

*Н. М. Козяр, канд. техн. наук
(Головне управління ДСНС України у м. Києві)*

ОСОБЛИВОСТІ ВИБУХІВ ТА ВИБУХОПРИГНІЧЕННЯ ПИЛОПОВІТРЯНИХ СУМІШЕЙ

В роботі висвітлено особливості вибухів пилоповітряних сумішей та запобігання цим вибухам. Проаналізовано причини та умови утворення вибухонебезпечних пилоповітряних сумішей. Розглянуто відомі методи захисту від вибухів пилоповітряних сумішей, та описано їх недоліки. Встановлено що альтернативним вирішенням проблеми запобігання вибухам пилоповітряних сумішей можуть бути бінарні вогнегасні системи, які складаються з фізичного флегматизатора та хімічного інгібітора, та можуть забезпечувати надійний захист від первинного вибуху а також тривалий захист об'єму від можливих повторних вибухів горючого аерозолію.

Ключові слова: пил, флегматизатор, інгібітор горіння, комбіноване гасіння, вибух.

Н.М. Козяр

ОСОБЕННОСТИ ВЗРЫВОВ И ВЗРЫВОПОДАВЛЕНИЯ ПЫЛЕВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

В работе освещены особенности взрывов и взрывоподавления пылевоздушных смесей. Проанализированы причины и условия образования взрывоопасных пылевоздушных смесей. Рассмотрены существующие методы защиты от взрывов пылевоздушных смесей, и описаны их недостатки. Установлено, что альтернативным решением проблемы взрывоподавления пылевоздушных смесей могут быть бинарные огнетушащие системы, которые состоят из физического флегматизатора и химического ингибитора и могут обеспечивать надежную защиту от первичного взрыва а также длительную защиту объема от возможных повторных взрывов горючего аэрозоля.

Ключевые слова: пыль, флегматизатор, ингибитор горения, комбинированное тушение, взрыв.

N. M. Kozjar

DUSTY MIXES EXPLOSIONS AND THEIR SUPPRESSION FEATURES

In the work the peculiarities of explosions and suppression of the explosion dust-air mixtures. analyzes the reasons and conditions of formation of an explosive dust-air mixtures. the existing methods of protection against explosions dust-air mixtures and describes their shortcomings. it is established that an alternative solution to the problem of suppression of the explosion dust-air mixtures may be binary systems, which consist of a physical deterrent and a chemical inhibitor and which can provide reliable protection from the initial blast and long-term protection of the volume from the possible second explosion of the fuel spray.

Key words: dust, retarder, a flame retardant, combined fire, explosion.

Постановка проблеми. В сучасній промисловості широко представлені різноманітні речовини та матеріали, які є вибухонебезпечними у вигляді пилу. Вибухи пилоповітряних сумішей (аерозолів) є однією із основних небезпек виробництва. Вони відбуваються в закритих просторах в приміщеннях цехів, різного устаткування, штольних шахт, об'ємах апаратів, елеваторах і т.д. Вибух пилу є найнебезпечнішим його наслідком, а ще пожеж; займання та задимлення. Високий ризик вибуху наявний на всіх підприємствах, незалежно від розмірів, типу, конструкції будівель та споруд, на яких утворюється та обертається горючий пил. З технічним прогресом розширюється сфера застосування ультрадисперсних частинок з розміром $100 > d > 1$ мкм. При подрібненні матеріалів до розмірів менше 100 мкм горючі та негорючі речовини (метали, полімери, їх композиції) у звичайних умовах набувають особливого ступеня вибухопожежонебезпеки, а в стані аерозолів можуть вибухати та горіти з досягненням подеколи детонаційних швидкостей [1]. Утворення пилових зависів в промислових умовах відбувається у вугільних шахтах, на підприємствах хімічної, харчової, фармацевтичної, текстильної, деревообробної, металообробної та інших галузей промисловості, пов'язаних з обробкою матеріалів, виробництвом дисперсних композицій, а останнім часом пилоподібні горючі матеріали почали використовуватись в 3D-друці. Вибухонебезпечними у вигляді пилу є продукти харчової промисловості; цукор, спеції, крохмаль, борошно, корми, зерно, тютюн, а також пластик, дерево, папір, целюлоза, каучук, пестициди, фармацевтичні препарати, барвники, вугілля та метали: алюміній, хром, залізо, магній і цинк. Щороку на таких об'єктах стаються вибухи, нерідко з трагічними наслідками. Наприклад, 3 робочих загинули під час вибуху пилу титану у 2010 в Західній Вірджинії, а 14 робочих також загинули під час вибуху пилу цукру у 2008 в Грузії. В Україні у 1992 році стався потужний вибух на Балаклійському комбикормовому заводі, в ст. Савінці Харківської області. В результаті потужного пилового вибуху були зруйновані два поверхи основної будівлі, пошкоджені зовнішні конструкції, загинуло 11 чоловік і 18 отримали тважкі травми. Дуже часто стаються вибухи на шахтах. За час незалежності в Україні відбулось декілька резонансних вибухів на вугільних шахтах які призвели до значних жертв. За 15 років внаслідок великих аварій на шахтах в Україні (а їх було 38) загинуло 839 гірників [2]. У 2006 році "Організація досліджень ступенів ризику на виробництві в США" (CSB), зафіксувала приблизно 280 випадків вибухів горючого пилу на своїх підприємствах за останні 25 років, що призвело до 119 летальних випадків та понад 700 людей отримали ураження різної важкості [3].

Згідно із статистичними даними [3], 80% усіх промислових пилів є горючими а їх відсотковий розподіл за видами матеріалів та речовинами вказаний на рис.1. Як видно із статистичних даних [3], з усіх видів вибухів пилу, вибухи зернового, деревного, синтетичного та вугільного пилу вважаються найбільш небезпечними. Відомо, що близько 30 % усіх вибухів пов'язані з зерном та іншою сільськогосподарською продукцією. В будь-який час при кожному переміщенні, обробленні чи зберіганні зерна утворюється горючий пил. Повітря та джерела спалахування, наприклад нагріті поверхні чи статична електрика, неодмінно наявні в транспортному обладнанні, сушарках тощо. Сьогодні на території України щороку відбувається близько 10 первинних пилових вибухів на підприємствах зберігання та переробки зерна. [4].



Рисунок 1—Розподіл рівня небезпеки вибуху за матеріалом пилу [3]

Таким чином, небезпеку горючого пилу важко переоцінити виходячи з сумних статистичних даних, які свідчать про те, що вибухи пилу незважаючи на достатньо високий рівень протипожежного захисту продовжують траплятись. Загалом, враховуючи надзвичайно широкий спектр матеріалів та речовин, які у вигляді пилу можуть вибухати, та надзвичайні вибухонебезпечні властивості аерозолі, можна сказати, що небезпека вибуху аерозолів на відміну від небезпеки вибухів газу є недооцінена, що підкреслює надзвичайну актуальність такої проблеми.

Мета роботи полягає у виявленні особливості вибухів пилоповітряних сумішей та визначенні основних напрямків підвищення ефективності противибухового захисту для пилоповітряних сумішей.

Виклад основного матеріалу. З теорії горіння відомо, що диспергована речовина у вигляді аерозолі може вибухати. Загалом аерозолі являють собою суміші газу і безлічі твердих частинок, розміри яких становлять від десятків нанометрів до міліметрів. Скупчення дисперсних частинок існують у природі завдяки гравітації в вигляді аерогелю, а також у вигляді продукції - порошоків, волокон, гранул, відходів при обробці матеріалів тощо, що є наслідками людської діяльності. При рухах повітря, поверхонь, ударах можливий перехід аерогелю у стан аерозолі. При цьому вибухопожежонебезпека такої системи відразу ж значно зростає, і внесення в неї джерела запалювання подеколи незначної потужності може призвести до вибуху. Горіння аерозолі в хмарі має деякі особливості, а саме – перед горінням аерозольної частинки відбувається її розклад на горючі гази та пари які змішуючись з повітрям кругом неї утворюють гомогенну горючу суміш, яка власне і згорає. Сама ж частинка, якщо вона повністю не розкладалась під дією тепла, може догорати за гетерогенним механізмом. Виходячи із зазначеного, горіння пилоповітряних сумішей можна сприймати як горіння газопароповітряних сумішей, оскільки горить власне суміш газів, яка утворюється при термічній деструкції частинки аерозолі.

Вибухові явища у хмарах пилонезависів можуть характеризуватись розвитком детонаційних і детонаційно-подібних процесів. Під детонацією розуміється надзвукове поширення фронту горіння, що супроводжується ударною хвилею. До гетерогенної детонації аерозолів відносять детонацію, підтримувану реакціями горіння твердих частинок в повітряному середовищі.

Вибухам великих обсягів пилоповітряних сумішей, як правило, передують невеликі місцеві хлопки і локальні вибухи всередині шахт, обладнання та апаратури. При цьому виникають слабкі ударні хвилі, що створюють турбулентні потоки і піднімають у повітря великі маси пилу, що накопичилися на поверхні підлоги, стін та обладнання.

Окремо увагу потрібно приділити вугільному пилу та його характеристикам. Вугільний пил являє собою сухий тонкий полідисперсний порошок з розмірами частинок від 0,1 мкм до 300 — 500 мкм. Осілий в гірничих виробках пил є потенційним вибуховим середовищем, нижня межа вибухонебезпечної концентрації якого становить 70-100 мг/м³. Основними факторами, від яких залежить вибуховість вугільного пилу є вихід летких речовин, дисперсний склад пилу, вміст у ньому золи і вологи, склад атмосфери гірничих виробок. Зі збільшенням ступеня дисперсності вибуховість вугільного пилу зростає. У вибуху пилу беруть участь порошинки діаметром до 0,75-1,0 мм, основним носієм вибухових властивостей пилу є фракції розміром менше 75 мкм. З підвищенням вмісту золи у вугіллі вибуховість вугільного пилу значно зменшується [6]. Волога, що міститься в вугільному пилі, діє як інертна добавка, знижуючи тепловий баланс системи, і сприяє аутогезії дрібних часток у великі, що зменшує питому поверхню пилу і, отже, її вибуховість. Осілий зволожений пил втрачає здатність переходити у завислий стан і створювати вибухонебезпечні концентрації. Згідно з нормативами, зовнішня вологість вугільного пилу, який перебуває на ґрунті виробки, повинна бути не менше 12 %. Вугільний пил не вибухає при вмісті в ньому 60-70 % золи або іншого інертизатора. Вугільний пил стає вибуховим, якщо вихід летких речовин з вугілля перевищує 10-15 %, та вибухає при 580-850 °С при зазначеній дисперсності. У вибухах беруть участь вугільні частинки розміром менше 1000 мкм. Із збільшенням дисперсності до деякої межі вибуховість вугільного пилу зростає. Найбільш небезпечною автори вважають фракцію 75...100 мкм, польські дослідники – 45 мкм. Окремі дані свідчать про найбільшу вибуховість фракції - 10...60 мкм. Очевидно, що ці результати багато в чому визначені відмінністю хіміко-фізичних властивостей вугілля і неоднаковими умовами проведення випробувань [6].

Зрозуміло що дисперсність – це основний параметр, який буде визначати вибухонебезпеку пилу, а отже визначення розміру частинок, які утворюються, є основною задачею для розробки заходів із запобігання вибухам.

Виходячи з аналізу вибухів у різних галузях промисловості, проблем прогнозування і запобігання вибуховим явищам у дисперсних середовищах, а також супутніх проблем зменшення шкідливих наслідків їх впливу на людей і навколишнє середовище багато, що ще далеко до їх вирішення. Недолік фундаментальних знань про фізичні процеси, що зумовлюють збудження вибухових та детонаційних хвиль у пилових хмарах, а також про режими їх поширення у різних умовах, обмежує рішення прикладних завдань і розробку адекватних сучасним технологічним умовам технічних регламентів.

Відомо, що аерозольні системи поділяються за дисперсністю відповідно до розмірів. Автор [7] подає таку класифікацію за дисперсністю: аерозольні частинки можуть бути системою грубої, колоїдної і аналітичної дисперсності. Грубодисперсний аерозоль включає в себе частинки, видимі за допомогою оптичного мікроскопа, тобто частинки з розміром більше 0,5- 1,0 мк і менше 10 мк. Аерозолі колоїдної дисперсності містять частинки речовини колоїдних розмірів, тобто в межах від 5 до 500 нм, що піддаються спостереженню тільки методами ультра і електронної мікроскопії, а аерозолі аналітичної дисперсності мають частинки розміром 1-5 мкм. Що стосується частинок аерозолів, які утворюються в технологічних процесах виробництва, то нижня границя розмірів частинок таких аерозолів становить приблизно 10^{-4} см і, як видно з таблиці 1, належить до області грубодисперсних аерозолів. Виходячи з даних [7], основна маса аерозависів, утворених в виробничих умовах, має такі розміри: менше 1 мкм - приблизно 10%, до 50 мкм - до 30 %, більше 100 мкм - 70%. Отже, основна частина маси частинок аерозолу за розмірами відповідає невеликому діапазону з мінімальним значенням менше 1 мкм і максимальним значенням- більше 50 мкм. Переходячи до питання верхньої границі розмірів частинок вибухопожежонебезпечного аерозолу зауважимо, що, відповідно до початкового визначення, вона лежить в області розмірів частинок, які мають розміри близько 100 мкм. Якщо нижня границя розмірів аерозольних частинок визначається мінімально можливим розміром елементарної комірки кристалічної решітки, то критерієм для визначення верхньої границі служить швидкість седиментації частинки в гравітаційному полі. Оскільки частинки, що мають розміри більше 10 мкм, осідають зі швидкістю, яка перебільшує 1см/с, їх концентрація і взаємодія важко піддаються дослідженням, тому що в об'ємі газу, який досліджується, частинки перебувають дуже малий проміжок часу. Але, проводячи експериментальні дослідження із встановлення розмірів частинок аерозолів, враховуючи час осідання, який становить більше 15 хв, можна стверджувати, що розміри більшості частинок у момент утворення є меншими за 1 мкм і в процесі існування аерозолу можливо відбувається коагуляція та укрупнення частинок аерозолу.

Таблиця 1

Класифікація аерозолів за розміром диспергованих частинок [7]

Розмір частинок, d	Lg d (м)	Дисперсність	Приклад
Доли ангстрема	-13	–	Ядро атома водню $4 \cdot 10^{-5}$ А
	-12	–	Ядро атома золота $6 \cdot 10^{-4}$ А
Ангстрем	-8	–	Атоми розміром 1-6 А
Мілімікрон	-7	Аналітична 1-5 мкм	Молекули 0,2-5 мкм
Десятки мілімікрон	-6		–
Соті мікрон	-5	Груба	Промисловий пил 1-10 мк
Мікрон	-4		
Десятки мікрон	-3		
Сотні мікрон	-2	–	Частинки помітні неозброєним оком, 50 мк
Міліметр	-1		

Примітка. Область аерозолів взята в рамку

При достатньо високій розрахунковій концентрації аерозолів ($n > 10^5 \text{ см}^{-3}$) їх руйнування проходить в основному внаслідок коагуляції, швидкість якої різко зростає із збільшенням числа частинок n в 1 см^3 . Тому, якою б великою не була величина розрахункової концентрації в момент утворення аерозолу, вже через декілька секунд вона не може перевищувати приблизно 10 см^{-3} . При вибуху аерозавису відбувається поширення фронту полум'я з швидкістю, яка майже дорівнює швидкості поширення горіння газопароповітряної суміші [8]. Багато пилоповітряних сумішей здатні як до повільного (дефлаграційного) горіння, так і до детонації. В таких сумішах, для поширення детонації її можна ініціювати зовнішнім впливом (механічним або тепловим) при цьому відбувається, подвійний вибух пилоповітряної суміші. Як говорилось раніше, спочатку відбувається перший слабкий вибух. Він піднімає в повітря основну масу аерогелю, який переходить в аерозоль і при цьому ударна хвиля, яка рухається попереду фронту полум'я, піднімає в повітря аергель що перебуває в осілому стані на поверхні. За певних умов повільне горіння може мимоволі переходити в детонацію, яка і є надзвичайно небезпечним явищем, що завдає значних збитків. Особливо небезпечні вибухи комбінованих горючих систем, які складаються з горючого газу та пилу – в основному з метану та вугільного пилу. Швидкість детонації залежить тільки від складу і стану детонації дисперсної речовини і може досягати декількох кілометрів на секунду як у газах, так і в конденсованих системах (рідких або твердих вибухових речовин). Швидкість детонації пилоповітряних сумішей значно перевищує швидкість повільного горіння, що завжди істотно менша від швидкості звуку в речовині і не перевищує десятків сантиметрів на секунду або декількох метрів на секунду.

На даний час існують способи та системи вибухоподавлення принцип дії яких оснований на викиді в простір попереду руху ударної хвилі в основному вогнегасної порошкової хмари. Так наприклад, в роботі [9] показано принцип дії установки запобігання вибухам, яка реагує на вибухи метано-пилоповітряної суміші в об'ємі шахт та гірських виробок. В [10] дійшли висновку що, на даний час не існує порошкових складів, які б однаково ефективно гасили і метан і вугільний пил і, як стверджує автор, такі інгібітори ще потрібно шукати. Автор [11] вказує, що висока вогнегасна ефективність порошкових складів пояснюється їх теплоізолюючим і екрануючим впливом на процес горіння. До складу порошоків входять такі хімічні сполуки, як хлористий натрій карбонат і (або) гідрокарбонат натрію, амоній фосфат та ін. Для зменшення злежуваності і волопоглинання порошкових інгібіторів до їх складу вводять спеціальні добавки у вигляді таких речовин, як модифікований аеросил, аміни жирних кислот, стеарати металів, різні кремнійорганічні рідини, а також інертні антизлежувальні добавки типу флогопіту, тальку, шамотно-каолінового пилу, вермикуліту та інших [1]. Це вказує на недосконалість порошкових сумішей і їх можливу недостатню надійність в момент застосування внаслідок злежування порошку.

Власне, використання порошоків в якості флегматизатора забезпечує флегматизувальну концентрацію лише в момент викиду порошку на декілька хвилин, після чого порошок седиментує і його концентрація різко падає. Це не забезпечує захисту від повторного вибуху який може трапитись після осідання порошку. Для влаштування системи газового гасіння або запобігання вибуху необхідно забезпечити наявність приміщення з балонами, а також їх значний запас для пожежогасіння, що не завжди можна реалізувати, як і забезпечити влаштування легкоскридних конструкцій.

Загалом основні прийоми із зменшення наслідків вибуху горючих гомо- та гетерогенних сумішей поділяють на декілька видів. Один з них-це стримування, або забезпечення опірності конструкції до тиску ударної хвилі. Метод передбачає те, що обладнання має бути достатньо міцним, щоб протистояти максимальному тиску, створюваному при вибуху, без руйнування або деформації ми пошкоджені. Метод є дієвим тільки для систем невеликих роз-

мірів і зовсім непридатний для будівель. При детонації, коли тиск збільшується до декількох сотень тисяч атмосфер, цей метод не завжди забезпечить захист від тиску вибухової детонації. Наступний метод передбачає в конструкції відкритий отвір чи вбудовану слабку секцію (розривну запобіжну мембрану), яка в разі вибуху руйнується вже при дуже низькому надлишковому тиску і забезпечує вихід газів. Такий спосіб використовується для мінімізації наслідків вибуху в приміщеннях цехах та значних об'ємах. Але знову ж таки, він не захищає від наслідків детонації, коли ударна детонаційна хвиля діє однаково на всі елементи конструкції. В результаті захист двома першими методами відбувається лише зовні апарата, чи приміщення, і у випадку вибуху аерозолу, обладнання або навіть люди, які знаходяться всередині об'єму, зазнають ушкоджень. Ще один метод включає заміну частини кисню повітря інертним газом (флегматизація), в результаті чого утворюється атмосфера, що містить занадто мало кисню для підтримки процесів вибухового горіння. Останній спосіб запобігання вибухам - автоматичне придушення вибуху — полягає у швидкому підводі теплового флегматизатора, або хімічного інгібітора, для гасіння фронту полум'я після отримання сигналу про надлишковий тиск набігаючої ударної хвилі від датчика тиску. Загальним недоліком способів є те, що у всіх зазначених вибухах не відбувається попереднє флегматизування пилоповітряної суміші, і вона може безперешкодно вибухати при контакті з джерелом запалювання. При цьому існуючі засоби не забезпечують надійного, всебічного, недорогого захисту від ударної вибухової хвилі, яка утворюється в результаті детонації. Таким чином, виходячи з аналізу особливостей вибухів пилоповітряних сумішей та систем їх запобігання, можна сказати, що існуючі способи запобігання вибухам потребують удосконалення, зважаючи на те, що кожен з способів не забезпечує надійного захисту від ударної хвилі.

При загорянні пило-повітряної суміші, полум'я спочатку переміщується відносно повільно, і перше підвищення тиску можна виявити завчасно. Таким чином може бути включена система подачі вогнегасної речовини, що пригнічує вибух до того, як він досягне своєї повної сили, і тиск підвищиться до небезпечного рівня. Виявлення і придушення здійснюються протягом тисячних часток секунди.

Флегматизація вибухонебезпечної суміші пилу з повітрям може бути досягнута додаванням інертних газів, або інгібіторів: азоту, діоксиду вуглецю або похідних галогенів, при цьому найбільш часто використовують азот і діоксид вуглецю. Деякі вогнегасні порошки, на основі фосфату амонію, карбонату натрію і калію, мають значно вищий флегматизований вплив на горючі пило-повітряні суміші, ніж інертні гази, якщо вони рівномірно змішуються з пилом у всьому об'ємі приміщення, яке повинно бути захищене. Флегматизатори значно знижують вибухонебезпечність аерозолу. Зниження концентрації кисню при добавлянні газу- флегматизатора в атмосфері викликає збільшення енергії запалювання, а також зниження максимального приросту тиску вибуху аерозолу. Заповнення системи інертним газом (наприклад, азотом), ліквідує небезпеку вибуху і цей спосіб використовується, особливо для безпеки силосів, та елеваторів. [12]

Значного ефекту флегматизації пило-повітряних сумішей можна досягнути також шляхом їх попередньо змішування з вогнегасним або інертним порошком. У кам'яновугільних шахтах небезпека вибуху зменшується при засипанні аерогелю вугільного пилу дисперсним кремнієм [6]. Залежність максимального збільшення тиску і максимальної швидкості наростання тиску вибуху від концентрації пилу бурого вугілля для трьох значень концентрації кисню представлена на рисунку 2.

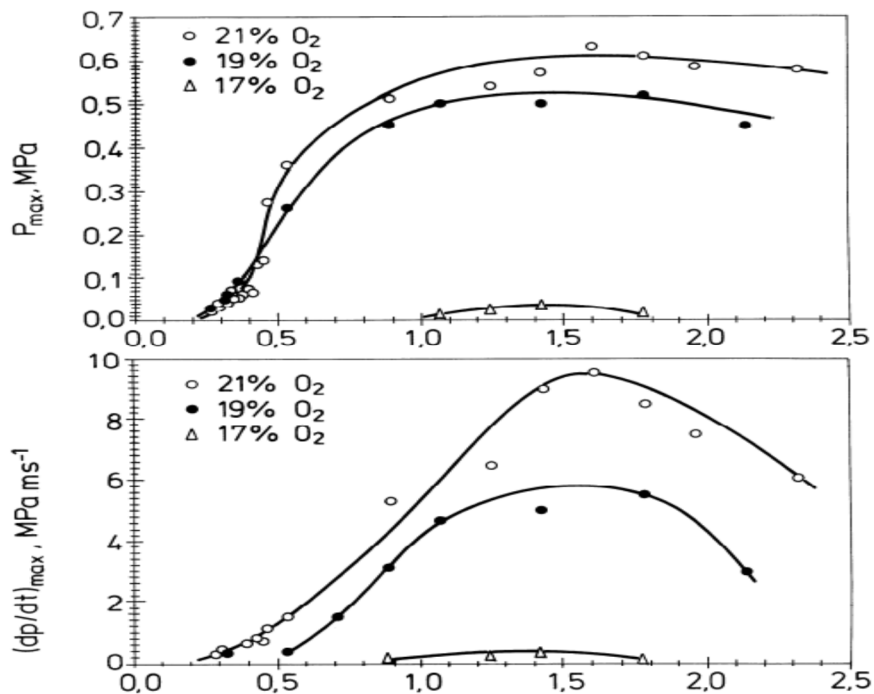


Рисунок 2 – Залежність максимального збільшення тиску і максимальної швидкості наростання тиску вибуху від концентрації пилу бурого вугілля для трьох значень концентрації кисню [13]

Як видно з результатів досліджень авторів [13], незначне зменшення концентрації до 19% вже впливає на тиск вибуху аерозолі, а подальше зменшення концентрації кисню в атмосфері до 17% ще більше зменшує тиск вибуху пилоповітряної суміші. Реалізувати такий ефект в пиловій хмарі при звичайних умовах є практично неможливо, але досягати значного зниження тиску вибуху, а то і його придушення можна використавши комбінацію з теплових флегматизаторів та хімічних інгібіторів. Суміші теплових флегматизаторів та хімічних інгібіторів можуть перебувати у ультрадисперсному стані у вигляді аерозолі з розмірами частинок 0,1–50 мкм. Взаємодія теплових флегматизаторів та хімічних інгібіторів описана в роботі [14]. Загальним висновком з цієї роботи є те, що їх сумарна вогнегасна ефективність значно підвищується завдяки синергізму між її компонентами. Крім цього, автори [15] досліджували флегматизувальну ефективність аерозолі на основі неорганічних солей калію – K_2CO_3 , KOH , KCl , CO_2 , H_2O та дійшли висновку, що навіть незначна добавка CO_2 чи N_2 веде до значного збільшення флегматизувальної ефективності такої суміші. Також в роботі [16] вказано, що суміш CO_2 з вогнегасним аерозолем на основі неорганічних солей калію – K_2CO_3 , KOH , $KHCO_3$, навіть при незначних концентраціях, ефективно флегматизує гексаноповітряну суміш. На відміну від вогнегасного порошку, який застосовується в системах вибухопригнічення та осідає протягом 1 хвилини, зазначена бінарна суміш створює флегматизувальну концентрацію в об'ємі мінімум на 20 хвилин, що дорівнює часу існування вогнегасного аерозолі [17]. Таким чином, суміші вогнегасних аерозолів та газів флегматизаторів, завдяки їх характеристикам щодо вогнегасної та флегматизувальної ефективності можуть бути вирішенням питання вибухобезпеки пилоповітряних сумішей.

Висновок. Виходячи з проведеного аналізу щодо особливостей вибухівпилоповітряних сумішей та запобіганню їх поширення можна зазначити, що пошук ефективних речовин та способів вибухопригнічення є актуальним на сьогодні, що підтверджується статистичними даними щодо вибухів аерозолів в різних галузях виробництва. Альтернативним вирішенням проблеми запобігання поширенню вибухів пилоповітряних сумішей можуть бути бінар-

ні системи, які складаються з фізичного флегматизатора та хімічного інгібітора і можуть забезпечувати надійний захист від первинного вибуху, а також тривалий захист об'єму від можливих повторних вибухів горючого аерозолю. Зазначені вогнегасні бінарні суміші є перспективним напрямком з погляду на їх невисоку вартість, простоту в отриманні, тривалий експлуатаційний термін, що є підґрунтям для подальшого їх дослідження щодо можливості застосування у якості вогнегасної та флегматизувальної речовини для запобігання поширенню вибухів пилоповітряних сумішей.

Список літератури:

1. Таубкин С.И., Таубкин И.С. «Пожаро и взрывоопасность пылевидных материалов и технологических процессов их переработки», Химия, М., 1976. 264 С.
2. <http://tyzhden.ua/News/131275>
3. Eckhoff, Rolf K. Dust explosions in the process industries / Rolf Eckhoff. – 3rd ed. 754 P. The basics of dust-explosion protection. http://www.rstahl.com/fileadmin/Dateien/tgus/Documents/ExProtection_Dust-Basics.pdf
4. Статистика пожеж. <http://undicz.dsns.gov.ua/ua/Statistika.html>
5. Bartknecht W. „Dust Explosions”, Springer-Verlag, Berlin, 1989. P. 270.
6. Костенко В.К. Взрывы аэрозвесей при разработке метанообильных угольных пластов. В.К. Костенко, Е.Л. Завьялова, Т.В. Костенко, А.А. Майборода. Пожарная безопасность. Львів С. 86-91.
7. Х. Грин. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы / Х. Грин, В. Лейн; перевод с англ. под ред. Н.А. Фукса Изд. Л. : “Химия”, 1972, – С. 250.
8. Демидов П.Г., Шандиба В.А., Щеглов. Горение и свойства горючих веществ. 2изд.-М.: Химия, 1981. – 272с.
9. Система взрывоподавления <http://asyplv.ru/desc>.
10. В.В. Деньга, Анализ порошкообразных ингибиторов применяемых в автоматических системах взрывозащиты. Сб. научных трудов МакНИИ. 2009 р. С. 78-85.
11. Краснянский М. Е. Огнетушащие и взрывоподавляющие порошки / М. Е. Краснянский – Донецк-Донбасс, 1990. – 110 с.
12. Васильев В.Я., Семенов Л. И. Взрывобезопасность на предприятиях по хранению и переработке зерна. М.: Колос, 1983.
13. Field P., "Dust Explosions", Elsevier, Amsterdam, Vol. 4. 2012
14. Sherril D. Christian, Paul Kerr, Edwin E. Tucker, Cedimir M. Sliepcevich, and Arnulf P. Hagen, Synergism in flame extinguishment: New results for mixtures of physical and chemical agents, Halon Options Technical Working Conference 6-8 May 1997 P. 88-105.
15. V. M. Balanyuk, N. M. Kozyar, O. I. Garasymuyk. Study of fire-extinguishing efficiency of environmentally friendly binary aerosol-nitrogen mixtures" Eastern-european journal of enterprise. №3/10 (71) 2016 С. 4-12.
16. V.M. Balanyuk, D. A. Zhurbinskiy. Phlegmatisation of flammable gas mixtures by aerosol sprays, ВіТР 2013. – Vol. 32, Issue 4. – P. 53-58.
17. Агафонов В.В. Копилов Н.П. Установки аэрозольного пожаротушения. Элементы и характеристики проектирование монтаж и эксплуатация М. ВНИИПО 1999 С. 229.

References:

1. Taubkin S.I., Taubkin I.S. «Pozharo i vzryivoopasnost pyilevidnyih materialov i teh-nologicheskikh protsessov ih pererabotki», Himiya, M., 1976. 264 С.
2. <http://tyzhden.ua/News/131275>
3. Eckhoff, Rolf K. Dust explosions in the process industries / Rolf Eckhoff. – 3rd ed. 754 P. The basics of dust-explosion protection. http://www.rstahl.com/fileadmin/Dateien/tgus/Documents/ExProtection_Dust-Basics.pdf

4. Statistika pozhezh. <http://undicz.dsns.gov.ua/ua/Statistika.html>
5. Bartknecht W. „Dust Explosions”, Springer-Verlag, Berlin, 1989. P. 270.
6. Kostenko V.K. Vzryivyi aerovzvesey pri razrobotke metanoobilnyih ugolnyih plastov. V.K. Kostenko, E.L. Zavyalova, T.V. Kostenko, A.A. Mayboroda. Pozharnaya bezopasnost. LvIv S. 86-91.
7. H. Grin. Aerozoli – pyili, dyimyi i tumanyi / H. Grin, V Leyn; perevod s angl. pod red. N.A. Fuksa Izd. L. : “Himiya”, 1972, – C. 250.
8. Demidov P.G., Shandiba V.A., Scheglov. Gorenje i svoystva goryuchih veschestv. 2 izd.-M.: Himiya, 1981.– 272s.
9. Sistema vzryivopodavleniya <http://asvplv.ru/desc>.
10. V.V. Denga, Analiz poroshkoobraznyih ingibitorov primenyaemyih v avtomaticheskikh sistemah vzryivozaschityi. Sb. nauchnyih trudov MakNII. 2009 r. S. 78-85.
11. Krasnyanskiy M. E. Ognetchashchie i vzryivopodavlyayuschie poroshki / M. E. Krasnyanskiy – Donetsk-Donbass, 1990. – 110 s.
12. Vasilev V.Ya., Semenov L. I. Vzryivobezopasnost na predpriyatiyah po hraneniyu i pererabotke zerna. M.: Kolos, 1983.
13. Field R., „Dust Explosions”, Elsevier, Amsterdam, Vol. 4. 2012
14. Sherril D. Christian, Paul Kerr, Edwin E. Tucker, Cedimir M. Sliepcevich, and Arnulf P. Hagen, Synergism in flame extinguishment: New results for mixtures of physical and chemical agents, Halon Options Technical Working Conference 6-8 May 1997 P. 88-105.
15. V. M. Balanyuk, N. M. Kozyar, O. I. Garasymuyk. Study of fire-extinguishing efficiency of environmentally friendly binary aerosol-nitrogen mixtures" Eastern-european journal of enterprise. #3/10 (71) 2016 C. 4-12.
16. V.M. Balanyuk, D. A. Zhurbinskiy. Phlegmatisation of flammable gas mixtures by aerosol sprays, BiTP 2013. – Vol. 32, Issue 4. – R. 53-58.
17. Agafonov V.V. Kopilov N.P. Ustanovki aerolnogo pozharotusheniya. Elementyi i harakteristiki proektirovanie montazh i ekspluatatsiya M. VNIPO 1999 S. 229.

