

УДК [622.673.1: 681.514.54]

DOI: 10.31471/1993-9981-2021-2(47)-96-104

РОЗРОБКА ВИМОГ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗАПАЛЮВАННЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНОЇ СУМІШІ НИЗЬКОВОЛЬТНИМ ВИМІРЮВАЛЬНИМ КОЛОМ

В. В. Лонатін

*Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України
вул. Сімферопольська 2а, м Дніпро, 49005. тел. (0562) 46-01-51, факс (0562)46-24-26
e-mail vlop@ukr.net, nanu@igtm.dp.ua*

Відсутність в даний час літератури щодо безпечного використання вимірювальних низьковольтних кіл в вугільних шахтах призводить до того, що до них намагаються пред'являти безпідставні вимоги або просто забороняти до використання під будь-яким надуманим приводом. При цьому вимірювальні низьковольтні коло важлива невід'ємна складова діагностики та інформативності систем управління гірничо-шахтного устаткування. Це пов'язано з тим, що теорія і моделі запалювання метано-повітряної рудничної атмосфери (ВШС) вирішують завдання у вузькій постановці і не можуть бути використані в загальному шахтному випадку.

В даний час існує дві теорії займання ВШС: теплова та іонна. Теплова модель займання ВШС від електричного розряду НВК з точки зору автора базується на основі аналізу поширення температурної хвилі від деякого джерела тепла в інертному середовищі. Теплова модель займання ВШС не враховує багато подробиць фізики механізму горіння, наприклад, ланцюговий характер окремих актів хімічної взаємодії, енергії активізації молекул при утворенні активних центрів, і вона заснована на тому, що постулювало деякі сумарні умови виникнення горіння у всій масі вибухової суміші при нагріванні її електричним розрядом.

У статті виявлено умови і параметри для загорання ВШС від низьковольтної вимірювального коло (НВК), розроблені критерії для загорання ВШС від НВК, доопрацьована існуюча модель можливого процесу загорання ВШС від НВК. Виконано оцінку іскробезпеки і можливості саморозширення ядра полум'я НВК. Показана апробація досліджень на трьох зарубіжних конференціях і інтерес до них зарубіжних колег. У статті є посилання на держбюджетні тематики НАН України та номери державної реєстрації України.

Ключові слова: низьковольтна вимірювальна ланцюг, оцінка іскробезпеки, процес запалення, ядро полум'я, саморозширення.

Отсутствие в настоящее время литературы по безопасному использованию измерительных низковольтных цепей в угольных шахтах приводит к тому, что к ним пытаются предъявлять необоснованные требования или попросту запрещать к использованию под любым надуманным предлогом. При этом измерительные низковольтные цепи важная неотъемлемая составляющая диагностики и информативности систем управления горно-шахтного оборудования. Это связано с тем, что теория и модели зажигания метано-воздушной рудничной атмосферы (ВШС) решают задачи в узкой постановке и не могут быть использованы в общем. В настоящее время существует две теории воспламенения ВШС: тепловая и ионная. Тепловая модель воспламенения ВШС от электрического разряда УВК с точки зрения автора базируется на основе анализа распространения температурной волны от некоторого источника тепла в инертной среде. Тепловая модель воспламенения ВШС не учитывает многие подробности физики механизма горения, например, цепной характер отдельных актов химического взаимодействия, энергии активизации молекул при образовании активных центров, и она основана на том, что постулировало некоторые суммарные условия возникновения горения во всей массе взрывчатой смеси при нагревании ее. электрическим разрядом шахтном случае.

В статье выявлены условия и параметры для загорания ВШС от низковольтной измерительной цепи (НВЦ), разработаны критерии для загорания ВШС от НВЦ, доработана существующая модель возможного процесса загорания ВШС от НВЦ. Выполнена оценка искробезопасности и возможности саморасширения ядра пламени НВЦ. Показана апробация исследований на трех зарубежных конференциях и интерес к ним зарубежных коллег. В статье сделаны ссылки на госбюджетные тематики НАН Украины и номера государственной регистрации Украины.

Ключевые слова: низковольтная измерительная цепь, оценка искробезопасности, процесс воспламенения, ядро пламени, саморасширение.

The current lack of literature on the safe use of low-voltage measuring circuits in coal mines leads to the fact that they are trying to make unreasonable demands or simply prohibit their use under any far-fetched pretext. At the same time, measuring low-voltage circuits are an important integral component of diagnostics and information content of mining equipment control systems. This is due to the fact that the theory and models of the ignition of a methane-air mine atmosphere (MMA) solve problems in a narrow setting and cannot be used in the general mine case. The article identifies the conditions and parameters for the ignition of the MMA from the low-voltage measuring circuit (NVC), developed criteria for the ignition of the form the NVC, the existing model of the possible ignition process of the MMA from the NVTs is finalized. Currently, there are two theories of ignition of the HCV: thermal and ionic. From the author's point of view, the thermal model of VSH ignition from the electric discharge of the NSC is based on the analysis of the propagation of the temperature wave from some heat source in an inert environment. The thermal ignition model of VHS does not take into account many details of the physics of the combustion mechanism, such as the chain nature of individual acts of chemical interaction, the activation energy of molecules in the formation of active centers, and it is based on postulating some electric discharge. An assessment of the intrinsic safety and the possibility of self-expansion of the NVC flame core has been carried out. The approbation of research at three foreign conferences and the interest of foreign colleagues in them are shown. The article contains links to the state budget topics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the numbers of state registration of Ukraine.

Key words: low-voltage measuring circuit, intrinsic safety assessment, inflammation process, flame core, self-expansion

Формулювання проблеми

Аварія і великий підземний вибух на ш. Героїв Космосу наприкінці (19 листопада) 2020 року знову нагадала про невирішені питання виникнення пожежі вибухонебезпечної суміші (метано-повітряної рудничної атмосфери (ВШС)) у вугільних шахтах України. На вугільних шахтах України виплата регресійних позовів шахтарям лягає відчутним тягарем на собівартість видобутого вугілля, збільшуючи її до 15%. Через аварії і травматизм вугільна галузь України втрачає більше 1 млрд. гривень. [1]. Такий незадовільний стан рівня безпеки праці на вугільних шахтах України визначається досить складними гірничо-геологічними умовами, а також незадовільним станом шахтного фонду (знос до 75%). Незважаючи на успішне вирішення ряду актуальних практичних питань, пов'язаних з іскробезпекою у вугільній промисловості, до теперішнього часу не створено однозначну, ясну теорію і математичну модель процесу запалювання ВШС, що дозволило б виявити, які фактори суттєво впливають на формування вогнища займання ВШС від низьковольтного вимірювального кола (НВК).

Існуючі на сьогоднішній день теорії і моделі процесу запалювання ВШС вирішують завдання у вузькій постановці і не можуть бути використані для загального шахтного випадку і вимірювальних низьковольтних кіл (НВК). У теоретичних дослідженнях [1,2] розглядають задачу, моделюючи стовп розряду у вигляді

циліндричної трубки. При цьому нехтують механічною інерцією плазми і макроскопічним рухом в радіальному напрямку. В процесі розвитку полум'я, як відомо, змінюється температура ВШС і відповідно обсяг вогнища. Тому для спрощення вирішення поставленого завдання ВШС розглядають як ідеальний газ, тобто для якого відношення добутку тиску і обсягу до температури є величина постійна.

Наприклад, рішення задачі відшукування мінімальної енергії, що запалює вид джерела НВК, вимагає облік теплотворної здатності ВШС і швидкості протікання хімічної реакції в залежності від температури і ряду інших чинників, таким чином становить серйозну наукову проблему, яка не має на сьогодні точного рішення. Наближені розв'язки [3-5] завдання відшукування мінімальної енергії, що запалює вид джерела НВК, як показали дослідження, пов'язані з незнанням параметрів, що визначають поширення хвилі горіння.

В даний час існує дві теорії займання ВШС: теплова та іонна. Теплова модель займання ВШС від електричного розряду НВК з точки зору автора базується на основі аналізу поширення температурної хвилі від деякого джерела тепла в інертному середовищі. Теплова модель займання ВШС не враховує багато подробиць фізики механізму горіння, наприклад, ланцюговий характер окремих актів хімічної взаємодії, енергії активізації молекул при утворенні активних центрів, і вона заснована на тому, що постулювало деякі

сумарні умови виникнення горіння у всій масі вибухової суміші при нагріванні її електричним розрядом [2-5]. Не дивлячись на вищевказані недоліки, модель дозволяє встановити зв'язок граничних параметрів електричного розряду (його енергії і тривалості) з фактором запалення. Електричний розряд в цій моделі вважають нагрітим тілом, температура якого значно перевищує температуру займання ВШС. Температуру в точці простору в цій моделі визначають з класичного рівняння нестационарної теплопровідності (рівняння Фур'є). Щоб трохи збільшити точність розрахунків, вводять поняття «відносна об'ємна концентрація» одного з реагуючих компонентів.

У дослідженнях Мак НДІ [6,7] враховують параметри і питому об'ємну потужність іскрового розряду, однак спрощують задачу полага, що має вісь і площину симетрії, перпендикулярну цій осі, тобто обмежуються одним квадрантом площини моделювання. Використовують для розробки моделі класичне диференціальне рівняння теплопровідності в циліндричній системі координат і з огляду на симетрію, отримують двомірну задачу, на основі модифікованого методу «джерел». Зрозуміло, що не врахування теплотворної здатності нагрівання середовища і умов поширення полум'я, не дає можливості оцінити величину мінімальної енергії, достатньої для займання, навіть в найпростішому випадку її передачі ВШС.

Аналізуючи наведені вище роботи, можна сказати, що всі вони носили пробний характер. Результати цих робіт не можуть відповісти на питання про вплив тривалості електричного розряду на величину його запальної енергії і потужності, дати повну картину перспективності напрямку зі штучного скорочення тривалості розряду і стати основними вихідними даними для конструювання та експлуатації в шахтних умовах для вугільних шахт іскробезпечних НВК, як цього вимагає ДЕСТ [8].

У зв'язку зі зміною ситуації пов'язаної з окупацією частини Донбасу науковій організації і провідні фахівці України, що займаються питаннями безпеки електричних ланцюгів для вугільних шахт залишилися на окупованій території. Тому автор вирішував завдання безпеки використання вимірювальних ланцюгів

в вугільних шахтах в рамках держбюджетної теми ДБ 71 (№. держреєстрації 0118U003599) у 2018-2020 роках.



Рисунок 1 – Шахта шахтоуправління "Покровське" групи "Метінвест", де стався вибух

Виклад основного матеріалу і результати дослідження.

1. Виявлення умов та параметрів для загоряння ВШС від НВК

Однак до теперішнього часу не створено просту математичну модель процесу запалювання ВШС, яка дозволила б виявити фактори, що суттєво впливають на формування вогнища займання ВШС від низьковольтного вимірювального кола (НВК). Свіжий приклад, на шахті шахтоуправління "Покровське" (раніше - "Красноармійська-Західна №1") групи "Метінвест" (рис.1) 31 липня 2021 року під час виконання підземних робіт на горизонті 815 метрів стався вибух, в результаті яких постраждали 10 гірників. Від травм, несумісних з життям, шестеро шахтарів померли на місці в шахті. Ще четверо гірників направлено до лікарень Краматорська і Покровська зі станом трьох шахтарів - незадовільно, ще одного - стабільно важкий. Вирішується питання про відкриття кримінального провадження з попередньою кваліфікацією за ч. 2 ст. 272 Кримінального кодексу України (порушення правил безпеки під час виконання робіт з підвищеною небезпекою). Як би це було неприємно, але це типова ситуація на вугільних шахтах України.

Поняттям «вибухонебезпечна зона» в міжнародному стандарті «EN 60079-10 Classification of Hazardous Areas» визначається, що це приміщення або обмежений простір в приміщенні і зовнішньої обстановці, в яких є

або можуть утворюватися вибухонебезпечні суміші. Таким чином, гірничі виробки вугільної шахти повністю відповідають цьому визначенню. В даний час вже ні у кого не викликає сумніву в тому, що найбільш ефективний і економічно виправданий вид вибухозахисту - це іскробезпечне виконання (іскробезпечне коло), засноване на тому, що електричні розряди малої енергії виявляються нездатними запалити вибухову суміш. Це базується на багаторічному досвіді і простій логіці, що розряди малої потужності при будь-якій величині загальної енергії не можуть запалити ВШС. Тому слід враховувати дві форми передачі енергії в ВШС або два типу електричного розряду - миттєвий розряд і розряд з певною тривалістю. Для миттєвого електричного розряду критерієм запальної здатності є енергія розряду від НВК, що здатний до створення ядра полум'я, яке здатне до самопоширювання. Ця енергія розряду від НВК вноситься не миттєво, а в часі з невідомою тривалістю.

Для безперервного горіння необхідно, щоб на одиниці поверхні сфери полум'я вироблялась кількість тепла, достатня для нагрівання наступного шару певної товщини до температури, при якій значно зростає швидкість реакції. При зменшенні радіусу питома кількість тепла, необхідна для підтримки горіння, зростає. Ясно, що тільки починаючи з деякого розміру полум'я, внутрішня теплота реакції дозволяє йому поширюватися самостійно. До цих мінімально достатніх розмірів полум'я може підтримуватися тільки за рахунок додаткових надходжень електричної енергії.

Експериментально автором визначено, що мінімальна напруга запалювання істотно залежить від матеріалу контактів [8, 9]. Наприклад, якщо матеріал контактів мідь-мідь то мінімальна напруга запалювання становить 13,3 В, якщо матеріал контактів припій-припій, то мінімальна напруга запалювання всього 10,7 В. [9]. Виявлено, що перед початком електричного розряду електрична напруга зростає стрибком, потім монотонно падає, а потім носить коливальний характер. Причому час, протягом якого вогнище полум'я зростає до мінімального ядра полум'я, для 8,5% концентрації максимально і дорівнює приблизно 140 мкс.

За методикою [9] струми, що запалюють, визначалися для одного електричного кола НВК, за якими будувалася залежність, шляхом екстраполяції, і визначалися струми, що запалюють. Отримані аналітичні взаємозв'язку факторів, що зумовлюють займання ВШС електричною іскрою НВК, дозволяють приблизно оцінити іскробезпеку НВК і розробити орієнтовну, не завжди достатню для практики, методику оцінки іскробезпеки НВК.

При дослідженні [9] було виявлено, що максимальний розкид значень параметрів розряду при визначенні тривалості не перевищував 20%. Встановлено, що тривалість електричних розрядів зростає зі збільшенням розмикання струму, індуктивності електричного кола НВК і електрорушійної сили (е. р. с.) джерела електроживлення НВК. Для одних значень е. р. с. і одного значення індуктивності електричного кола НВК тривалість електричного розряду майже прямо пропорційна току, що розмикає.

2. Розробка критеріїв для можливого загоряння ВШС від НВК

У найсучаснішому огляді [10] узагальнено результати складних комплексних досліджень, що проведені за останній час в кращих лабораторіях світу. У зазначених дослідженнях встановлено, що, всупереч загальноприйнятим раніше уявленням, газонебезпечні процеси горіння, вибуху і детонації газів в області атмосферного і підвищених тисків протікають по складним ланцюговим механізмам і за законами неізотермічних ланцюгових реакцій. Отримано пояснення їх основних закономірностей, які не знаходили пояснення раніше, завдяки виявленню ланцюгової природи зазначених процесів. Розроблено наукові основи і хімічні методи управління різними режимами горіння. Встановлено та істотно уточнено закон температурної залежності швидкості реакцій ланцюгового горіння, який визначає особливості кінетики і макрокінетики цих процесів, в тому числі ланцюгово-тепловий вибух - необхідна стадія переходу горіння в детонацію. Переосмислення описаних прикладів використання цих сучасних методів придушення переходу горіння в детонацію, з точки зору автора, дозволяють створити нові

заходи і рекомендації для запобігання вибухів у вугільних шахтах.

На основі багаторічного досвіду і простій логіки зрозуміло, що розряди малої потужності при будь-якій величині загальної енергії не можуть запалити ВШС, тому ефективним і економічно виправданим видом вибухозахисту є іскробезпечне коло. Тому слід враховувати дві форми передачі енергії в ВШС або два типу електричного розряду - миттєвий розряд і розряд з певною тривалістю. Зрозуміло, що для миттєвого електричного розряду, критерієм запальної здатності є енергія розряду. Для тривалого електричного розряду, який рівній потужності розряду, критерієм запальної здатності є створення ядра полум'я, здатного до самопоширювання, але енергія вноситься не миттєво, а в часі зі швидкістю джерела електричної енергії НВК.

Виконані дослідження роботи [11] дали відповідь, в якому випадку критерієм запальної здатності є тільки енергія електричного розряду НВК, а за яких тривалостях необхідно оцінювати його небезпеку по потужності НВК. Це дозволило виключити з розгляду температуру джерела займання і брати до уваги енергію електричного розряду НВК і тривалість його підведення до ВШС. В роботі [11] знайдено, що температура займання метано-повітряної суміші знаходиться в діапазоні 650-750°C, а температура електричних розрядів може перевищувати в деяких випадках 1000°C.

В роботі [12] вирішувалося завдання знаходження досвідченим шляхом залежно запальної здатності і необхідної кількості тепла, переданого повітрю ВШС, в залежності від тривалості електричного розряду при незмінній його енергії. Вдалося з'ясувати, що існує відповідність між теплом, переданим повітрю, і запальною здатністю електричного розряду. Так що запальна здатність електричного розряду зростає до певної межі при підвищенні частоти і скорочення тривалості, але при подальшому зменшенні тривалості розряду запальна здатність починає падати. Аналіз показав, що є явно виражений мінімум при тривалості 100 - 120 мкс. Встановлений факт дозволяє зробити припущення, що тривалість електричного розряду, при якій запальна енергія мінімальна, і являє собою час формування мінімального ядра полум'я від енергії електричного кола.

Характерна особливість, що мінімум є для електричних кіл при різних можливостях займання. Отже, під час займання ВШС електричними розрядами з тривалістю більшою, ніж час формування мінімального полум'я, критерієм запальної здатності електричного розряду буде його потужність (енергія розряду за час формування мінімального ядра полум'я). Експериментально показано [11], що величина мінімальної запальної енергії становить 0,15 мДж для 8,5% метано-повітряної суміші. При цьому радіус мінімального ядра полум'я змінюється в залежності від концентрації ВШС і має мінімум при 8,5% метано-повітряної суміші.

Таким чином можемо зробити припущення, що енергія, виділена в електричному розряді після того, як мінімальне ядро полум'я вже сформовано, є надмірною. Тобто надмірна частка енергії електричного розряду НВК не приймає участі в запаленні ВШС.

Проведений нами аналіз експериментальних досліджень в області впливу тривалості іскрових розрядів на їх займисту здатність ВШС показав істотну роль цих досліджень в процесі формування правильного розуміння процесу займання ВШС від електричних розрядів НВК. Та, що запальна здатність іскрового розряду змінюється відповідно до зміни кількості тепла, переданого електричним розрядом повітрю шляхом теплопровідності і конвекції. Теплові та електричні явища в іскровому розряді НВК разом впливають на процес запалення, але переважну роль грає тепло.

3. Доопрацювання наявної моделі процесу запалювання ВШС від НВК

Автор доопрацював наявну модель Я.Б. Зельдеровіча [12] яка заснована на теплової теорії поширення ламінарного полум'я. Автором була модифікована постановка задачі іскрового запалення вибухових газових сумішей, яка вирішувалася в широковідомій роботі [13] і пристосував її стосовно до вугільній шахті.

Пропонована модель спрощено враховує умови переходу від полум'я яке розвивається до стаціонарного полум'я ВШС (8,5% - ой метано-повітряної суміші). Для моделі була знайдена приблизна величина мінімального ядра полум'я ВШС, здатного до поширення. З логічних міркувань знайдено, що радіус

сферичного обсягу ВШС, що спочатку нагрівається електричним розрядом НВК до температури горіння, повинен бути більшим, ніж ширина фронту ламінарного полум'я для даної ВШС, - в цьому випадку горіння в локальному обсязі переростає у вибух. При цьому радіус мінімального ядра полум'я змінюється в залежності від концентрації ВШС і має мінімум при 8,5% концентрації метану. Таким чином, виходячи з проведених досліджень, можна змоделювати величину мінімальної теплової енергії миттєвого розряду Q_{\min} , необхідну для займання ВШС:

$$Q_{\min} = 4/3 \pi R^3 C_p \rho (T_g - T_n). \quad (1)$$

де Q_{\min} - мінімальна тепла енергії миттєвого розряду, необхідна для займання ВШС, що потрібна для нагрівання критичного обсягу газу до температури горіння, Дж

R - радіус еквівалентного сферичного полум'я, здатного до самопоширювання, см;

C_p - теплоємність ВШС при постійному тиску, кал/(г × °С);

ρ - щільність ВШС при постійному тиску, г/см²;

T_g - температура горіння ВШС в сферичному обсязі полум'я, °С;

T_n - початкова температура ВШС для нагрівання обсягу, °С.

Математична модель мінімальної теплової енергії миттєвого розряду НВК (1), визначається як енергія, потрібна для нагрівання обсягу газу до температури горіння.

Вважаючи, що критерієм запальної здатності ВШС електричним розрядом НВК є його тепла енергія. Здійснюємо перехід від теплової енергії електричного розряду до повної електричної енергії НВК. Дана модель повної електричної енергії A_{\min} створена, за умови поширення ламінарного полум'я і, що хімічна реакція протікає у вузькій зоні температур поблизу температури горіння:

$$A_{\min} = 5,6 \pi R^3 C_p \rho (T_g - T_n). \quad (2)$$

Як видно із запропонованої моделі повної електричної енергії A_{\min} , завдання займання ВШС від точкового електричного розряду НВК досягнута ціною сміливих спрощень, що не

привели до спотворення фізичного змісту процесу і в основному зберегли кількісну сторону.

Безумовно запропонована автором модель (2) не враховує ланцюговий характер окремих актів хімічної взаємодії, енергії активізації молекул при утворенні активних центрів горіння і вона заснована на тому, що вона постулювало деяку сумарну умову виникнення горіння у всій масі ВШС при нагріванні її електричним розрядом НВК.

Не дивлячись на вищевказані недоліки, модель (2) дозволяє встановити зв'язок граничних параметрів електричного розряду (його енергії і тривалості) з фактором запалення. в залежності від комплексу фізико-хімічних властивостей ВШС, що знаходять своє відображення в коефіцієнті температуропровідності і нормальній швидкості поширення полум'я. Ставлення визначає характерну для кожної ВШС величину - ширину фронту ламінарного полум'я, здатного до самопоширювання. Для безперервного горіння необхідно, щоб на одиниці поверхні сфери полум'я вироблялося кількість тепла, достатнє для нагрівання наступного шару певної товщини до температури, при якій значно зростає швидкість реакції. При зменшенні радіусу питома кількість тепла, необхідна для підтримки горіння зростає. Ясно, що, тільки починаючи з деякого розміру полум'я, внутрішня теплота реакції дозволяє йому поширюватися самостійно. До цих мінімально достатніх розмірів полум'я може підтримуватися тільки за рахунок додаткових надходжень електричної енергії НВК.

ВИСНОВКИ

При зниженні тривалості розрядів у НВК, що запалюють, середня потужність їх зростає. Цей факт характерний для області з тривалістю електричних розрядів у НВК, меншою часу формування мінімального ядра полум'я. Для цієї області характерна зворотна пропорційна залежність від його тривалості електричних розрядів у НВК при відносному сталості енергії, що запалює.

Встановлено, що тривалість електричного розряду, при якій запалює енергія мінімальна, і

являє собою час формування мінімального ядра полум'я від енергії електричного кола НВК.

Критерієм запальної здатності ВШС електричним розрядом НВК є його теплова енергія.

Знайдено, що температура займання метано-повітряної суміші знаходиться в діапазоні 650-750°C, а температура електричних розрядів НВК може деяких випадках перевищувати 1000°C.

Із залежності (2) випливає, що для цих величин займання ВШС електричним розрядом необхідно НВК, щоб виділене розрядом тепло нагрівало до температури горіння сферичний обсяг, рівний мінімальному ядру полум'я, здатному до самопоширюванню. Цей висновок справедливий для розрядів будь-якої тривалості. Для безперервного горіння необхідно, щоб на одиниці поверхні сфери полум'я вироблялась кількість тепла, достатня для нагрівання наступного шару певної товщини до температури, при якій значно зростає швидкість реакції. При зменшенні радіусу питома кількість тепла, необхідна для підтримки горіння зростає. Ясно, що, тільки починаючи з деякого розміру полум'я внутрішня теплота реакції дозволяють йому поширюватися самостійно. До цих мінімально достатніх розмірів полум'я може підтримуватися тільки за рахунок додаткових надходжень електричної енергії. Тому модель (2) дає тільки порівняльну оцінку запальної здатності джерел НВК.

Доопрацьована модель (2) дозволяє встановити зв'язок граничних параметрів електричного розряду (його енергії і тривалості) з фактором запалення, в залежності від комплексу фізико-хімічних властивостей ВШС, що знаходять своє відображення в коефіцієнті температуропровідності і нормальної швидкості поширення полум'я.

Встановлено, що це ставлення визначає характерну для кожної ВШС величину - ширину фронту ламінарного полум'я, здатного до самопоширювання.

Але для безперервного горіння необхідно, щоб на одиниці поверхні сфери полум'я вироблялася кількість тепла, яка достатня для нагрівання наступного шару певної товщини до температури, при якій значно зростає швидкість реакції. При зменшенні радіусу питома кількість тепла, необхідна для підтримки горіння, зростає.

Ясно, що, тільки починаючи з деякого розміру полум'я, внутрішня теплота реакції дозволяє йому поширюватися самостійно. До цих мінімально достатніх розмірів полум'я може підтримуватися тільки за рахунок додаткових надходжень електричної енергії від НВК.

Експериментально автором визначено, що мінімальна напруга запалювання істотно залежить від матеріалу контактів НВК.

Встановлено, що тривалість електричних розрядів зростає зі збільшенням розмикання струму, індуктивності електричного кола і електрорушійна сила (е. р. с.) джерела електроживлення НВК. Для однакових значень е. р. с. і одного значення індуктивності електричного кола НВК тривалість електричного розряду майже прямо пропорційна току що розмикає.

Експериментально автором визначено, що величина мінімальної запальної енергії - 0,15 мДж для 8,5% концентрації метано-повітряної суміші. При цьому радіус мінімального ядра полум'я змінюється в залежності від концентрації ВШС і має мінімум при 8,5% метано-повітряної суміші.

Шахтоуправління "Покровське"(рис.2) - найбільший в Україні виробник коксівного вугілля мінеральні ресурси і запаси по методиці JORC якого склали 248 млн тон і 151 млн тон відповідно, що досить для забезпечення виробництва мінімум на 30 років. Тому при будь-яких обставинах про її закриття ніхто навіть не подумає, а для вирішення її проблем будуть залучені всі наукові ресурси.



Рисунок 2. Шахтоуправління "Покровське" групи "Метінвест" з висоти квадрокоптера

Розробка автором вимог та моделювання процесу запалювання вибухонебезпечної суміші

низьковольтним вимірювальним коло пройшли апробацію на трьох зарубіжних конференціях [9,14,15] і отримали в 2021 році зацікавленість зарубіжних колег.

Дані дослідження зараз виконуються ПТМ НАНУ в рамках держбюджетної теми «Удосконалення існуючих і створення нових технічних рішень та розробка методів розрахунку параметрів обладнання для процесів видобутку, переробки і управління операціями гірничого виробництва» Державний реєстраційний номер роботи: **0121U100693**. Виконується за постановою Бюро відділення механіки НАН України, від 22.07.2020 р., протокол № 5.

Література

1. Иохельсон З.М., Бершадский И. А. Влияние параметров искры на воспламенение метано-воздушной смеси. *Уголь Украины*. № 9. 2007. С. 44-45
2. Крижанский С.М. К теории вольтамперной характеристики столба нестационарного дугового разряда. *Журнал технической физики*. 2005. Вып.109. С. 432 -439.
3. Бершанский И.А., Иохельсон З. М., Клименко С. М. Сферическая модель воспламенения электрической искровой газовой смеси для оценки искробезопасности электрических цепей рудничного электрооборудования. *Наукові праці Дон НТУ. Сер. Електротехніка і енергетика*. Донецьк: Дон НТУ, 2006. Вип. 112. С.41-45.
4. Дульнев Г.Н., Парфенов В. Г., Сигалов А. Г. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена. М.: Высш. шк.,2000. 167с.
5. Коган А.Г. Электроизмерительная и расчетная оценка искробезопасности индуктивных электрических цепей на основе математической модели очагового зажигания рудничных газов: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.26.01./А.Г. Коган –Макеевка, 1988. 16с.
6. Бершанский И. А., Иохельсон З. М., Клименко М. С. Сферическая модель воспламенения электрической искровой газовой смеси для оценки искробезопасности электрических цепей рудничного электрооборудования. *Наукові праці Дон НТУ. Сер. Електротехніка і енергетика*. Донецьк: Дон НТУ, 2006. Вип. 112. С. 41-45.
7. Диденко В.П. Современные подходы к оценке и обеспечению искробезопасности электрических цепей. *Уголь Украины*. № 9. 2007. С. 39-42
8. Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты «Искробезопасная электрическая цепь». Технические требования и методы испытания: ГОСТ 22782.5-1985. [Введен 1980-01.-01]. М.: Изд.-во стандартов, 1985. – 70 с.
9. Lopatin V.V. Experimental studies of the possible incendiary ability of a low-voltage measuring electrical circuit [Електронний ресурс]. XXX International Mineral Processing Congress (Cape Town, 18 to 22 April 2021) Cape Town, South Africa Режим доступа до ресурсу: https://ps-vosges.fr/24353/2016_1457010189.html. (дата звернення - 09.09.2021).
10. Азатян В.В Особенности физико-химических механизмов и кинетических закономерностей горения, взрыва и детонации газов. *Кинетика и катализ*. 2020. Т. 61. № 3. С. 291-311
11. Лопатін В.В. Наукові основи розроблення системи контролю технічного стану жорсткого армування шахтних стовбурів: дис. доктора техн. наук: 05.11.13. Івано-Франківськ 2013. 392с.
12. Зенгер Н.Н. Исследование воспламенения. М.: Изд-во АН СССР. 1971. 87с.
13. Зельдерович Я.Б., Воеводский В. В., Симонов Н. Н. Вопросы теории искрового воспламенения взрывчатых газовых смесей. *Физ. хим.* 1955. Вып. 21. С. 14-32
14. Lopatin V.V. Development of requirements and modeling of the process of ignition of an explosive mixture by a low-voltage measuring circuit [Електронний ресурс]. 8-th Annual International Mining and Resources Conference + EXPO (Melbourne, 25-27 October 2021) Melbourne, Australia Режим доступа до ресурсу: <https://imarcmelbourne.com> (дата звернення – 09.09.2021).
15. Lopatin V.V. Modeling of the process of ignition of an explosive mixture at oil fields [Електронний ресурс]. 9th AFRICA 2021 OIL&GAS international triage exhibition (Nairobi 01-03 Yuly), Nairobi, Kenya, Africa. Режим доступа до ресурсу: <https://www.expogr.com/kenyaoil/https://www.expogr.com/kenyaoil> (дата звернення - 09.09.2021).

References

1. Yokhelson Z.M., Bershadskyi Y. A. Vliyanye parametrov iskry na vosplamenenye metano-vozdushnoi smesi. Uhol Ukrainy. № 9. 2007. p. 44-45
2. Kryzhanskyi S.M. K teorii volt-ampernoï charakteristiky stolba nestatsyonarnoho duhovoho razriada. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. 2005. Vyp.109. p. 432 -439.
3. Bershanskyi Y.A., Yokhelson Z. M., Klymenko S. M. Sferycheskaia model vosplameneniya elektrycheskoi iskrovoy hazovoy smesi dlia otsenki iskrobezopasnosti elektrycheskikh tsepey rudnichnoho elektrooborudovaniya. Naukovi pratsi Don NTU. Ser. Elektrotehnika i enerhetyka. Donetsk: Don NTU, 2006. Vyp. 112. p.41-45.
4. Dulnev H.N., Parfenov V. H., Syhalov A. H. Prymeneniye EVM dlia resheniya zadach teploobmena. M.: Vyssh. shk.,2000. 167p.
5. Kohan A.H. Elektroizmerytel'naya i raschetnaya otsenka iskrobezopasnosti induktyvnykh elektricheskikh tsepey na osnove matematycheskoy modeli ochahovoho zazhyhaniya rudnychnykh hazov: avtoref. dys. kand. tekhn. nauk: 05.26.01./A.H. Kohan –Makeevka, 1988. 16p.
6. Bershanskyi Y. A., Yokhelson Z. M., Klymenko M. S. Sferycheskaya model vosplameneniya elektrycheskoi iskrovoy hazovoy smesi dlia otsenki iskrobezopasnosti elektrycheskykh tsepey rudnychnoho elektrooborudovaniya. Naukovi pratsi Don NTU. Ser. Elektrotehnika i enerhetyka. Donetsk: Don NTU, 2006. Vyp. 112. p. 41-45.
7. Dydenko V.P. Sovremennyye podkhody k otsenke i obespecheniyu iskrobezopasnosti elektricheskikh tsepey. Uhol Ukrainy. № 9. 2007. p. 39-42
8. Elektrooborudovanye vzryvozhchishch-ennoye s vidom vzryvozhchity «Iskrobezopasnaya elektricheskaya tsep». Tekhnicheskyye trebovaniya i metody ispytaniya: HOST 22782.5-1985. [Vveden 1980-01.-01]. M.: Izd.-vo standartov, 1985. 70 p.
9. Lopatin V.V. Experimental studies of the possible incendiary ability of a low-voltage measuring electrical circuit [Elektronnyi resurs]. XXX International Mineral Processing Congress (Cape Town, 18 to 22 April 2021) Cape Town, South Africa Rezhym dostupu do resursu: https://ps-vosges.fr/24353/2016_1457010189.html. (data zvernennia - 09.09.2021).
10. Azatian V.V Osobennosti fiziko-khimicheskikh mekhanizmov i kynetycheskykh zakonomernostey horeniya, vzryva i detonatsii hazov. Kinetika i kataliz. 2020. T. 61. № 3. S. 291-311
11. Lopatin V.V. Naukovi osnovy rozroblenniia systemy kontroliu tekhnichnoho stanu zhorstkoho armuvannia shakhtnykh stovburiv: dys. doktora tekhn. nauk: 05.11.13. Ivano-Frankivsk 2013. 392p.
12. Zenher N.N. issledovaniye vosplameneniya. M.: Izd-vo AN SSSR. 1971. 87p.
13. Zelderovich Ya.B., Voevodskiy V. V., Simonov N. N. Voprosy teorii iskrovoho vosplameneniya vzryvchatykh hazovykh smesey. Fiz. khim. 1955. Vyp. 21. S. 14-32
14. Lopatin V.V. Development of requirements and modeling of the process of ignition of an explosive mixture by a low-voltage measuring circuit [Elektronnyi resurs]. 8-th Annual International Mining and Resources Conference + EXPO (Melbourne, 25-27 October 2021) Melbourne, Australia Rezhym dostupu do resursu: <https://imarcmelbourne.com> (data zvernennia – 09.09.2021).
15. Lopatin V.V. Modeling of the process of ignition of an explosive mixture at oil fields [Elektronnyi resurs]. 9th AFRICA 2021 OIL&GAS international triage exhibition (Nairobi 01-03 Yuly), Nairobi, Kenya, Africa. Rezhym dostupu do resursu: <https://www.expogr.com/kenyaoil>/<https://www.expogr.com/kenyaoil> (data zvernennia - 09.09.2021).