперечної хвилі в гірському масиві; 7 – область струсу пилу з покрівлі та стінок виробки подовжньої хвилею; 8 – фронт подовжньої хвилі в гірничому масиві; V , V_s , V_p – вектори хвиль, відповідно, у повітрі, поперечної та подовжньої в гірському масиві, L , L_s , L_p – відстань на певний момент часу від вогневого фронту до, відповідно, фронтів хвиль у повітрі, поперечної та подовжньої.

Рисунок 2 - Схема механізму формування пилоповітряної суміші під час вибуху в гірничій виробці

Джерело первинного вибуху генерує два види сейсмічних хвиль що мають різні швидкості та характер впливу на приконтурні області виробки. Завдяки складній траєкторії та значної амплітуди коливань поверхні кріплення та породних обнажень, а це призводить до утворення пилових хмар у повітрі виробки раніше чим наближається ударний фронт. Різний характер хвиль, поява нових їх видів, наявність інтерференції та рефракції хвиль обумовлює нерівномірний по протяжності виробки характер хмароутворення. Така ситуація забезпечує нерівномірні умови до розвитку вибуху по виробці. Коли концентрація пилу знаходиться поблизу рівня стехіометрії то виділяється максимальна енергія і сила вибуху найбільша, якщо менша концентрація – сила вибуху знижується. Це пояснює пульсуючий характер вибухового процесу який реєструють при дослідах в експериментальних штольнях.

Висновки.

1. Вибухи вугільного пилу залишаються дотепер одним з найтяжчих видів підземних аварій. Вони відбуваються на шахтах, збагачувальних фабриках, транспортних терміналах і ТЕС різних країн. Розробка способів і засобів

профілактики та придушення вибухів вугільного пилу залишається актуальною проблемою для паливно-енергетичного комплексу держави.

2. Існує багато теорій які розглядають умови і механізм розвитку вибуху аерозавісів в мережі гірничих виробок. Але авторами статті не знайдено джерел в яких досліджено яким способом у виробках, де нема в повітрі вибухонебезпечної концентрації пилу, утворюються умови для розвитку вибуху.

3. З опублікованих результатів досліджень встановлено, що процес вибуху в експериментальних штольнях носить пульсуючий характер. Це призводить до виникнення хвиль як у повітрі виробок (повітряна ударна хвиля), так в оточуючому гірничому масиві (сейсмічна складова хвильової енергії). В твердому середовищі розповсюджуються два основних види хвиль, а саме продовжні та поперечні.

4. Умови розповсюдження сейсмічних хвиль суттєво відрізняються поблизу контуру виробки. Наявність порожнин (тріщини, зводів, геологічних зрушень тощо) призводить до затухання та зміни напрямку і характеру коливань. Найбільш благоприємні умови виникають у підшві де породи заводнені і значно менше впливає тріщинуватість.

5. Швидкість розповсюдження хвиль в гірських породах і повітрі відрізняється в кілька раз, тому сейсмічні хвилі випереджають повітряні. За рахунок цього обнаження порід та кріплення здійснюють коливання складної траєкторії і накопиченій на підшві, стінках і кріпленні пил переходить зі стабільного стану в рухомий та частково в завислий до підходу повітряної ударної хвилі.

6. Піднятий у повітря та такий що знаходиться в рухомому стані вугільний пил утворює концентрацію, необхідну для загорання під дією інфрачервоних променів, а також високого тиску в ударному фронті. Імпульсний характер вибухового процесу провокує неперервне генерування повітряних та сейсмічних хвиль, що сприяє подальшому переміщенню вогневого фронту по мережі гірничих виробок.

7. Результати проведених досліджень дозволяють розкрити особливість механізму нерівномірного розповсюдження вибухів по гірничих виробках шляхом переводу відкладень пилу на підшві і стінках виробок в рухомий и завислий, з утворенням вибухонебезпечних концентрацій, стан.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лебецки, К.А. Пылевая взрывоопасность горного производства / К.А. Лебецки, С.Б. Романченко. – М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2012. – 464 с.
2. Нецепляев, М.И. Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах / М.И. Нецепляев, А.И. Любимова, П.М. Петрухин. – М.: Недра, 1992. – 298 с.
3. Романченко, С.Б. Пылевая динамика в угольных шахтах / С.Б.Романченко, Ю.Ф.Руденко, В.Н.Костеренко. – М.: Киммерийский центр, 2011. – 256 с.
4. Шевцов, Н.Р. Взрывозащита горных выработок: учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Донецк: Норд-пресс, 2002. – 280 с.
5. Шмандий, В. М. Теоретические основы управления техногенной безопасностью урбосистемы при антропогенных землетрясениях / Проблеми охорони навколишнього середовища та техногенної безпеки: зб. наук. праць. – Харків: УкрНДІЕП, 2001. – Вип.25. – С. 40-50.

6. Dyduch Z. *Doswiadczalny model przenoszenia wybuchu pyłu węglowego w wyrobiskach gorniczych*. Katowice, GIG, 1994 (praca doktorska).
7. International Union of Pure and Applied Chemistry Division IUPAC (1990): Glossary of atmospheric chemistry terms. Commission of Atmospheric Chemistry / Pure and Applied Chemistry - Vol. 62 (11) - pp. 2167—2119
8. Tor A., Jakubow A. (2002): Wybuch pyłu węglowego w Kopalni Jas-Mos w dniu 06.02.2002 — badania i ustalenia komisji.

REFERENCES

1. Lebetzki K.A. and Romanchenko S.B. (2012), *Pylevaya vzryvoopasnost gornogo proizvodstva* [Dust explosiveness of mining production], Publishing house "Mining" LLC "Cimmeria Center", Moscow, RU.
2. Netseplyayev, M.I., Lyubimova, A.I. and Petrukhin, P.M. (1992), *Borba so vzryvami ugolnoy pyli v shakhtakh*, [Combating coal dust explosions in mines], Nedra, Moscow, RU.
3. Romanchenko, S.B., Rudenko, YU.F. and Kosterenko, V.N. (2011), *Pylevaya dinamika v ugolnykh shakhtakh* [Dust dynamics in coal mines], Cimmeria Center, Moscow, RU.
4. Shevtsov, N.R., (2002), *Vzryvozashchita gornykh vyrabotok: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Explosion protection of mine workings: a textbook for high schools], Nord-press, Donetsk, UA.
5. Shmandiy, V. M., (2001), " Theoretical bases of management of man-caused safety of the urban system in anthropogenic earthquakes", *Problemi okhoroni navkolishnogo seredovishcha ta tekhnogennoi bezpeki*, Kharkov, Ukraine, no. 25, pp. 40-50.
6. Dyduch Z. (1994): *Doswiadczalny model przenoszenia wybuchu pyłu węglowego w wyrobiskach gorniczych*. Katowice, GIG, (praca doktorska).
7. International Union of Pure and Applied Chemistry Division IUPAC (1990): Glossary of atmospheric chemistry terms. Commission of Atmospheric Chemistry, *Pure and Applied Chemistry*, Vol. 62 (11), pp. 2167—2119
8. Tor A. and Jakubow A. (2002), *Wybuch pyłu węglowego w Kopalni Jas-Mos w dniu 06.02.2002 — badania i ustalenia komisji*.

Об авторах

Зав'ялова Олена Леонідівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри природоохоронної діяльності, Донецький національний технічний університет МОН України, м. Покровськ Донецької обл., Україна, elenazavialova@rambler.ru

Костенко Віктор Климентійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри природоохоронної діяльності, Донецький національний технічний університет МОН України, м. Покровськ Донецької обл., Україна, vk.kostenko@gmail.com

About the authors

Zavyalova Olena Leonidivna, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Nature and Environmental Activity, Donetsk National Technical University MES of Ukraine, Pokrovsk, Donetsk Region, Ukraine, elenazavialova@rambler.ru

Kostenko Viktor Klimentevich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Head of the Department of Nature and Environmental Activity, Donetsk National Technical University MES of Ukraine, Pokrovsk, Donetsk Region, Ukraine, vk.kostenko@gmail.com

Аннотация. Цель работы заключается в раскрытии механизма формирования условий распространения взрыва по выработке с целью выбора и обоснования эффективных мер по профилактике чрезвычайных ситуаций.

Проанализированы теории, рассматривающие условия и механизм развития взрыва аерозвесей в сети горных выработок. Из опубликованных результатов исследований установлено, что процесс взрыва в экспериментальных штольнях носит пульсирующий характер. Это приводит к возникновению волн как в воздухе выработок (воздушная ударная волна), так в окружающем горном массиве (сейсмическая составляющая волновой энергии).

Установлено, что скорость распространения волн в горных породах и воздухе отличается в несколько раз, поэтому сейсмические волны опережают воздушные. Результаты проведенных исследований позволяют раскрыть особенность механизма неравномерного распространения взрывов по горным выработкам путем перевода отложений пыли на

подошве и стенках выработок в подвижное и взвешенное состояние с образованием взрывоопасных концентраций. Это даст возможность выбора и обоснования эффективных мер по предупреждению возникновения взрывоопасных ситуаций в сети горных выработок шахты.

Ключевые слова: угольная пыль, взрывоопасная концентрация, взрывы пылевоздушной смеси, распространение взрывных волн.

Annotation. The aim of the work is to reveal mechanism of formation conditions for the expansion of explosion along working for the choice and validation of effective measures for the prevention of extraordinary situations.

Theories which consider conditions and mechanism of development of an aero-vision explosion in a network of mine workings are analyzed. From the published research results it is established that the explosion process in the experimental adit have a pulsating character. This leads to the appearance of waves both in the air of the workings (air shock wave), so in the surrounding mining massif (seismic component of the wave energy).

It is established, that the expansion velocity of waves in rocks and air differs several times, therefore seismic waves outstrip air ones. The results of these investigations can reveal features of the mechanism of uneven spread of explosions in mine workings by transferring dust deposits on the sole and walls of the workings into a mobile and suspended state with the formation of explosive concentrations.

This will provide an opportunity to choose and validation effective measures to prevent the occurrence of explosive situations in the network of mine workings.

Key words: coal dust, explosive concentration, explosions of dust-air mixtures, propagation of explosive waves.

Статья поступила в редакцию 29.08.2017

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук Т.В. Бунько