

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

Факультет оперативно-рятувальних сил

Кафедра спеціальної хімії та хімічної технології

Пояснювальна записка

**до кваліфікаційної роботи
за освітнім ступенем магістра**

на тему:

«Дослідження процесу займання і горіння горючих газів в різних окисних середовищах»

Виконав: здобувач вищої освіти 2 курсу,
групи ЗМХТ-18
спеціальності 16 «Хімічна та біоінженерія»
спеціалізація – 161 «Хімічні технології та інженерія»

Зінченко Юрій Анатолійович

Керівник: Тарахно О.В.

Рецензент:

Харків – 2020 року

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

Факультет оперативно-рятувальних сил Кафедра спеціальної хімії та хімічної технології

Освітній ступінь "Магістр"

Спеціальність 16 "Хімічна та біоінженерія"
Спеціалізація – 161 «Хімічні технології та інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник кафедри СХтаХТ
полковник служби цивільного захисту
к.т.н., доцент

Олена ТАРАХНО

“ _____ ” _____ 2020 року

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Зінченку Юрію Анатолійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження процесу займання і горіння горючих газів в різних окисних середовищах

керівник роботи Тарахно Олена Віталійовна, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом університету від “02” березня 2020 року №28

2. Строк подання студентом роботи “13” травня 2020 року

3. Вихідні дані до роботи: Книги, статті, нормативно-технічні документи, звіти про науково-дослідну роботу, дисертації, техніко-економічні нормативи та норми, преїскуранти, реферати і рецензії, опубліковані у вигляді окремих документів, а також інформація наведена на WEB-saite INTERNET

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Літературний огляд та аналіз стану досліджень запалювання і горіння горючих газів в різних окисних середовищах

2. Обґрунтування конструкції установки і методики проведення досліджень з визначення характеристик горіння газів і пари.

3. Розробка методики оцінки іскробезпечності конструкційних матеріалів.

4. Дослідження впливу фторированих вуглеводородів на характеристики горіння біластехіометричних сумішей водню і метану в окислювальному середовищі

5. Висновки та пропозиції.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень / слайдів)

1. Актуальність завдання роботи.
2. Аналіз стану досліджень запалювання і горіння горючих газів в різних окисних середовищах – 6 слайдів.
3. Дані по займистості вибухонебезпечних сумішей іскрами в процесі тертя і зіткнення металів – 2 слайди.
4. Схема експериментальної установки «Варіант»:
5. Типова крива флегматизації пального фторованим вуглеводнем
6. Визначення характеристик горіння білястехіометричних сумішей виду $H_2-(O_2+N_2)$ - фторований вуглеводень в замкнутому посуді – 2 слайди
7. Висновки та пропозиції.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 02.03.2020р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	08.03.2020	
2	Літературний огляд та аналіз стану досліджень запалювання і горіння горючих газів в різних окисних середовищах	13.03.2020	
3	Обґрунтування конструкції установки і методики проведення досліджень з визначення характеристик горіння газів і пари.	20.03.2020	
4	Розробка методики оцінки іскробезпечності конструкційних матеріалів.	30.03.2020	
5	Дослідження впливу фторированих вуглеводородів на характеристики горіння білястехіометричних сумішей водню і метану в окислювальному середовищі	10.04.2020	
6	Висновки та пропозиції	20.04.2020	
7	Виконання графічної частини	13.05.2020	

Здобувач вищої освіти _____ Юрій ЗІНЧЕНКО
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Олена ТАРАХНО

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗАПАЛЮВАННЯ І ГОРІННЯ ГОРЮЧИХ ГАЗІВ В РІЗНИХ ОКИСНИХ СЕРЕДОВИЩАХ.....	8
1.1 Вплив флегматизаторів різної хімічної природи на характеристики горіння горючих газів і парів в різних окисних середовищах	8
1.2. Вплив фрикційних іскор на можливість займання горючих парагазових сумішей.....	18
РОЗДІЛ 2. ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ УСТАНОВКИ І МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ З ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРІННЯ ГАЗІВ І ПАРИ	46
2.1 Аналіз існуючих методів визначення характеристик горіння парагазових сумішей.....	46
2.2 Методика визначення характеристик горіння горючих газових сумішей складного складу	50
Розділ 3. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ОЦІНКИ ІСКРОБЕЗПЕЧНОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ	55
Розділ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФТОРИРОВАНИХ ВУГЛЕВОДОРОДІВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРІННЯ БІЛЯСТЕХІОМЕТРИЧНИХ СУМІШЕЙ ВОДНЮ І МЕТАНУ В ОКИСЛЮВАЛЬНОМУ СЕРЕДОВИЩІ	59
4.1 Визначення характеристик горіння білястехіометричної воднево- повітряної суміші в замкнутому посуді.....	59
4.2 Визначення характеристик горіння білястехіометричних сумішей виду Н ₂ -(О ₂ +N ₂) - фторований вуглеводень в замкнутому посуді	59
ВИСНОВКИ.....	67
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ.....	68
ДОДАТКИ	76

					НУЦЗУ.2. 25-13-128.СХтаХТ.РПЗ-01					
Зм.	Аркуш	№ документа	Підпис	Дата						
Розробив	Зінченко Ю.А.				Дослідження процесу займання і горіння горючих газів в різних окисних середовищах			Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірів	Тарахно О.В.							М	Р	Р
Н. контр					ЗМХТ-18					
Затвердив	Тарахно О.В.									

ВСТУП

Актуальність проблеми. Нафтогазова галузь відіграє, важливу роль в економіці держави. Проте в той же час підприємства цієї галузі є найбільш пожежовибухонебезпечними в порівнянні з підприємствами інших галузей економіки, що обумовлено як властивостями речовин, з якими вони мають справу (нафта, газ і продукти їх переробки), так і з параметрами технологічних процесів, в яких обертаються ці продукти (підвищений тиск і температури). Підприємства галузі характеризуються високою ймовірністю аварій з утворенням горючих парогазових сумішей, здатних вибухати при впливі на них джерел запалювання. В якості ефективних засобів запобігання руйнівним наслідкам промислових вибухів, за якими зазвичай йдуть не менше руйнівні пожежі, слід розглядати як запобігання утворенню горючих газових сумішей, так і зниження ймовірності взаємодії з ними джерел запалювання. Важливим комплексом заходів щодо зниження наслідків вибухів є застосування засобів вибухозахисту, зокрема, введення в горючу суміш негорючого флегматизатора, який може в залежності від своєї кількості зробити суміш негорючою, так і істотно знизити параметри аварійного вибуху. Серед цих параметрів слід відзначити максимальний тиск вибуху, швидкість наростання тиску вибуху і нормальну швидкість горіння.

Раніше в якості ефективних засобів вибухопередження або вибухозахисту використовували бромовані хладони. Однак після прийняття відомої Монреальської конвенції про захист озонового шару Землі їх застосування істотно обмежено [1, 2]. В якості заміників бромованих хладонів у всьому світі стали широко використовувати фторовані вуглеводні [3]. Особливості їх застосування для флегматизації горючих сумішей, в яких окиснювачем є повітря, описані в літературі досить докладно [4, 5]. Однак якщо вміст кисню в окислювальному середовищі відрізняється від відповідної величини в повітрі, що характерно для нафтогазопереробних виробництв, то для цього випадку наявні в літературі дані вельми нечисленні і охоплюють в основному парогазові суміші біляграничного

					НУЦЗУ.2. 25-13-128.СХтаХТ.РПЗ-01	Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		5

складу. Параметри горіння білястехіометричних сумішей обмежуються тільки випадком повітря як окислювального середовища.

Серед джерел запалювання, характерних для підприємств нафтогазової галузі, слід зазначити в якості одного з основних іскри удару і тертя (фрикційні іскри). В області вивчення запалювання парогазових сумішей фрикційними іскрами є досить велика кількість робіт як вітчизняних, так і зарубіжних вчених [6]. Однак до цього часу не створено ні вітчизняного, ні міжнародного стандарту щодо визначення запалювальної здатності фрикційних іскор. Це говорить про недостатню вивченість питання запалювання парогазових сумішей іскрами удару і тертя.

З викладеного вище випливає, що тема даної роботи, спрямованої на вирішення згаданих завдань, є актуальною.

Метою роботи є підвищення пожежовибухобезпеки підприємств нафтогазової галузі шляхом удосконалення методики оцінки іскробезпеки конструкційних матеріалів технологічного обладнання та обґрунтування умов застосування способу флегматизації горючих парогазових сумішей фторованими вуглеводнями в різних окисних середовищах.

Для досягнення поставленої мети ставляться такі завдання:

1) вивчити вплив фторованих вуглеводнів на характеристики горіння білястехіометричних сумішей метану і водню в окислювальних середовищах, що представляють собою повітря, а також суміші азоту і кисню, містять 15 і 25% (об.) O_2 ;

2) вивчити вплив виду пального газу і конструкційного матеріалу на запальну здатність фрикційних іскор

Новизна роботи полягає в тому, що:

- виявлено роль концентрації кисню в окислювальному середовищі і виду фторованого флегматизатора на характеристики пожежовибухонебезпеки білястехіометричних сумішей горючих газів (максимальний тиск вибуху, максимальна швидкість наростання тиску вибуху, нормальна швидкість горіння);

- на прикладі ацетіленоповітряних сумішей показано, що найбільш легкозаймистий фрикційними іскрами склад горючої суміші може бути не бідним, як це було прийнято вважати, а збагаченим.

Теоретична і практична значущість роботи полягає в тому, що виявлено подвійну роль фторованих вуглеводнів як промоторів і інгібіторів горіння білястехіометричних газових сумішей; виявлено роль вмісту кисню в окислювальному середовищі і виду фторованого флегматизатора на характеристики горіння білястехіометричних газових сумішей.

Застосування результатів роботи дозволить підвищити пожежовибухобезпеку підприємств нафтогазової галузі шляхом зниження ймовірності займання горючих газових сумішей, що утворюються в результаті можливих аварій, за рахунок використання іскробезпечних конструкційних матеріалів, а також зменшення наслідків аварійних вибухів при флегматизації зазначених сумішей фторованими вуглеводнями.

					Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	7

НУЦЗУ.2. 25-13-128.СХтаХТ.РПЗ-01

РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗАПАЛЮВАННЯ І ГОРІННЯ ГОРЮЧИХ ГАЗІВ В РІЗНИХ ОКИСНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

1.1 Вплив флегматизаторів різної хімічної природи на характеристики горіння горючих газів і парів в різних окисних середовищах

Питанню впливу флегматизаторів різної хімічної природи на характеристики горіння сумішей горючих газів і парів в різних окисних середовищах присвячено значну кількість досліджень. При цьому основними характеристиками, яким приділяється найбільша увага при розгляді зазначеного питання, є верхній і нижній концентраційні межі розповсюдження полум'я, нормальна швидкість горіння, мінімальна енергія запалювання, граничний початковий тиск, при якому можливе поширення полум'я. при розповсюдженні полум'я в замкнутому просторі також розглядаються максимальний тиск вибуху і максимальна швидкість наростання тиску вибуху. У разі присутності в суміші флегматизуючого компонента беруться до уваги такі характеристики горіння, як мінімальна флегматизуюча концентрація (МФК) і мінімальний вибухонебезпечний вміст кисню (МВВК). Нижче розглянуті публікації в науковій літературі, які були присвячені визначенню характеристик горіння попередньо перемішаних сумішей виду пальне - окислювальне середовище - флегматизатор. При цьому основна увага приділяється фторованим паливом і флегматизаторам.

В роботах [7-8] досліджені концентраційні межі поширення полум'я фторованих похідних бензолу (C_6H_6) в окислювальних середовищах у вигляді чистого кисню і сумішей азоту з киснем. Поширення полум'я вивчали у вертикальній скляній трубці (висота $h = 30$ см, діаметр основи $d = 2,5$ см), відкритої з нижнього кінця. Відстань між електродами становило 0,3 см. Напруга при розряді дорівнювало 70 кВ. Приймали, що має місце поширення полум'я, якщо фронт горіння поширювався від нижнього торця до верхнього. Визначено верхні і нижні

					Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	8

концентраційні межі поширення полум'я фторованих похідних бензолу в повітрі, а також у випадку окислювальних середовищ у вигляді сумішей кисню з азотом. Знайдено, що якщо число атомів фтору в з'єднанні перевищує 4, то речовина виду C_xF_x не горить в повітрі.

В роботі [9] досліджено горіння сумішей перфторциклобутана (C_4F_8) з киснем. Раніше було виявлено, що C_4F_8 горить в кисні в трубці в діапазоні концентрацій від 27 до 55% (об.). Визначено, що нормальна швидкість горіння суміші $C_4F_8 + O_2$ має максимум для найбільшої термодинамічно рівноважної концентрації атомів фтору (F), а не в разі найбільшої адіабатичної температури горіння (T_{ad}).

В роботі [10] досліджено горіння вуглеводнів і фторзамісних вуглеводнів в сумішах з трифторид азоту (NF_3) і сумішшю кисню і NF_3 . Вивчено продукти горіння наступних сумішей: 1) $H - C_4H_{10} - NF_3$; 2) $H - C_4H_{10} - NF_3 - O_2$; 3) $CH_2 = CF_2 - O_2$; 4) $C_2F_6 - O_2 - H_2$. Запалювання сумішей проводили шляхом перепалювання проволочки завдовжки 10 мм. Аналіз продуктів згорання проводили за допомогою маспектрометра. Знайдено, що: 1) атоми F реагують з молекулою пального переважно шляхом відриву атомів H, даючи HF; 2) зв'язок C - F не утворюється до тих пір, поки весь атомарний водень (H) не прореагує з атомарним фтором; 3) якщо є надлишкова атомарний фтор (після утворення HF), то при високих температурах близько 2500 K утворюється діоксид вуглецю (CO_2) молекулярний фтор (F_2), а при охолодженні суміші до температур близько 1700 K весь атомарний фтор переходить в CF_4 .

В роботі [11] чисельно досліджені залежності нормальної швидкості горіння сумішей виду $H_2 - O_2 - N_2$ від початкового тиску, температури і концентрації кисню (O_2) в суміші з азотом (N_2). Для розрахунку був використаний механізм з 21 реакції, 3 з яких описують утворення оксиду азоту в полум'ї NO. Проведений розрахунок показав, що нормальна швидкість горіння (S_u) лінійно залежить від максимальної по фронту полум'я концентрації атомів водню $[H]_{max}$. Знайдено, що хімічна рівновага дотримується лише для високих температур (вище 1500 K).

					НУЦЗУ.2. 25-13-128.СХтаХТ.РПЗ-01	Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		9

В роботі [12] досліджено ефект позитивного синергізму суміші 1,2 - тетрафтордіброметану ($C_2F_4Br_2$) з азотом (N_2) по відношенню до полум'я попередньо перемішаної суміші метану з повітрям. Виявлено, що у випадку використання суміші $C_2F_4Br_2 - N_2$ замість $C_2F_4Br_2$ різко підвищується флегматизуюча ефективність 1,2 - тетрафтордіброметану.

В роботі [13] досліджені полум'я сумішей перфторвуглеводнів з киснем, стабілізовані на круглому пальнику. Методом пальника були отримані залежності нормальної швидкості горіння $S_{н}$ від концентрації пального для таких речовин, як перфторетілен (C_2F_4) і перфторбутілен (C_4F_8) Були обчислені рівноважні склади продуктів згорання і адіабатичні температури горіння. Отримано, що для повністю фторованих вуглеводнів, досліджених в даній роботі, максимальна нормальна швидкість горіння ($S_{н \max}$) не корелює з максимальною адіабатичною температурою горіння ($T_{ад \max}$), проте корелює з максимальним значенням термодинамічно рівноважної концентрації атомів фтору (F).

В роботі [14] визначені нормальні швидкості горіння біляграничних сумішей пропану (C_3H_8) з повітрям і бромистим воднем (HBr). Експерименти проводили в трубці діаметром 5 см. Видиму швидкість поширення полум'я фіксували фотодатчиками. За допомогою обробки фотографій полум'я визначали нормальну швидкість горіння. Отримано, що незалежно від концентрації пропану і гідриду броду в суміші на межі поширення полум'я всі суміші мають одну і ту ж видиму і нормальну швидкість горіння, в той час як адіабатичні температури горіння істотно різні.

В роботі [15] досліджено вплив малих добавок водню на нормальну швидкість горіння метаноповітряного і пропаноповітряного полм'я. Нормальні швидкості горіння визначалися методом пальника. Отримано прості емпіричні вирази для розрахунку нормальної швидкості горіння сумішей виду $CH_4 -$ повітря і $C_3H_8 -$ повітря.

В роботі [16] досліджувалися характеристики горіння сумішей оксиду вуглецю (CO) з киснем і вуглекислим газом. Експерименти по визначенню таких

					НУЦЗУ.2. 25-13-128.СХтаХТ.РПЗ-01	Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		10

характеристик горіння, як нормальна швидкість поширення полум'я (S_u), максимальний тиск вибуху ΔP_{\max} , максимальна швидкість наростання тиску вибуху (dP/dt) $_{\max}$ проводилися в сферичному реакційному посудині діаметром $d = 140$ мм. Горючу суміш запалювали перепалювання ніхромової проволочки діаметром 0,15 мм. При цьому виділялася енергія близько 5-10 Дж. Початковий тиск варіювали в діапазоні від 0,1 до 0,7 МПа.

В роботі [17] визначено характеристики горіння в замкнутій посудині газоподібних фторованих агентів і їх сумішей. Отримано значення таких характеристик горіння, як відношення максимального тиску вибуху до початкового (P_{\max} / P_0) і максимальна швидкість наростання тиску вибуху (dP/dt) $_{\max}$. Досліди проводили в вертикальному циліндрі діаметром $d = 48$ мм і об'ємом $V = 344$ мл при початкових тисках (P_0) 0,6 і 2,0 МПа. Початкова температура становила $T_0 = 80^\circ\text{C}$. Як окислювач використовувалося повітря. Горючі суміші готували безпосередньо в реакційному посуді з парціальним тиском. Суміші запалювалися розпеченою тканинною стрічкою з вуглецевого волокна довжиною 50-60 мм і шириною 7-9 мм. Поширення полум'я реєстрували по підвищенню тиску датчиком ДД-10. Як палне використовувалися такі речовини: тетрафторетилен (C_2F_4); етилен (C_2H_4); дифторетилен ($\text{C}_2\text{F}_2\text{H}_2$); перфторпропілен (C_3F_6); перфторетілвініловий ефір ($\text{CF}_3\text{-O-C}_2\text{F}_3$). Отримано, що найбільш небезпечні суміші $\text{C}_2\text{F}_4\text{-C}_2\text{H}_4$. У таких сумішах P_{\max}/P_0 може зрости вдвічі в порівнянні з сумішшю C_2F_4 - повітря.

В роботі [18] чисельно досліджена інгібіруюча ефективність деяких галогенованих вуглеводнів. Запропоновано метод групових інкрементів для оцінки інгібуючої ефективності. Чисельними методами моделювалася динаміка поширення полум'я стехіометричних сумішей з повітрям таких газів, як CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , CH_3OH при початковому тиску $P_0 = 0,1$ МПа і початкової температурі $T_0 = 298$ К. Вивчено вплив наступних інгібіторів: CF_3H , C_2HF_5 , C_2F_6 , CF_4 , CF_3Br , CF_3I . Враховано процеси дифузії, теплопровідності і детальна хімічна кінетика (700 реакцій між 80 частками). Отримано емпірична кореляція для нормальної швидкості горіння (S_u). Запропоновано параметр для оцінки ефективності інгібітору (Φ), для якого

знайдена емпірична кореляція, що враховує групові складові основних проміжних інгібіруючих продуктів, які утворюються в полум'ї при наявності в вихідній суміші зазначених вище флегматизуючих агентів. Автори, виходячи з результатів розрахунків, спробували виділити фізичну і хімічну складові впливу агента. Отримано, що хімічний фактор падає з ростом концентрації інгібітору. Як перспективний інгібітор автори пропонують суміш ефективного хімічного агента і газу з високою мольною теплоємністю. Склад такого інгібітора визначається концентрацією насичення хімічного агента (тобто концентрацією, вище котрої зростання впливу інгібітора стає малий).

В роботі [19] проведено чисельне моделювання впливу фторованих інгібіторів і інертних газів на хімічну кінетику горіння метану в проточному реакторі ідеального змішування. Автори використовували параметри проточного реактора ідеального змішування для оцінки ефективності інгібірування. Знайдено, що в якості такого параметра можна використовувати відношення концентрацій $CO_2/(CO+CO_2)$ в області гасіння на виході з реактора.

В роботі [20] експериментально вивчено вплив інгібітора АКАМ на розповсюдження детонаційної хвилі (ДВ) в водородоповітряній суміші в трубі діаметром $d = 83$ мм і довжиною $l = 2900$ мм. Знайдено, що при вході ДВ в інгібіровану суміш відбувається відрив ударної хвилі від фронту хімічної реакції, тобто йде розпад детонаційної хвилі. Визначена концентраційна область стійкої ДВ при тиску $p = 0.1$ МПа в сумішах з різним вмістом інгібітора АКАМ.

В роботі [21] вивчався вплив повністю фторованих вуглеводнів на концентраційні межі поширення полум'я в сумішах метану з повітрям, тетрагідрат кремнію з азотом, фтору з азотом. Використовувався реакційний посуд у вигляді циліндра діаметром $d = 100$ мм і довжиною $l = 100$ мм. Енергія запалювання становила близько 300 Дж. Знайдено, що на суміші метану з повітрям повністю фторовані вуглеводні надають інгібуючу дію в разі багатих сумішей і промотуючих для випадку бідних сумішей, за винятком CF_4 . Виявлено, що повністю фторовані вуглеводні є окислювачем для тетрагідрату кремнію, причому флегматизуюча

					НУЦЗУ.2. 25-13-128.СХтаХТ.РПЗ-01	Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		12

концентрація азоту для такого роду сумішей становить значну величину (58% (об.) В разі C_2F_6 і близько 85% (об.) Для C_4F_{10} , C_6F_{14} , C_8F_{18}). Показано, що фтор є окислювальним середовищем навіть для фторованих вуглеводнів, причому флегматизуюча концентрація азоту для таких сумішей є значною (68% (об.) в разі C_2F_6 і порядку 90% (об.) для C_4F_{10} , C_6F_{14} , C_8F_{18}). Відносно кривих флегматизації для сумішей CH_4 - повітря - $C_m F_{2m+2}$ має місце закономірність: чим вище m , тим нижче флегматизуюча концентрація, що обумовлено певною мірою впливом мольної теплоємності флегматизатора. Однак C_4F_{10} має мольну теплоємність на 80% вище, ніж C_2F_6 , а його флегматизуюча концентрація менше лише на 20%, тобто істотний не тільки теплової, а й хімічний фактор.

В роботі [22] експериментально визначалися концентраційні межі поширення полум'я сумішей метан - повітря - фторовані вуглеводні (HFC), а також вивчена залежність максимального тиску вибуху (ΔP_{max}) метано-повітряної суміші в замкнутому посудині від змісту HFC в них.

Реакційний посудину був вертикальний циліндр з нержавіючої сталі діаметром $d = 100$ мм і висотою $h = 100$ мм. Запалювання сумішей виконували за допомогою електричної іскри на відстані 50 мм від нижнього днища. Тиск реєструвалося датчиком тиску з подачею сигналу на цифровий осцилограф. Суміші задавали по парціальним тискам в попередньо відвакуумованому змішувачі. Енергія запалювання становила приблизно 300 Дж. Як пальне використовували CH_4 , як флегматизаторами: CHF_3 , C_3HF_7 , C_4F_{10} , CF_4 , C_2F_6 , C_3F_8 , CF_3Br . Окислювач - повітря.

Отримано, що нижня концентраційна межа поширення полум'я (НКМР) метану знижується при добавці CHF_3 . Якісно аналогічний ефект спостерігали для C_3F_8 , C_4F_{10} , CH_2F_2 і C_3F_7H . На залежності максимального тиску вибуху (ΔP_{max}) від концентрації флегматизатора спостерігався максимум в разі CF_3H і CF_3I . Дані криві флегматизації для C_2F_6 , C_3H_8 , C_4F_{10} , для яких флегматизуюча концентрація становила 10-12% (об.). Показано, що CH_2F_2 є пальним газом, мають НКМР близько 11% (об.).

В роботі [23] було проведено пошук складів виду $\text{CO}_2(\text{N}_2)$ - галоїдовуглеводні (CF_3Br , $\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$, CF_3I), ефективних з точки зору флегматизації попередньо перемішаних метаноповітряної пламен. Відзначено, що в літературі дані по МФК галоїдоуглеводороди сильно занижені, так як для їх визначення використовувалися малопотужні джерела запалювання.

Експерименти були проведені в сферичній камері об'ємом 9,8 л при кімнатній температурі і атмосферному тиску. Ініціювання горіння проводилося в нижній частині камери на відстані 30-40 мм від стінки перепалювання мідної проволочки діаметром $d = 0,1$ мм і довжиною 6 мм при подачі напруги $U = 270$ В від конденсатора ємністю 10400 мкФ (виділяється енергія становила приблизно 100 Дж). Поширення полум'я реєструвалося датчиком тиску ДД-10. критерієм поширення полум'я було підвищення тиску на 20 кПа. вивчали складові флегматизатори - суміші $\text{CO}_2(\text{N}_2)$ і CF_3Br , $\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$ або CF_3I - по відношенню до горіння метано-повітряної суміші.

Отримано, що МФК складів CO_2 - інгібітор по відношенню до горіння метано-повітряної суміші різко падає при збільшенні концентрації інгібітора в складі до 16% (об.) в разі $\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$ і 18% (об.) в разі CF_3Br , і залишається далі майже незмінною.

Досліди зі складом $\text{N}_2\text{-CF}_3\text{I}$ проводили при кімнатній температурі і атмосферному тиску в скляному вертикальному циліндрі діаметром $d = 80$ мм висотою $h = 240$ мм. Для запобігання руйнуванню реакційного посуду від надлишкового тиску, що розвивається при горінні, дно посудини залишалось відкритим. Запалювання проводилося за допомогою розпеченої спіралі з молібденового дроту діаметром $d_{\text{др}} = 0,2$ мм і її довжиною $l_{\text{др}} = 142$ мм, діаметр спіралі $d_{\text{сп}} = 3$ мм, довжина кроку спіралі $l_{\text{сп}} = 10-80$ мм. Розігрів спіралі здійснювався за допомогою подачі напруги $U = 230$ В через конденсатор ємністю $C = 1400$ мкФ. Розрахункова температура спіралі становила $T = 2400$ °С. Поширення полум'я реєстрували візуально.

Отримано, що МФК складу $N_2 - CF_3 I$ по відношенню до горіння метано-повітряної суміші різко падає від 40 до 15% (об.) при збільшенні концентрації інгібітора у складі до 16% (об.), а потім спостерігається зростання МФК до 50% (об.). Спостережуваний ефект пояснений участю $CF_3 I$ в горінні з додатковим виділенням тепла.

Визначена концентраційна область поширення полум'я в сумішах виду $CH_4 - CF_3 I -$ повітря. Залежно верхньої концентраційної межі поширення полум'я (ВКПР) від змісту $CF_3 I$ в суміші спостерігається максимум при концентрації $[CF_3 I] = 18\%$ (об.), при цьому концентрація CH_4 на межі становить $[CH_4] = 33\%$ (об.). Отримано, що $CF_3 I$ горить в повітрі, причому його нижній і верхній концентраційні межі поширення полум'я складають відповідно: $3 НКПР = 33,5\%$ (об.), $3 ВКПР = 61,5\%$ (об.).

Максимальний тиск вибуху (ΔP_{max}) і максимальну швидкість збільшення тиску вибуху ($(dP/dt)_{max}$) для сумішей $CF_3 I - CH_4 -$ повітря визначали в посудині об'ємом 0,325 л (діаметр $d = 48$ мм). Запалювання виробляли на відстані 30-35 мм від нижнього торця.

Отримано, що при концентраціях $CF_3 I$ менше 2% (об.) $(dP/dt)_{max}$ різко падає, а при концентраціях $CF_3 I$ більше 2% (об.) $(dP/dt)_{max}$ зростає, досягаючи максимуму при $[CF_3 I] = 17\%$ (об.). Зростання $(dP/dt)_{max}$ викликаний, мабуть, вигоранням $CF_3 I$ в надмірному в порівнянні з метаном кисні. При 17% (об.) $CF_3 I$ відбувається, ймовірно, досягнення стехіометрического співвідношення між CH_4 , $CF_3 I$ і O_2 .

Запропоновано пояснення отриманих ефектів на основі участі $CF_3 I$ у додатковому тепловиділенні. Представлений ряд реакцій, з якого випливає, що $CF_3 I$ може виступати в якості пального при надлишку кисню, а також як окислювач при нестачі кисню. Для точки флегматизації при горінні CH_4 в повітрі с допомогою складу $N_2 - CF_3 I$ ($[CH_4] = 4,1\%$ (об.)) теплота згорання з урахуванням запропонованих реакцій виявляється в 2 рази вище в порівнянні з випадком розгляду $CF_3 I$ в якості хімічно інертного компонента.

					НУЦЗУ.2. 25-13-128.СХтаХТ.РПЗ-01	Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		15

В роботі [24] розглянуто вплив розмірів і форми реакційних судин на концентраційні межі поширення полум'я (КПР) в метаноповітряної і пропаноповітряної суміші. Тим самим вирішується питання про те, якої форми і розмірів повинен бути реакційний посуд, щоб моделювати розповсюдження полум'я по парогазовій суміші у вільному просторі. КПР часто залежать від розмірів і форми реакційного судини і потужності джерела запалювання. Раніше, в ряді робіт встановлено, що електрична іскра і дріт, що перепалюється, дають надійне запалювання біляграничних сумішей.

Були проведені досліди з судинами різних діаметрів і форм. Циліндричні судини перед запалюванням з'єднувалися з атмосферою в нижній частині. Сферичний посудину має у верхній частині пластиковий фланець, який при горінні в посудині видаляється під дією продуктів горіння. всі судини мали у днищі вольфрамові електроди для ініціювання горіння електричної іскрою.

Суміші задавали безпосередньо в реакційних посудинах по парціальним тискам з перемішуванням вентилятором протягом 10 хв. поширення полум'я реєстрували відеокамерою і датчиками тиску. В якості горючих газів використовувалися метан і пропан.

Виявилося, що максимальна концентраційна область поширення полум'я для циліндричних судин реалізується при $d = 5$ см і висоті h до 40 см як для CH_4 , так і для C_3H_8 . Причому чим більше діаметр, тим вужча концентраційна область поширення полум'я. Максимальна різниця була зафіксована для ВКПР метану і склала 2% (об.). для циліндра з $d = 5$ см і $h = 150$ см була отримана найменша концентраційна область поширення полум'я.

У роботах [25-28] проведено експериментальне визначення концентраційних меж поширення полум'я в сумішах горючий газ (Метан, водень) - закис азоту - фторований вуглеводень (тріфтометан (CHF_3), пентафторетан (C_2HF_5), перфторбутан (C_4F_{10})). експериментальні дослідження і обробка отриманих даних проводилися на установці, описаної в роботах. Виявлено суттєво нижчі за срав- рівняно з горінням в повітрі значення нижніх концентраційних меж поширення

					НУЦЗУ.2. 25-13-128.СХтаХТ.РПЗ-01	Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		16

полум'я і помітно вищі величини верхніх концентраційних меж. Склади сумішей в точках флегматизації (мис концентраційного півострова поширення полум'я) характеризуються низькими значеннями коефіцієнта надлишку пального ϕ (в більшості випадків $\phi < 0,1$), в той час як для випадку горіння в повітрі і азотокисневому середовищі з вмістом O_2 в 25% (об.) величини ϕ , як правило, перевищують 0,5. Встановлено, що флегматизуючі концентрації фторованих вуглеводородів при горінні метану і водню в закису азоту мають близькі значення, на відміну від горіння в окислювальних середовищах, що складаються з азоту і кисню.

В роботі [29] шляхом чисельного моделювання поширення плоского полум'я з детальним урахуванням хімічної кінетики і процесів переносу вивчено вплив бромистого водню на нормальну швидкість горіння водню і метану з повітрям, закисом азоту і азотокисневою сумішшю з вмістом O_2 33% (об.). Знайдено, що бідні метано-повітряній суміші інгібуються більш ефективно, ніж багаті, в той час як для водородо-повітряних сумішей, спостерігається зворотна тенденція. Виявлено істотно нижча інгібуюча ефективність HBr по відношенню до полум'я з закисом азоту в порівнянні з полум'ям як повітряних сумішей, так і сумішей, в яких окислювачем є азотокисневий склад, що містить 33% (об.) O_2 .

Таким чином, за результатами проведеного аналізу впливає висновок, що в літературі представлена велика кількість значних за обсягом проведених досліджень, присвячених впливу фторованих вуглеводородів на горіння парогазових сумішей складного складу, але при цьому вплив зазначених фторованих агентів на горіння білястехіометричних газових сумішей, в яких окислювальне середовище має відмінне від повітря (підвищений або знижений) вміст кисню, в літературі описано недостатньо.

1.2. Вплив фрикційних іскор на можливість займання горючих парогазових сумішей

Відомо, що фрикційні частинки, що утворюються в результаті відносного переміщення двох контактуючих поверхонь, залежно від їх дисперсності, початкової температури, наявності окислювача і інших факторів можуть розігріватися до температури видимого світіння. Частинки речовини, що утворюються в результаті тертя або зіткнення і розпечені до температури видимого світіння, прийнято називати фрикційними іскрами. Фрикційні іскри, які утворюються при терті або зіткненні робочих частин технологічних машин і механізмів, а також при виконанні обслуговуючим персоналом технологічних і ремонтних робіт, є одним з поширених джерел запалювання вибухонебезпечних середовищ.

Згідно [30] за період з 1886 по 1986 рр. з 122 найбільших аварій на виробництвах нафтогазової галузі, 74 - це аварії з пожежами та вибухами. При цьому, хоча виявлення справжнього джерела запалювання при дуже великих аваріях утруднено, не менше чверті пожеж і вибухів обумовлено фрикційними іскрами. У Західній Німеччині з 1965 по 1985 рр. мали місце 426 вибухів [31]. Основною причиною названо механічні іскри - 26%.

Процеси іскроутворення, а, отже, і запалює здатність фрикційних іскор, в значній мірі визначаються режимами тертя і зіткнення. Тому процес іскроутворення і запалювання горючих парогазових сумішей проводяться на установках, в яких моделюються реально існуючі умови.

Більшість процесів іскроутворення можна моделювати на установках двох типів: копрових і з обертовими елементами. У перших установках зазвичай відтворюються процеси іскроутворення, що мають місце при вільному падінні вантажу на нерухомі деталі, у других установках імітуються процеси іскроутворення, що мають місце при терті, що ковзають ударах, шліфуванні і подібних операціях.

					НУЦЗУ.2. 25-13-128.СХтаХТ.РПЗ-01	Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		18

Дослідження В.С. Кравченко [32] показали, що займання газоповітряній суміші електричними розрядами з енергією, близькою до критичної, повторюються не систематично і носять імовірнісний характер. Експериментально встановлена і теоретично обґрунтована в роботі [32] лінійна залежність в логарифмічному масштабі між основним фактором, визначаючим займання, і ймовірністю займання, покладена в основу статистичного методу оцінки вибухобезпеки фрикційного іскріння [33, 341].

Фрикційні іскри, що утворюються при терті і ударі, мають певне розсіювання по дисперсності, початковій температурі, хімічним складом і швидкості переміщення. Крім того, в експериментах має місце певний розкид механічних факторів і стану газової середовища. У кожному конкретному досвіді неможливо врахувати всі ці величини, що, в кінцевому рахунку, визначає вірогідну картину запалювання горючих сумішей.

Очевидно, чим менше ймовірність загоряння, тим рідше виникають умови при даному режимі тертя і зіткнення, при якому утворюються фрикційні частинки, здатні виділити в елементарний об'єм горючої суміші енергію, перевищує її мінімальну енергію запалювання.

Визначення запалює здатності фрикційних іскор зазвичай проводиться статистичним методом. Імовірність займання визначається як відношення числа запалювання до кількості зіткнень (кількістю проведених дослідів):

$$Z = \frac{m}{n} \quad (1.1)$$

де m - кількість запалювання; n - кількість проведених дослідів (загальне кількість зіткнень при проведенні експериментів для отримання m – запалювань).

Кількість зіткнень під час проведення випробувань на установці з елементами, що обертаються підраховується за формулою:

$$n = fk \sum \tau \quad (1.2)$$

де f - частота обертання елемента, 1/с; k - кількість співударяючихся елементів на обертовому елементі; $\sum \tau$ - загальний час роботи механізму при проведенні випробувань, с.

За одне зіткнення при безперервному терті приймається шлях ковзання, рівний 0,5 м, а при проведенні випробувань на копровій установці - одне падіння вантажу.

Кількість експериментів має бути достатнім для отримання стійкої частоти запалювання в даному режимі тертя і зіткнення. Змінюючи режими тертя і зіткнення (швидкість ковзання, енергію зіткнення) або концентрацію окислювача в газовому середовищі, визначають умови, при яких не утворюються фрикційні іскри, здатні запалювати горючі суміші. на основі отриманих результатів випробувань оцінюється безпеку застосування матеріалів для різних вузлів механічного обладнання, конструкцій, інструментів.

З підвищенням вмісту кисню в середовищі збільшується швидкість окислення і температура іскор, що утворюються при терті і зіткненні металів. У вибухонебезпечних сумішах з повітрям з підвищенням вмісту пального знижується кількість кисню, що зменшує температуру фрикційних іскор (Джерел запалювання). У свою чергу, залежність між концентрацією пального в суміші і мінімальною енергією запалювання має вигляд параболи з мінімумом в точці, близької до стехіометричного складу.

Для визначення оптимальних умов запалювання горючих сумішей в залежності від концентрації пального і кисню в суміші розглянемо криві, відповідні тепловиділенню фрикційних іскор, спільно з кривою Залежно мінімальної енергії запалювання від змісту пального.

На рис 1.1 зображені криві 1, 2, 3 характеризують тепловиділення іскор з початковою температурою $T_1 > T_2 > T_3$ в сумішах з різним вмістом пального.

					Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	

Крива 4 представляє собою залежність мінімальної енергії запалювання від змісту пального.

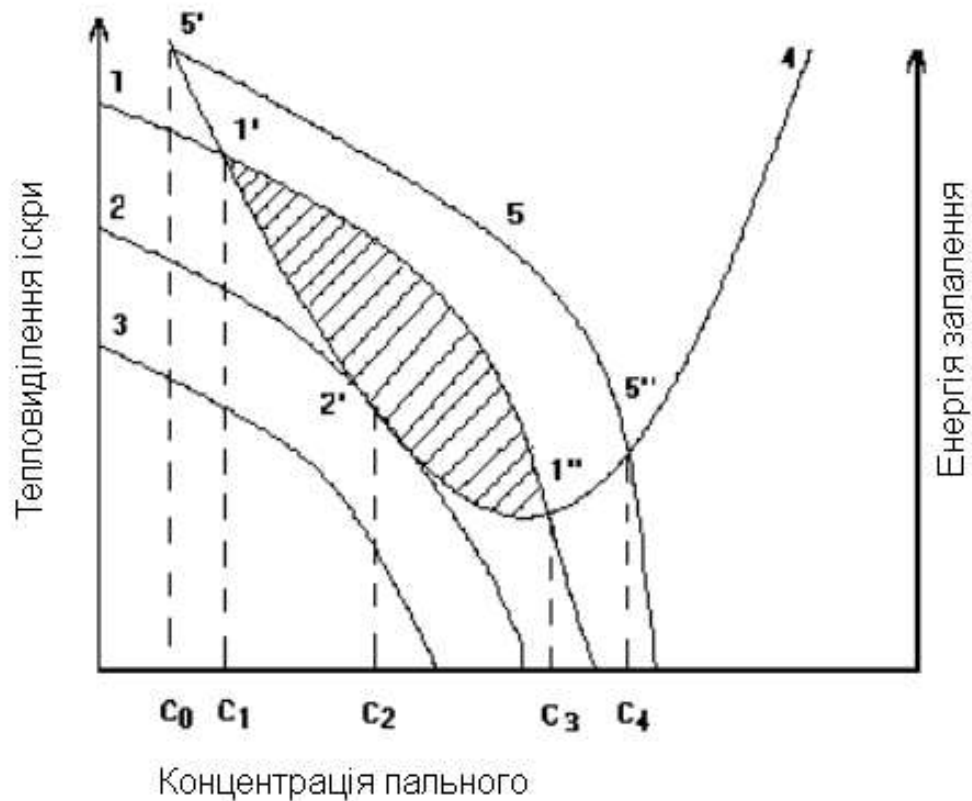


Рис 1.1 - Визначення оптимального складу газоповітряної суміші при запалюванні її фрикційними іскрами

Як видно з рис. 1.1, крива 1 перетинає криву 4 в двох точках. Точка 1' відповідає бідній горючій суміші з концентрацією горючої C_1 , а точка 1'' відповідає багатій суміші з концентрацією горючої C_3 .

В області, заштрихованій на рис. 1.1, тепловиділення іскри перевищує мінімальну енергію запалювання відповідної суміші, і горючі суміші можуть займатися. У разі утворення фрикційних іскор з більш низькою початковою температурою тепловиділення буде меншим в одних і тих же сумішах пального з повітрям. При деякій початковій температурі частинок, рівній T_2 , крива тепловиділення 2 стосується кривої 4 в точці 2', відповідної бідній горючій суміші

з концентрацією горючої C_2 . крива тепловиділення 3 не перетинається з кривою 4 отже, частки з початковою температурою T_3 виділяють кількість тепла, недостатнє для запалювання горючої суміші з повітрям будь-якого складу. Точки $1'-1'$ обмежують діапазон по концентрації (C_1 і C_3) пального в суміші, всередині якого розглянуті фрикційні іскри запалюють горючу суміш. Межі діапазону для фрикційних іскор, як видно з рис. 1.1, вже концентраційних меж поширення полум'я. При цьому звуження області відбувається в основному за рахунок багатих горючих сумішей внаслідок різкого зниження тепловиділення фрикційної іскрою. Точка 2' відповідає оптимальної концентрації пального в суміші з повітрям при запалюванні фрикційними іскрами. Таким чином, з наведених вище міркувань, фрикційними іскрами легше запалюються бідні горючі суміші.

Підвищуючи вміст кисню у вибухонебезпечних сумішах і не змінюючи концентрації пального, можна збільшити тепловиділення фрикційних іскор. Наприклад, тепловиділення фрикційних іскор з початковою температурою T_3 в середовищах, збагачених киснем, може характеризуватися кривій 5, і фрикційні іскри в цьому випадку будуть запалювати вибухонебезпечні середовища в діапазоні концентрацій $C_0 - C_4$.

Теоретичний і практичний інтерес представляє визначення горючих сумішей, які найбільш легко запалюються фрикційними іскрами. У дійсний час використовується два способи визначення оптимальних складів горючих сумішей.

Перший спосіб заснований на визначенні меж запалювання горючих сумішей фрикційними іскрами, що утворюються в обраному режимі зіткнення. Режим іскроутворення і матеріали іскроутворюючого механізмів підбираються таким чином, щоб в порівняно вузькому інтервалі концентрацій пального ймовірність запалювання змінювалася б у межах $0,1 \leq P \leq 1$. Випробування проводять у вибухових камерах з різним вмістом пального, і за результатами будується залежність $P = f(C)$.

На рис. 1.2 наведені для деяких горючих сумішей залежно для визначення їх оптимального складу.

					НУЦЗУ.2. 25-13-128.СХтаХТ.РПЗ-01	Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		22

Статистична вирогідність запалення

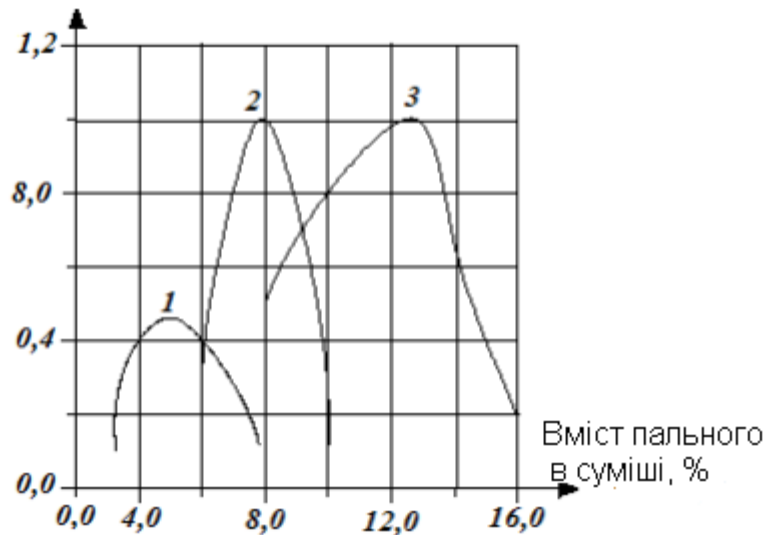


Рис. 1.2 - Концентраційні межі запалювання горючих сумішей фрикційними іскрами стали: 1 - ацетиленоповтряна суміш; 2 - метановодневоповітряна суміш ($\text{CH}_4:\text{CH}_2 = 2: 3$); 3 - водневоповітряна суміш

На рис. 1.2 видно, що криві мають максимум, який зміщений в сторону бідних горючих сумішей тим сильніше, чим більший об'ємний відсоток пального міститься в стехіометричному складі. звуження концентраційного межі займання відбувається, в основному, за рахунок багатих сумішей. так, наприклад, оптимальний вміст водню в суміші з повітрям при запалюванні іскрами сумішей становить 12-13% (об.), в той час як верхня концентраційна межа поширення полум'я для водневоповітряної суміші становить 75% (об.).

Аналогічне становище має місце і для вуглеводородоповітряних сумішей (Ацетилен, метан і т. Д.) І сумішей інших горючих газів з повітрям. Наведені дані добре узгоджуються з викладеними вище теоретичними положеннями про механізм окислення і нагрівання фрикційних частинок і запалювання ними горючих сумішей.

Другий спосіб визначення найбільш легко запалює складу горючих сумішей заснований на визначенні мінімальної затримки займання горючих сумішей фрикційними іскрами. Час затримки визначається по кінограм процесу

іскроутворення і запалювання горючих сумішей. Як і в першому випадку, час затримки визначається для вибраного режиму іскроутворення. Концентрація пального в суміші змінюється від нижнього концентраційного межі поширення полум'я до стехіометричного складу. на кожній концентрації виробляється кілька кінозйомок процесу іскроутворення і запалювання горючої суміші, і визначається середній час затримки вибуху. Потім будується залежність $t = f(C)$.

На рис 1.3 наведені побудовані за результатами дослідження для ацетиленоповітряної і водородоповітряної сумішей криві залежності затримки займання від концентрації пального для двох різних режимів зіткнення.

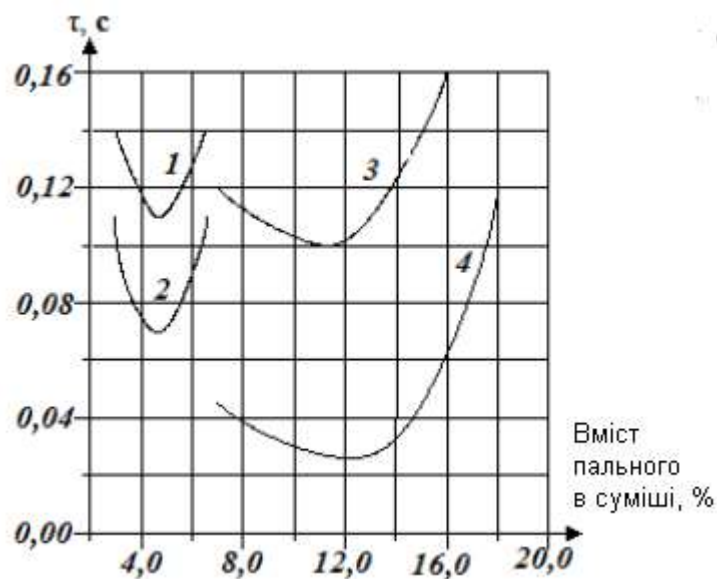


Рис 1.3 - Залежність затримки запалювання (τ) вибухонебезпечних сумішей фрикційними іскрами сталей від змісту пального в суміші і енергії зіткнення: 1 - ацетиленоповітряна суміш, енергія зіткнення 570 Дж; 2 - ацетиленоповітряна суміш, енергія зіткнення 830 Дж; 3 - водородоповітряна суміш, енергія зіткнення 830 Дж; 4 - водородоповітряна суміш, енергія зіткнення 1700 Дж

З рис. 1.3 видно, що криві мають мінімум, відповідний найбільш легко запалюють фрикційними іскрами суміші пального з повітрям.

З підвищенням вмісту кисню в окислювальному середовищі час затримки запалювання фрикційними іскрами скорочується. На рис. 1.4 показано зміна часу затримки запалювання фрикційними іскрами, утворюються при зіткненні вуглецевих сталей, в залежності від вмісту кисню в окислювальному середовищі.

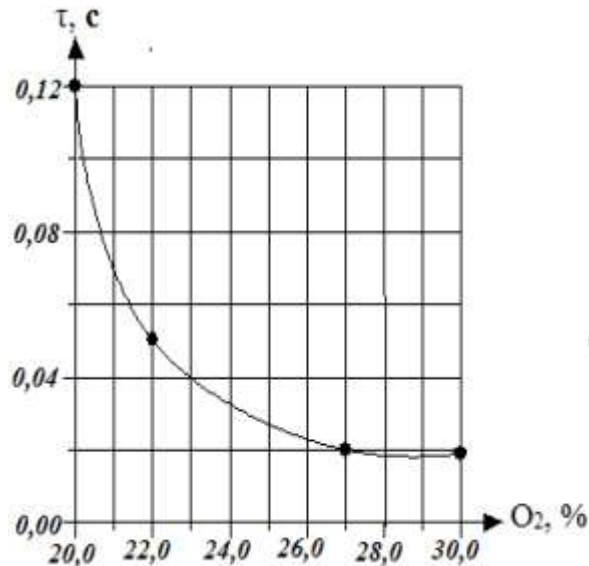


Рис. 1.4 - Залежність затримки запалювання (τ) ацетиленоазотокисневої суміші ($[C_2H_2] = 4,4\%$ (об.)) фрикційними іскрами сталей від вмісту кисню

У зв'язку з тим, що в бідних горючих сумішах заміщення азоту деяким кількістю кисню практично не призводить до зміни горючих властивостей суміші, зменшення часу затримки займання є результатом підвищення швидкості окислення фрикційних частинок.

Якщо фрикційні частки утворені з вступають один з одним в реакцію матеріалів, то ефект добавки кисню в горючі суміші стає значно меншим. У цьому випадку концентрація пального в найбільш легко запалюють сумішах трохи нижче концентрації пального в сумішах, відповідних мінімальної енергії запалювання електричними іскрами.

На рис. 1.5 наведені ймовірності запалювання фрикційними іскрами, утворюються при зіткненні алюмінієвих сплавів з іржавої сталлю, при цьому слід мати на увазі протікання термічної реакції між алюмінієм і оксидами заліза.

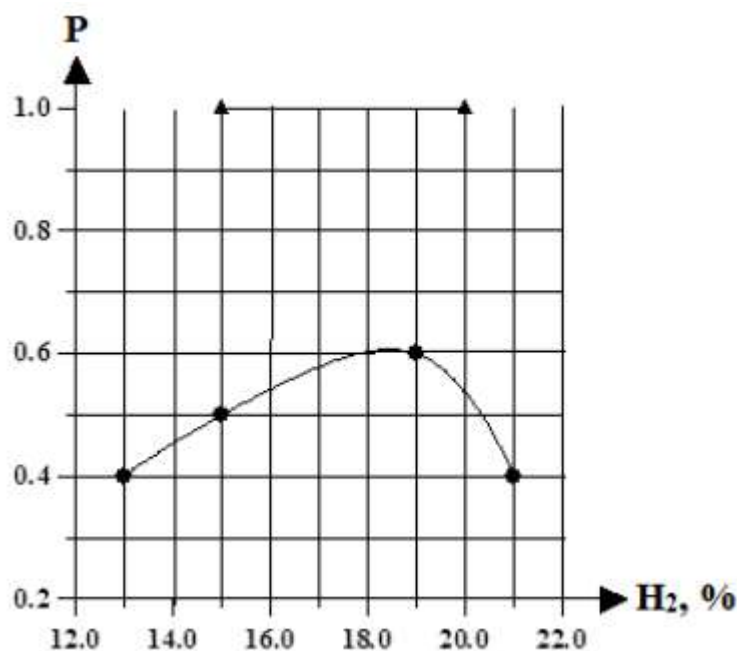


Рис. 1.5 - Вплив концентрації пального на запальник здатність (Ймовірність запалювання) фрикційних іскор пари алюмінієвий сплав - іржава сталь: ● - енергія удару 735 Дж; ▲ - енергія удару 1140 Дж

Дослідження, проведені при постійній енергії зіткнення на установці копрового типу, дозволили встановити, що запальне здатність іскор, що утворюються при ударі стали про сталь або граніт [32, 33], а також при ударі бронзових сплавів про сталь [35, 36], падає з пониженням вмісту кисню.

При цьому в логарифмічній сітці ця залежність зображується прямою під кутом нахилу до осі абсцис близько 60 °. Сильний вплив кисню на запальне здатність горючих сумішей при стиранні карборундовим кругом сталевих стрижнів зазначалося в ряді робіт [54-56].

Наведені на рис. 1.6 експериментальні залежності дозволяють здійснювати оцінку запального здатності фрикційних іскор по одній експериментальній точці, отриманої для сумішей, що містять оптимальний склад пального і збагачених киснем (якщо відомий кут нахилу α прямих $\lg P = f([O_2])$).

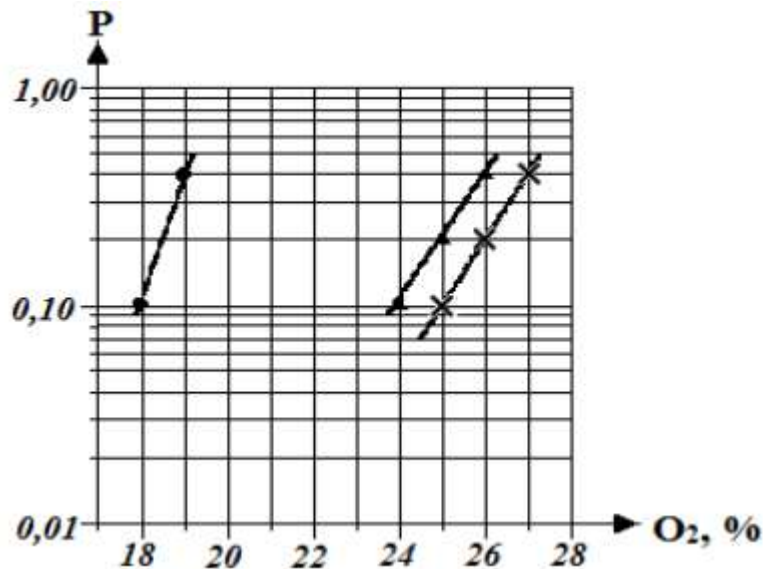


Рис. 1.6 - Вплив вмісту кисню в окислювальному середовищі на запальник здатність (ймовірність запалювання) фрикційними частинками сталей горючих сумішей з вмістом водню 12-13% (об.): ● - зіткнення мідно-нікелевого сплаву з іржавої сталлю; ▲ – зіткнення спецлатуні з загартованої сталлю; - зіткнення мідно-нікелевого сплаву з м'якою сталлю

У цьому випадку ймовірність загоряння найбільш легкої запалюють суміші пального з повітрям може бути обчислена за формулою:

$$P_0 = P_x \left(\frac{A_0}{x} \right)^{\text{tg}\alpha} \quad (1.3)$$

де P_0 - ймовірність загоряння найбільш легко запалюють фрикційними іскрами суміші горючого газу з повітрям; A_0 - вміст кисню в найбільш легко запалюють фрикційними іскрами суміші горючого газу з повітрям; P_x , x - координати експериментальної точки; $\text{tg}\alpha$ - тангенс кута нахилу в логарифмічній сітці залежності $P = f(O_2)$.

Запалювальна здатність іскор залежить як від механічного складу що беруть участь в терті матеріалів, так і від режимів механічної дії. Тому неможливо оцінити теоретичним шляхом, небезпека іскор в тих чи інших умовах тертя або зіткнення.

В роботі [37] були проведені експериментальні дослідження запалює здатності фрикційних іскор при зіткненні різних сталей, алюмінієвих, магнієвих, цинкових і бронзових сплавів в різних вибухонебезпечному середовищі при різних значеннях швидкості (7,5-27,0 м / с) і маси (0,12-1,9 кг) ударників, найбільш часто застосовуються в інженерній практиці. Іскроутворюючий пристрій обертально-ударного типу, що використовувалося в дослідженнях, дозволяло, як показало електротензометрування, моделювати такі ж удари, що і при роботі з ударним інструментом і падінні вантажів з висоти. Про це свідчать однакові форми імпульсів, отримані на осцилограмах при зіткненні зразків на експериментальній установці і при роботі ударними інструментами масою 0,5-1,0 кг. Отже, результати експериментів можуть бути перенесені на виробничі умови експлуатації інструментів та обладнання з вузлами тертя і зіткнення.

Число дослідів, необхідне для отримання стійкої ймовірності займання, визначалося статистичним методом із застосуванням теореми Муавра-Лапласа за умови, що певна ймовірність займання суміші буде відрізнятися від дійсної не більше ніж на 50% в 85 випадках з 100.

Горючі суміші запалали, як показала швидкісна кінозйомка зі швидкістю 200 кадрів в секунду, від окремих іскрових частинок. У ви-вальних обстановці більш ймовірно виникнення окремих іскор, ніж пучка іскор.

Основними факторами механічної дії, що визначають займисті здатність іскор, як показали досліди, є швидкість і маса ударника. Величина енергії ударника і імпульсу ударів ще не визначають займисті здатність іскор. При однакових величинах енергії і імпульсів ударів, але з різною швидкістю ударника, що запалює здатність іскор тим вище, чим більша швидкість ударника. Так, зі збільшенням її від 7,5 до 20 м / с (маса ударника 0,70 кг) ймовірність займання підвищувалася з 0,0005 до 0,005. Тим часом, при зміні маси ударника від 0,25 до 1,90 кг (швидкість його 7,5 м / с) і від 0,25 до 0,7 кг (швидкість ударника 26,7 м / с) ймовірність загоряння підвищувалася з 0,0001 до 0,0005 і з 0,0007 до 0,001, тобто слабкіше.

З викладеного очевидно, що при кількісній оцінці небезпеки займання горючих сумішей фрикційними іскрами слід виходити не з величини енергії ударника або імпульсів ударів, а з швидкості і маси інструментів або деталей обладнання, зіткнення яких можливо в аварійних умовах експлуатації.

При використанні ударного інструменту (молотків, кувалд) їх швидкість, як відомо, не перевищує 10-16 м / с. У процесі роботи з ручним інструментом (Гайковим і торцевими ключами, зовнішніми головками, зубцевими інструментами) іскроутворення найбільш ймовірно при їх падінні.

Вивчалася також запалює здатність фрикційних іскор при терті маловуглецевих сталей про абразивні матеріали (корунд, карборунд). З'ясовано, що на займистих здатність іскор впливає місце для вкладання навантаження при терті. У дослідах, в яких сталевий зразок притискався до периферії абразивного диска, що обертається зі швидкістю 15-27 м / с, пари бензину та інших вуглеводнів не запалюється, хоча виникав великий пучок іскор. Коли зразок притискався до торця диска, висікалися окремі іскри, і суміші з повітрям метану, парів бензину, бензолу, етилбензолу, ацетону, бутилового спирту запалали при швидкості обертання диска 10-20 м / с.

Якщо все вибухонебезпечні суміші класифікувати на кілька груп займистістю фрикційними іскрами, то складна і трудомістка робота по накопиченню експериментальних даних, що характеризують ступінь небезпеки їх займання, може обмежитися вивченням речовин, що представляють ці групи.

Вибухонебезпечні суміші по схильності до займання від такого теплового джерела, як іскри, класифікуються Правил будови електроустановок (ПУЕ) на категорії, які встановлюються в залежності від передачі вибуху через фланцеві зазори в оболонці електродвигуна.

Результати експериментальних досліджень займистості різних вибухонебезпечних сумішей (метану, бутану, парів нафти, бензинів, гасу, гексана, толуолу, пентана, водню та ін.) в однакових умовах зіткнення, а також при різних матеріалах співударяючихся пари, різних швидкостях і масах ударника дозволили

					НУЦЗУ.2. 25-13-128.СХтаХТ.РПЗ-01	Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		29

порівняти ці суміші по схильності до займання фрикційними іскрами і розбити їх на групи. Ці групи вибухонебезпечних сумішей збігаються з категоріями вибухонебезпечних сумішей по ПУЕ.

Виходячи з викладеного, вважаємо за доцільне при оцінці небезпеки займання вибухонебезпечних сумішей від фрикційних іскор на об'єктах користуватися зазначеної вище класифікацією вибухонебезпечних сумішей. У таблиці 1.1 наведені дані по займистості вибухонебезпечних сумішей іскрами в процесі тертя і зіткнення металів при швидкості від 7,5 до 27 м / с і масі ударників від 0,1 до 1,9 кг. Для оцінки ступеня небезпеки фрикційних іскор на виробничих об'єктах слід при розрахунках приймати дані таблиці 1.1 з коефіцієнтом безпеки, рівним 2.

Процеси іскроутворення і запалювання горючих сумішей в режимі тертя і удару твердих тіл в значній мірі відрізняються один від одного. Це пов'язане, з одного боку, з різними фізико-механічними змінами, що відбуваються в матеріалах при ударних навантаженнях і терті, а з іншого боку - станом газової суміші в зоні переміщення фрикційних частинок. Крім того, кут взаємодії при ударних навантаженнях, що викликають максимальне іскроутворення, становить, як показують експерименти, приблизно 50°C, а при терті цей кут значно менше. Тертя зазвичай пов'язане з підвищенням температури в поверхневому шарі, зміною кристалічної структури матеріалу, утворенням поверхневих окисних плівок, які впливають на процес іскроутворення. З підвищенням температури поверхневого шару, як правило, знижується міцність матеріалу і одночасно можливе збільшення початкової температури вириваються частинок, так як їх температура визначається середньою температурою поверхневого шару, яка підвищується при тривалому терті.

Таблица 1.1 - Дані по займистості вибухонебезпечних сумішей іскрами в процесі тертя і зіткнення металів

Исследуемые взрывоопасные вещества и смеси	Материал		Скорость ударника (диска), м/с	Масса, кг	Вероятность воспламенения	Искробезопасные пары сплавов
	ударника (диска)	образца				
Метан	Стали высокоуглеродистые, термообработанные	Стали малоуглеродистые	15,0	0,7	0,0005	Малоуглеродистые стали друг с другом, цинковые сплавы и бронзы с любыми сплавами ² , хромистые стали с ударниками из любых сплавов
		То же	15,0	0,7	0,001	
	Алюминиевые сплавы	16,0	0,7	0,002		
	Магниеые сплавы	16,0	0,7	0,0007		
	Абразивный материал	10,0-20,0	-	0,008-0,010		
Нефти, бензины, керосины, пропан, бутан,	Стали высокоуглеродистые, термообработанные	Стали малоуглеродистые	7,5	0,1 и менее	Не воспламеняется	Цинковые сплавы, бронзы с любыми сплавами, хромистые
		То же	7,5-10,0	0,10-1,90	0,0001-0,0005	
	То же	11,0-13,0	0,10-0,70	0,001		
	То же	14,0-27,0	0,25-0,70	0,003-0,005		
Пентан, гексан, бензол, толуол, ксилол, этилбензол, ацетон, спирты метиловый и бутиловый	Абразивный материал	То же	8,0-15,0	0,7	0,001-0,010	Стали с ударниками из любых сплавов
		Стали малоуглеродистые корродированные	16,0	0,7	0,002	

Исследуемые взрывоопасные вещества и смеси	Материал		Скорость ударника (диска), м/с	Масса, кг	Вероятность воспламенения	Искробезопасные пары сплавов
	ударника (диска)	образца				
	Магниеые сплавы	То же	16,0	0,7	0,009	
	То же	-	11,0 и ниже	0,7	Не воспламеняется	
	Абразивный материал	Стали малоуглеродистые	10,0-20,0	-	0,03-0,04 ¹	
Этилен, дивинил, изопран	Стали высокоуглеродистые, термообработанные	Стали малоуглеродистые	11,0-16,0	0,7	0,001-0,008	Цинковые сплавы, бронзы с любыми сплавами ²
	Стали малоуглеродистые	То же	27,0	0,7	0,001	
	Стали высокоуглеродистые	Стали хромистые	27,0	0,7	0,001	
	Алюминиевые сплавы	Стали малоуглеродистые корродированные	16,0	0,7	0,005	
	Магниеые сплавы	То же	16,0	0,7	0,01	
	То же	-	11,0	0,7	Не воспламеняется	
Водород, ацетилен	Абразивный материал	Стали малоуглеродистые	10,0-20,0	-	0,08-0,121	Цинковые сплавы, специатуль с любыми сплавами ²
	Бронзы	То же	17,0-22,0	0,7	0,001-0,002	

Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата
----	------	-------------	--------	------

У той же час при великих швидкостях третьових елементів горюча суміш в зоні переміщення фрикційних іскор турбулізуючими, і умови підпалювання не можуть. На підставі опублікованих досліджень можна вважати встановленим, що з підвищенням швидкості ковзання в межах до 100 м / с запалює здатність фрикційних іскор зростає. На рис 1.7 показана зв'язок між швидкістю ковзання і еквівалентним вмістом кисню в суміші для отримання фрикційних іскор, запалюють горючі водородоповітряні суміші з однаковою ймовірністю.



Рис 1.7 - Залежність запалює здатності фрикційних іскор від вмісту кисню в горючій суміші (12% (об.) H_2) і швидкості ковзання: ● - швидкість ковзання 23 м / с, пара тертя мідь-сталь; ▲ – швидкість ковзання 48 м / с, пара тертя мідь-сталь; □ - швидкість ковзання 70 м / с, пара тертя мідь-сталь; × - швидкість ковзання 70 м / с, пара тертя мідь-іржава сталь

Третій вид механічного впливу - швидко чергуються удари - являють собою поєднання двох розглянутих видів взаємодії. Слід мати на увазі, що енергія зіткнення в цьому виді механічного взаємодії може значно перевищувати 2000 Дж. З огляду на, що при цьому поверхню співударяючихся тіл може значно

розігріватися, при повтор-них зіткненнях фрикційні іскри можуть бути найбільш небезпечними. Це спостерігалось в роботах [38, 39].

Слід мати на увазі, що при великій швидкості ковзання, а також в режимі швидко чергуються ударів твердих тіл внаслідок значного виділення механічної енергії можливе істотне підвищення температури на великих ділянках поверхні взаємодіючих тіл, дотичних з горючими середовищами. В цьому випадку слід враховувати можливість займання горючих сумішей розігрітій поверхнею масивного тіла. Такий механізм запалювання неодноразово спостерігався при проведенні експериментів. Тертя пластичних матеріалів з горючими наповнювачами або сполучними по металевих поверхонь може приводити до загоряння органічних компонентів складових матеріалів і запалювання горючих сумішей. Критичні умови механічної взаємодії продуктів вія, при яких мають місце спостережувані види запалювання, вивчені недостатньо. З обмеженого числа досліджень випливає, що ці види запалювання притаманні режимам з великими швидкостями ковзання (зі швидкістю 20-30 м/с і вище). З підвищенням теплопровідності труться матеріалів знижується небезпека цих видів запалювання горючих сумішей.

В роботі [40] виконані дослідження з розвитку методу дослідження запалює здатності іскор від удару і тертя (механічних іскор). Вивчено механізми дисипації механічної енергії в тепло при ударі і терті, а також ймовірні механізми запалювання газових сумішей зазначеними іскрами.

В експериментах з вивчення іскор тертя використовувалася установка з колесом, що обертається, діаметром 10 або 30 см, який стикався з горизонтальним майданчиком розмірами 7×7 або 25×25 мм. Швидкість обертання колеса в місці зіткнення варіювалася в діапазоні 0,2-20 м / с при навантаженні 5000 Н. Температура плоскою майданчика вимірювалася за допомогою термопар і інфрачервоним пірометром. Колесо виготовлено із загартованої сталі. Майданчик виготовлялася із загартованої або незагартованої стали, алюмінію, сплаву алюмінію

					Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	

і бронзи, кварцу. За оцінками авторів, тиск в контактній зоні становило кілька мегапаскалей.

Знайдено, що розмір утворюються при терті твердих нагрітих частинок становив кілька сотень мікрон. Температура горизонтальній поверхні майданчики в залежності від прикладеної потужності (до 4 кВт) досягала 1000°C - для колеса діаметром 30 см і 500°C для колеса діаметром 10 см. За оцінками авторів, близько 80% виділяється при терті теплової енергії розсіюється шляхом теплопровідності. Утворені нагріті частинки («іскри») мали масу від 0,07 до 7,50 г в залежності від умов тертя і виду матеріалу. Число які виникають частинок становила кілька десятків в секунду. частка енергії від тертя, що йде на освіту частинок, становило близько 1%.

Для вивчення іскор від удару використовували установку з мішенню у вигляді сталевий пластини розмірами $5 \times 70 \times 45$ см і ударяючим по ній тілом. Мішень була нахилена під кутом 60° , що забезпечувало оптимальні умови іскроутворення. Швидкість зіткнення варіювалася в діапазоні від 5 до 50 м / с. Процес зіткнення реєстрували швидкісний кінокамерою (від 100 до 8000 кадрів в секунду). Вдаряє тіло являло собою стрижень діаметром 18 мм і довжиною 5 і 20 см зі сталі, міді і алюмінію.

Знайдено, що температура в місці зіткнення може досягати $600-700^{\circ}\text{C}$ і в подальшому істотно падати протягом 2-3 мс. типові тиску при зіткненні можуть досягати сотень мегапаскалей, що на 2 порядки вище тисків, що реалізуються при терті, за рахунок чого короткочасно реалізуються зазначені вище високі температури. При зіткненні утворюється, як правило, одна частинка розміром 2-4 мм, що рухається зі швидкістю, близькою до швидкості падаючого тіла. Температура при зіткненні практично не залежить від довжини стрижня, а визначається швидкістю зіткнення.

Запалювання при ударі і терті може відбуватися в результаті реалізації одного з трьох процесів:

- 1) за рахунок запалювання нагрітої поверхнею в місцях удару і тертя;

2) за рахунок нагріву газового середовища в обмеженому просторі через тепловиділення при ударі і терті;

3) запалюванні іскрами, що утворюються при ударі і терті.

Показано, що перший механізм є основним. Запалювання відбувається, як тільки температура поверхні перевищить деяке критичне значення (Не менше 1000 К). При цьому критична температура запалює поверхні не корелює ні зі стандартною температурою самозаймання, ні з мінімальною енергією запалювання. Виявлено, що найбільш легко запалюють газова суміш при ударі і при нагріванні поверхні іншим джерелом (Електричним нагрівом) за своїм складом одна і та ж і істотно відрізняється від стехіометричною, при якій мінімальна енергія запалювання електричної іскрою. Цей результат отримано для сумішей метан – повітря (7% (об.) CH_4) і водень - повітря (10% (об.) H_2). Температура запалює поверхні становила 1100-1400° С (CH_4) і 800-900° С (H_2).

Другий механізм схожий на перший, проте підвищення температури газоповиття середовища поблизу місця освіти іскор не перевищує 40°С, не дивлячись на те, що температура твердої поверхні може досягати 700°С (тобто другий механізм практично не реалізовується).

У разі реалізації третього механізму іскри можуть викликати займання, якщо частки металу можуть істотно підвищити свою температуру за рахунок окислення металу. Нагріті частки металу можуть горіти при своєму польоті в повітрі. Однак в розглянутих експериментах цього не було зафіксовано навіть у випадку алюмінію.

На підставі проведених досліджень зроблено такі висновки.

У разі тертя запалювання відбувається майже виключно в області, нагрітої за рахунок тертя поверхні. Температура запалювання нагрітої поверхні не пов'язана безпосередньо зі стандартною температурою самозаймання. Потужність, що розсіюється при терті, зазвичай становить кілька відсотків від повної потужності. Для відповідного нагріву поверхні потрібно час не менше декількох секунд. Максимальна температура в зоні дотику труться залежить тільки від потужності, розсіюється при терті, незалежно від швидкості руху.

					НУЦЗУ.2. 25-13-128.СХтаХТ.РПЗ-01	Лист
						36
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

В роботі [41] вивчено запалювання метано-повітряної суміші фрикційними іскрами легких металів і сплавів. Автори констатують, що запалювання при терті обумовлено утворенням нагрітих поверхонь тіл і іскор (Високотемпературних твердих частинок, що утворюються при терті). Найбільш ймовірно запалювання при терті поверхонь тіл з легких сплавів і поверхонь іржавого заліза. В роботі [41] виконані лабораторні експерименти, в яких фрикційні іскри створювалися при вільному падінні тестованого зразка на поверхню іржавого заліза. Випробувано було чотири зразки, зазначені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Хімічний склад зразків, використаних при проведенні експериментів в роботі [41]

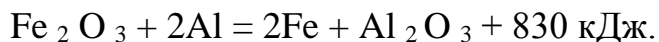
№ образца	Химический состав образца, %										Тип
	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Ni	Ti	Cr	Mg	Al	
1	11,5	0,9	0,3	0,4	0,3	0,1	0,2	0,2	0,2	остальное	Al-Si
2	0,4	0,5	1,6	0,3	5,5	-	0,2	0,2	2,5	остальное	Al-Mg-Zn
3	0,2	0,3	0,1	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2	4,5	остальное	Al-Mg
4	0,3	-	0,3	0,2	1,0	-	-	-	остальное	3,0	Mg

Крім цього, додатково вивчений зразок з першого сплаву з невеликою добавкою Be. Зразки мали довжину 50 і діаметр 60 мм. енергія зіткнення регулювалася вагою вантажу і висотою падіння. Пластина з іржавого заліза мала розміри 400 × 160 мм і товщину 12 мм. іржа утворювалася на поверхні пластини протягом 6 тижнів.

Падаючий зразок і пластина були розміщені у вибуховій камері об'ємом 1 м³, максимальна висота падіння становила 4 м. У камеру подавали необхідну кількість метану, і суміш перемішували вентилятором. Зразок падав на пластину під кутом близько 45°.

Спочатку проводили досліди без метану, в яких за допомогою кінокамери реєстрували утворення іскор. За допомогою інфрачервоного аналізатора

випромінювання було знайдено, що іскри мали температуру в діапазоні від 1850 до 2100 К і час життя 0,02 с. У процесі польоту частки охолоджувалися. Нагрівання частинок при терті викликаний не тільки переходом механічної енергії в тепло, але і хімічною реакцією алюмінію з іржавим залізом:



Виміряна залежність ймовірності запалювання від висоти падіння вантажу масою 14 кг і складу суміші. Найлегше запалювалися бідні суміші із вмістом метану 6,5-7% (об.). Ймовірна причина цього – додатковий, по відношенню до горіння метану, кисень споживається іскрами. При висоті падіння вантажу з 4 м максимальна по концентрації метану ймовірність запалювання близька до 90%, при висотах падіння з 3 і 2 м - ця величина залишає 60 і 25%, відповідно. Імовірність запалювання залежить від шорсткості поверхні сталевий пластини і максимальна при шорсткості 1,2 мм. Імовірність запалювання залежить від маси вантажу, і при масі менше 5 кг і висоті падіння до 4 м запалювання не відбувається. Автори роблять висновок, що ймовірність запалювання визначається не масою вантажу і висотою падіння окремо, а залежить від потенційної енергії вантажу.

Знайдено, що четвертий зразок найбільш небезпечний з запальною спосібності. Чим менше Mg в сплаві з Al, тим нижче запалює здатність, що обумовлено тією обставиною, що Mg при реакції з іржею виділяє більше тепла, ніж Al. Вплив Zn вище, ніж вплив Mg. Добавки Ве підвищують запалює здатність фрикційних іскор.

За результатами роботи зроблені наступні висновки:

- зіткнення предметів з легких сплавів і сталі має високу запалюючу здатність в силу освіти високонагрітих поверхонь через можливість протікання термітних реакцій (реакції легких металів з іржею);
- висота падіння вантажу є одним з важливих параметрів, що визначає запалювальну здатність;

					НУЦЗУ.2. 25-13-128.СХтаХТ.РПЗ-01	Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		38

- енергія зіткнення, що забезпечує 50%-ву ймовірність запалювання, може бути використана для оцінки запальної здатності;

- наявність в сплавах легких металів Mg істотно підвищує запалюючу здатність.

Робота [42] присвячена дослідженню впливу матеріалу подошви робочої взуття та статі на можливість займання газів і парів фрикційними іскрами. При терті матеріалів утворюються нагріті поверхні, а також нагріті частинки труться матеріалів, які при розльоті в атмосфері можуть окислюватися з додатковим виділенням тепла, викликаючи додатковий нагрів. В обох випадках утворюються потенційні джерела запалювання, при цьому найлегше запалюються бідні газові суміші. Фрикційні іскри з високою запальною здатністю виникають зазвичай в разі легких металів (сплави церію, алюмінію, магнію, титану) і іноді в разі важких металів (гафній, цирконій).

В даний час відсутня систематична класифікація горючих газів і парів по займистості фрикційними іскрами. З певним наближенням може застосовуватися класифікація, пов'язана з вибухозахищеним обладнанням. Так, суміш пропан-повітря (група II-A) легше спалахує, ніж суміш метан-повітря (група I). Суміш етилен-повітря (група II-B) небезпечніше суміші пропан-повітря, а суміш водень-повітря (група IIc) небезпечніше суміші етилен-повітря. Суміші, найбільш легко запалювані фрикційними іскрами, є бідними і за своїм складом близькі до НКПР. Теж відноситься і до запалювання нагрітими поверхнями.

В роботі [42] проведено експерименти, що імітують запалювання фрикційними іскрами, що утворюються при зіткненні взуття з поверхнею підлоги з кварцовою плиткою (типова швидкість змінного удару 7,6 м / с). У експерименті ударник рухався по колу діаметром 0,91 м і здійснював ковзаючий удар по досліджуваному зразку. Ширина мішені, по якій відбувався удар, становила 75 мм. Досліди проводили з зразками зі сталі і карбиду вольфраму. Проведено 500 зіткнень зі швидкістю 9,4 м / с і 500 зіткнень зі швидкістю 6,4 м / с. За оцінками авторів, в

тепло переходить близко 1/3 энергии зіткнення. Деякі результати експериментів наведені в таблицях 1.3-1.5.

Таблиця 1.3 - Результати експериментів по визначенню можливості займання метано-повітряної суміші з вмістом СН 4 7% (об.) фрикційними іскрами, утворюються при зіткненні металів і кварцовою плити [42]

Материал мишени	Скорость (м/с) и энергия удара	Угол соударения, град	Число соударений без зажигания	Число соударений с зажиганием	Полное число соударений
Карбид вольфрама	9,4; 255	2	259	1	500
		4	150	0	
		6	90	0	
	6,4; 117	1	50	0	500
		2	300	0	
		4	50	0	
6		50	0		
Сапожный гвоздь	9,4; 255	2	95	0	500
		4	63	0	
		6	109	0	
		8	100	0	
		10	50	0	
	6,4; 117	12	83	0	
		2	50	0	500
		4	100	0	
		6	100	0	
		8	199	1	
10	50	0			
Инструментальная сталь	9,4; 255	2	49	0	91
		10	35	0	
		12	7	0	
	10,1; 289	12	6	1	7
Малоуглеродистая сталь	9,4; 255	2	83	0	108
		4	25	0	
	10,1; 289	2	24	0	48
		12	24	0	

Таблица 1.4 - Результаты экспериментов по визначенню ймовірності займання різних горючих газоповітряних сумішей іскрами удару і тертя металів і кварцовою плитки [42]

Материал мишени	Энергия соударения, Дж	Вероятность воспламенения (%) и интервал ее значений для доверительной вероятности 95 % для смесей с воздухом			
		7 %(об.) СН ₄	3 %(об.) С ₃ Н ₈	4 %(об.) С ₂ Н ₄	15 %(об.) Н ₂
Карбид вольфрама	225	0,2 (0-1,1)			-
	117	0 (0-0,7)	1,8 (1,1-3,1)	26 (22-30)	
Сапожный гвоздь	225	0 (0-0,7)	25 (22-28)	43 (38-47)	-
	117	0,2 (0-4,1)			
Инструментальная сталь	255	0 (0-4,1)	-	-	-
	289	14 (0,4-58)			
Малоуглеродистая сталь	255	0 (0-3,4)	-	-	-
	289	0 (0-7,6)			
Бронза алюминивая	117	1 (0,1-5,4)	24 (15-32)	82 (74-89)	-
Сплав меди с бериллием	117	2 (0,3-7)	20 (12-29)	83 (75-90)	-
Плавленый кварц	117	-	-	10 (2,2-26,5)	100 (59-100)
Ламповое стекло	117	0 (0-1,4)	2,8 (1,1-6)	5,5 (1,9-12,4)	47 (23-72)
Бутылочное стекло	117	-	-	0,72 (0,1-3,9)	39 (28-52)

Таблица 1.5 - Результаты экспериментов по визначенню ймовірності займання різних горючих газоповітряних сумішей іскрами удару і тертя різних матеріалів [42]

Соударяющиеся материалы		Вероятность воспламенения (%) и интервал ее значений для доверительной вероятности 95 % для смесей с воздухом			
		7 % СН ₄	3 % С ₃ Н ₈	4 % С ₂ Н ₄	15 % Н ₂
Хромированная сталь	Карбид кремния	15 (7-27)	-	-	-
Сталь	Сталь	0 (0-1,2)	-	-	-
Сплав бронзы с алюминием	Ржавая малоуглеродистая сталь	-	-	0 (0-31)	-
Сплав меди с бериллием	То же	-	-	0 (0-31)	-
Инструментальная сталь	То же	-	-	90 (55-100)	-
Малоуглеродистая сталь	То же	-	0 (0-5,9)	13 (6-25)	42 (28-58)

У першій серії експериментів визначалася можливість займання метано-повітряної суміші з вмістом СН 4 7% (об.) фрикційними іскрами, утворюються при зіткненні металів і кварцовою плиткою для різних швидкостей змінного удару. У другій серії експериментів визначалася ймовірність загоряння різних горючих газоповітряних сумішей іскрами удару і тертя металів і кварцовою плиткою. У третій серії експериментів визначалася ймовірність загоряння різних горючих газоповітряних сумішей іскрами удару і тертя різних матеріалів.

З таблиці 1.3 випливає, що ймовірність запалювання суміші 7% (об.) СН 4 - повітря ковзаючим ударом невелика. Порівнюючи результати експериментів, представлених в таблицях 1.3-1.5, можна зробити висновок, що в разі кварцовою плиткою ймовірність загоряння значно вище в порівнянні з іншими розглянутими в роботі конструкційними матеріалами.

Причиною високої небезпеки іскроутворення легких металів є протікання термітної реакції з іржею. Метали з низькою температурою плавлення найчастіше іскробезпечні. Найбільш іскробезпечними є матеріали, що дають при зіткненні з твердими поверхнями палаючі частинки (титан, церій, гафній, цирконій). Далі йде магній і його сплави також через протікання термітної реакції з іржавим залізом. Потім слід алюміній. Метано-повітряної суміші практично не запалюються при зіткненні сталевих поверхонь (навіть іржавих), для етілено-повітряних сумішей ймовірність запалювання істотно вище. Якщо сталеві поверхні контактують при ударі з будівельними матеріалами (граніт, цегла, асфальт і т. п.), ризик запалювання метано-повітряної суміші малий, але запалювання можливо для сумішей C_3H_8 - повітря і дуже ймовірно для сумішей C_2H_4 - повітря.

В роботі [43] вивчено запалювання газоповітряних сумішей іскрами, утворюються при ударі з енергією до 240 Дж. Виявлена можливість запалення пропаноповітряної суміші. Суміш парів бензину з повітрям запалили при енергії 177 Дж при зіткненні двох зразків з високовуглецевої сталі.

					НУЦЗУ.2. 25-13-128.СХтаХТ.РПЗ-01	Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		42

Для запалювання суміші H_2 - повітря потрібна була енергія зіткнення всього лише 3,4 Дж. Такі матеріали, як сплави алюмінію з бронзою, міді з берилієм і нікелю з міддю і кремнієм приводили до запалювання суміші H_2 - повітря при зіткненні з іржавим залізом.

В роботі [44] описаний спосіб випробування на фрикційну іскробезпечність зразків з легких сплавів. Спосіб випробування на іскробезпечність зразків з легких сплавів полягає в тому, що випробуваний зразок, з'єднаний з вантажем заданої маси, скидається з певної висоти на іржаву сталеву плиту, встановлену під кутом 50° до горизонту в метано-повітряної суміші, що містить 7,5% (об.) метану, і по реакції цього середовища на виділення енергії в місці удару судять про іскробезпечність випробуваного сплаву. Спосіб відрізняється тим, що поверхня плити зволожують, вимірюють площу сліду, утворився в результаті удару зразка об поверхню. При незаймистості суміші в камері і площі сліду менше 25 мм^2 сплав відносять до іскробезпечних. При площі сліду більше 25 мм^2 на слід, залишений при першому скиданні, скидають іржавий сталевий зразок, аналогічний зразком з випробовується сплаву, і незаймистості сплав відносять до іскробезпечних, в іншому випадку - до іскробезпечних.

Іскри удару і тертя є одними з основних причин займання вибухонебезпечних середовищ [45, 46], даючи 30-50% від усіх джерел запалювання. Ця тенденція стабільна в часі. До теперішнього часу огляди [47] в цій області вважалися найбільш повними.

Запалювання в результаті тертя відбувається за рахунок підвищення температури труться, при цьому виділяється тепло пропорційно силі тертя і швидкості [48]. Згідно [49], температура в зоні тертя істотно залежить від геометричних розмірів зразків. великомасштабна випробувальна установка описана в роботі [46] і має характерний розмір 30 см. Установка малого масштабу має характерний розмір 10 см. При терті поверхню зразків нагрівається до температур, запалюють вибухонебезпечну суміш [50, 51]. Запалювання пилу нагрітою поверхнею розглянуто в роботі [52].

У роботах [52, 53] вивчено запалювання вибухонебезпечних сумішей одиничними частинками, що нагріваються лазерним випромінюванням.

У монографії [54] описані умови запалювання фрикційними іскрами і зроблено висновок, що профілактика пожеж та вибухів від механічних іскор, утворюються при ударах і терті, повинна проводитися в наступних напрямках:

- на пневмосистемах транспортування пилоподібних, порошкоподібних і волокнистих матеріалів повинні встановлюватися камінняуловлювач і магнітні сепаратори. Вловлюють пристрої повинні встановлюватися по ходу транспортування до вентиляторів, подрібнювачів, дробарок і т. д. ;

- слюсарний інструмент, який використовується у вибухопожежонебезпечних приміщеннях і на зовнішніх установках, повинен виготовлятися з які не іскрять матеріалів (латуні, дюралі, пластмас) і змащуватися пластичними мастилами. Обміднення сталевого інструменту дає лише тимчасовий ефект;

- внутрішні поверхні корпусів вентиляторів, повітродувок та інших вентиляційних машин повинні бути футеровані латунню або пластмасами. Футеровка алюмінієм, через небезпеку виникнення термічної реакції, не припустима;

- у вибухонебезпечних цехах не допускається взуття з цвяхами на підборах і підошвах. На ободах коліс візків накладається гума або пластмаса. Підлоги зволожують і встеляють килимовими доріжками;

- в оглядових люках резервуарів для світлих нафтопродуктів застосовуються латунні прокладки. Інші люки, які використовуються періодично, відкривають обертанням кришки навколо болта.

На підставі проведеного вище аналізу можуть бути зроблені наступні висновки. Фрикційні іскри є потенційним джерелом займання горючих газопароповітряних сумішей. При оцінці небезпеки займання горючих сумішей фрикційними іскрами слід виходити з величин швидкості і маси пристроїв, або їх частин, зіткнення або тертя яких можливо в аварійних умовах експлуатації. при впливі фрикційних іскор найбільш легко піддаються займання бідні горючі суміші.

Запалювання газопароповітряних сумішей при ударі і терті твердих конструктивних матеріалів відбувається в основному або за рахунок нагрітих поверхонь, або розпеченими фрагментами твердих матеріалів (фрикційними іскрами), що утворюються при ударі і терті. В останньому випадку запалювання можливо, як правило, при можливості окислення цих фрагментів киснем повітря з відповідним збільшенням температури цих фрагментів. Другий механізм реалізується в основному для легких металів.

						Лист
						45
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	НУЦЗУ.2. 25-13-128.СХтаХТ.РПЗ-01	

РОЗДІЛ 2. ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ УСТАНОВКИ І МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ З ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРІННЯ ГАЗІВ І ПАРИ

2.1 Аналіз існуючих методів визначення характеристик горіння парогазових сумішей

В європейському стандарті EN 15967 [55] описані методи експериментального визначення максимального тиску вибуху і максимальної швидкості наростання тиску вибуху для газів і парів при заданій температурі і атмосферному тиску для початкового стану покою вихідної суміші. Окремо відзначено, що стандарт не поширюється на процеси поширення детонації. Також відзначено, що визначаються в стандарті величини непридатні для проектування вибухостійких конструкцій (що використовуються для огороження приміщень з можливістю виникнення вибуху з метою його локалізації в межах приміщення), а також для всіх тих випадків, коли полум'я може прискорюватися в процесі турбулізації через перешкоди, які перебувають на його шляху.

В даному стандарті під максимальним тиском вибуху і максимальних швидкістю наростання тиску вибуху розуміються величини, визначаються для сумішей горючого газу (пари) з повітрям (або інертного газу з повітрям) при варіюванні концентрації пального (пари). Тобто термін «Максимальне (а)» відноситься не до однієї конкретної суміші, а до набору сумішей, в яких змінюється концентрація горючого газу (пари).

Основним принципом, який реалізує положення розглядуваного стандарту, є – досліджувана горюча суміш запалюється джерелом запалювання певної потужності в центрі реакційної судини. З допомогою апаратури, яка реєструє, відбувається запис зміни тиску у часі в процесі згоряння вихідної суміші. За допомогою чисельної обробки кривої «тиск-час» для заданої суміші визначаються відповідні значення максимального тиску вибуху і максимальної швидкості наростання тиску

					<i>НУЦЗУ.2. 25-13-128.СХтаХТ.РПЗ-01</i>	Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		46

вибуху. Потім при варіюванні концентрації пального в вихідної суміші визначаються відповідні максимальні величини визначаються параметрів для даних пального і окислювача.

Реакційний посуд повинен мати або циліндричну, або сферичну форму. Обсяг судини повинен становити не менше 0,005 м³. У разі використання циліндричного реакційного судини відношення довжини судини до його діаметру має становити 1. Реакційний посудину і обладнання, змонтоване на ньому (крани, джерело запалювання, датчик тиску і т. д.) повинні витримувати надлишковий тиск, що розвивається при горінні, не менше 2 МПа.

Реакційний посуд повинен бути виконаний з нержавіючої сталі або любо іншого матеріалу, що не впливає каталітичного дії на процес поширення полум'я, і який не піддається корозії в результаті взаємодії з досліджуваної газовою сумішшю і продуктами її горіння.

Устаткування для завдання вихідної горючої суміші повинно забезпечувати похибка завдання пального компонента не більше 10% (відн.) при його концентрації не більше 2% (об.) і 0,2% (абс.) при його концентрації понад 2% (об.).

Джерело запалювання повинно розташовуватися в центрі реакційного сосуду. Рекомендованими джерелами запалювання є електрична іскра або перепалюваний дріт.

У тому випадку, якщо в якості джерела запалювання використовується електрична іскра, кращим матеріалом для електродів запалювання є нержавіюча сталь. Електроди представляють собою гострі провідники з кутом заточування решт $60 \pm 3^\circ$. Відстані між електродами в іскровому проміжку має становити 5 ± 1 мм. Електроди повинні бути щільно встановлені в реакційному посудині з метою відсутності витоків газу, в тому числі при високому тиску, які реалізуються в процесі поширення полум'я. Джерело високої напруги для формування іскри повинен забезпечувати наступні характеристики: напруга від 13 до 16 кВ і струм від 20 до 30 мА в момент утворення іскри. Первинна обмотка джерела високої напруги повинна бути з'єднана з електричною мережею за допомогою таймера для

					НУЦЗУ.2. 25-13-128.СХтаХТ.РПЗ-01	Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		47

установки необхідного часу розряду. Час розряду має складати 0,2 с. Якщо іскра з часом розряду 0,2 с не призводить до змін досліджуваної суміші, запалювання слід повторити зі збільшенням часу розряду до 0,5 с. Потужність, що виділяється при іскроутворенні в повітрі, повинна складати приблизно 10 Вт.

У разі використання в якості джерела запалювання дрiт, що перепалюється, енергія, що виділяється в процесі перепалювання, повинна знаходитися в межах від 10 до 20 Дж. Кращим матеріалом для електродів запалювання нержавіюча сталь і латунь. Електроди повинні розташовуватися паралельно один одному на відстані 5 ± 1 мм. Дротик, що перепалюється, повинен бути виконаний з ніхрому, мати діаметр в діапазоні від 0,05 до 0,2 мм і бути припаяний до електродів запалювання. При цьому електроди запалювання повинні бути розміщені в реакційному посудині таким чином, щоб дрiт перебував в центрі судини.

Система реєстрації тиску при згорянні вихідної суміші в реакційному посуді складається з наступних основних частин:

а) датчика тиску, який повинен бути розміщений безпосередньо в реакційному посудині таким чином, щоб його чутливий елемент і стінка судини знаходилися в одній площині (Датчик тиску повинен бути здатний вимірювати тиск до 2 Мпа);

б) посилювача;

в) системи реєстрації сигналу з датчика тиску, яка повинна мати розрядність не менше 12 біт, або частоту дискретизації 20 кГц, або швидкість кадрів 500 / t, де t - час процесу горіння (система реєстрації тиску повинна мати смугу пропускання не менше 10 кГц). При цьому система реєстрації тиску повинна мати таку точність вимірювання, щоб визначати початковий і максимальний тиск вибуху з точністю не менше 5 кПа.

Вище представлений один з багатьох експериментальних методів визначення нормальних швидкостей поширення полум'я в горючих однорідних гомогенних газових сумішах. Показано, що даний напрямок науки про горіння постійно вдосконалюється. Особлива увага приділяється точності визначення швидкості

горіння різними методами. Розвиваються і удосконалюються моделі процесу горіння. Можна виділити, що останнім часом відбувається «теоретизування» експериментальних методів, вимірювання швидкостей горіння за якими передбачає використання досить складних математичних моделей, що вимагають знання ряду термодинамічних параметрів. Особливо це відноситься до методу бомби постійного обсягу з використанням експериментальних даних протягом всього процесу розвитку горіння в бомбі [56, 57].

За сукупністю можливостей і обсягу використання в останні роки різними групами дослідників з різних світи, на нашу думку, перевага слід віддати методу бомби постійного обсягу, на перспективність якого вказує і різноманіття його модифікацій. Зокрема, він дуже економічний і досить точний при дослідженні залежності швидкості горіння від тиску, температури і змісту пального в суміші.

Безсумнівно, експериментальні методи визначення нормальних швидкостей будуть розвиватися і далі. В якості одного з напрямків розвитку можна вказати використання більш складної, але більш точної методики розрахунку динаміки дефлаграційного згорання газу в сферичному посудині, викладеної в [8].

Важливо відзначити, що стандартом [59] також регламентований метод експериментально визначення максимального тиску вибуху і максимальної швидкості наростання тиску вибуху газо- і пароповітряних сумішей. При цьому випробування проводять на установці і відповідно до методики, регламентованої стандартом [59] для визначення нормальної швидкості поширення полум'я в частині експериментального визначення залежності «Тиск-час» при згорянні газо- і пароповітряної суміші в замкнутому посудині. За максимальний тиск вибуху досліджуваної газо- і пароповітряної суміші при відомих значеннях початкового тиску і температури приймають найбільший тиск вибуху, отримане в процесі випробувань при різних концентраціях пального в суміші. За максимальну швидкість наростання тиску приймають найбільше значення тангенса кута нахилу дотичної до експериментальної залежності «тиск-час», отримане в процесі випробувань при різних концентраціях пального в суміші.

					Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	

Таким чином, за результатами представленого вище аналізу, в частині вибору експериментальної методики визначення максимального тиску вибуху, максимальної швидкості наростання тиску вибуху і нормальної швидкості поширення полум'я газо- і пароповітряних сумішей, по всій видимості, з метою максимальної гармонізації з міжнародними стандартами, а також беручи до уваги представлені в науковій пресі методи визначення зазначених показників, слід зупинитися на методі бомби постійного обсягу, який регламентований країни або регіону [59]. Зазначений метод в частині визначення максимального тиску вибуху і максимальної швидкості наростання тиску вибуху регламентований європейським стандартом [55].

Особливо відзначимо ту обставину, що в рамках запропонованого підходу одна установка, основою якої є замкнутий посудину сферичної форми, дозволить визначати всі зазначені вище показники пожежовибухонебезпеки газо- і пароповітряних сумішей, а саме: максимальну швидкість наростання тиску вибуху, максимальний тиск вибуху і нормальну швидкість горіння.

2.2 Методика визначення характеристик горіння горючих газових сумішей складного складу

На основі проведеного аналізу обрана методика експериментального визначення характеристик горіння горючих газових сумішей складного складу, реалізує стандарт [59], основні положення якого викладені нижче.

Експериментальні дослідження з визначення зазначених характеристик пропонується провести на експериментальній установці «Варіант», схема якої приведена на рис. 2.1. Установа дозволяє визначати максимальний тиск вибуху, а також максимальну швидкість наростання тиску вибуху і нормальну швидкість поширення полум'я шляхом математичної обробки експериментально отриманої в процесі реєстрації тиску при горінні газової суміші, що досліджується, в замкнутому посудині кривої «тиск-час».

					Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	50

Експерименти на установці «Варіант» проводять при загальному початковому тиску газової суміші до 4 МПа і початкової температурі до 473 К. Рекреаційний посуд (4) має обсяг 4,2 дм³, зроблений з неіржавіючої сталі, близький за формою до сфери, з внутрішнім діаметром 0,2 м. Установка включає в себе також систему приготування парогазових сумішей (11), що забезпечує вакуумування реакційного посуду, і подачу в нього окремих компонентів газової суміші. Глибина відкачування визначається вакуумметром (12) класу точності 0,25. Реактор і газові комунікації перед кожним досвідом вакуумують до залишкового тиску не більше 0,5 кПа вакуумним насосом 2НВР-5ДМ (10).

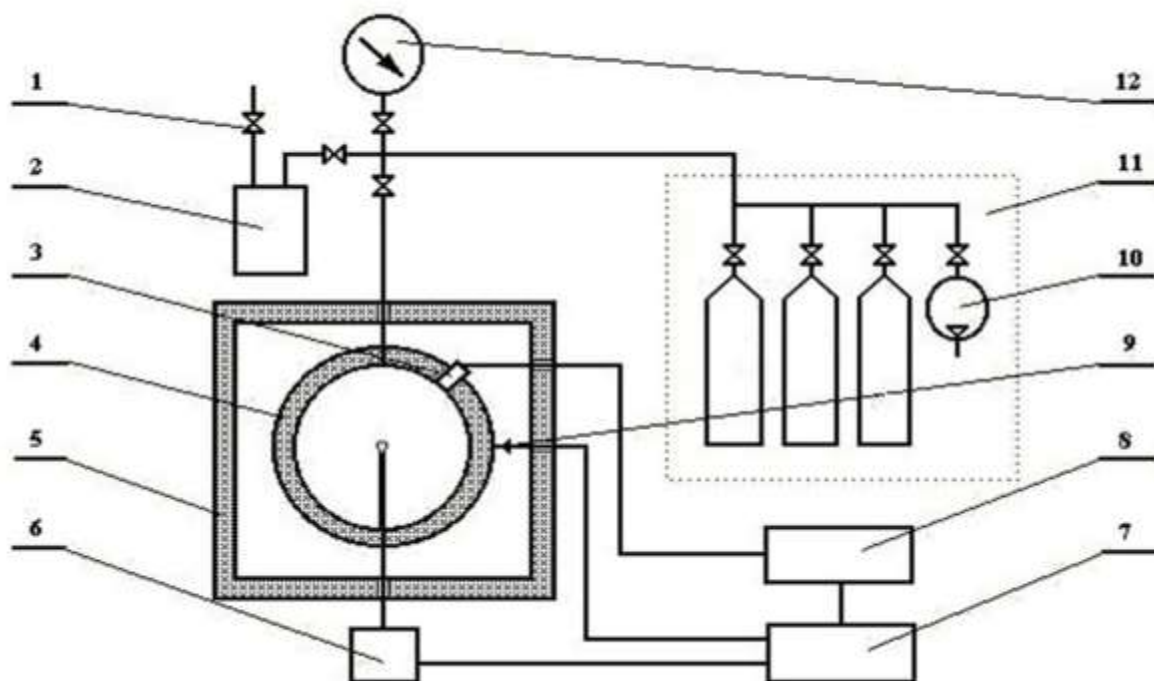


Рис 2.1 - Схема експериментальної установки «Варіант»: 1 - газовий кран; 2 - парогенератор; 3 - датчик тиску; 4 - реакційний посуд; 5 - термостат; 6 - система запалювання; 7 - пульт управління; 8 - АЦП; 9 - термопара; 10 - вакуумний насос; 11 - система приготування парогазової суміші; 12 - вакуумметр

Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

Після вакуумування реактора задавалася досліджувана суміш по парціальним тискам. Спочатку подавали необхідну кількість пального газу і інгібіторе. При вивченні горіння в повітрі далі подавали повітря до атмосферного тиску. При горінні в азотокисневих окислювальних середовищах з концентрацією O₂ 15 і 25% (об.) спочатку подавали необхідну кількість додаткового азоту або кисню відповідно, а, потім, повітря до атмосферного тиску. Необхідні кількості додаткового азоту і кисню і відповідні кількості повітря розраховували за формулами:

- для випадку середовищ з підвищеним вмістом кисню

$$C_{\text{возд}} = (100 - C_{\Gamma} - C_{\Phi}) \frac{(1 - \mu_{\text{O}_2})}{(1 - \mu_{\text{O}_2, \text{возд}})}, \quad (2.1)$$

$$C_{\text{O}_2} = 100 - C_{\Gamma} - C_{\Phi} - C_{\text{возд}}, \quad (2.2)$$

- для випадку середовищ зі зниженим вмістом кисню

$$C_{\text{N}_2} = (100 - C_{\Gamma} - C_{\Phi}) \left(1 - \frac{\mu_{\text{O}_2}}{\mu_{\text{O}_2, \text{возд}}}\right), \quad (2.3)$$

$$C_{\text{возд}} = 100 - C_{\Gamma} - C_{\Phi} - C_{\text{N}_2 \text{доб}}. \quad (2.4)$$

Де $C_{\text{возд}}$ - кількість доданого в реакційний посуд повітря, % (об.);

Z - кількості додаткового кисню та азоту відповідно, % (об.);

C_{O_2} , C_{N_2} - кількість пального і флегматизатора в суміші, % (об.);

C_{Γ} , C_{Φ} - кількість горючого та флегматизатора у суміші.

μ_{O_2} , $\mu_{O_2, \text{возд}}$ - молярні частки кисню в досліджуваній азотокисневому окислювальному середовищі (0,15; 0,206 або 0,25 відповідно) і в повітрі (0,206).

Склад сумішей, для яких визначали характеристики горіння, знаходили наступним чином (рисунок 2.2). При заданій концентрації флегматизатора C_d відповідну величину змісту пального (водню або метану) C_f знаходили за формулою:

$$C_f = \frac{100 - C_d}{1 + \frac{100}{C_{O_2}} \beta}, \quad (2.5)$$

C_{O_2} - концентрація кисню в повітрі, що дорівнює 20,6% (об); β - стехіометричний коефіцієнт кисню в реакції згорання пального компонента до CO_2 і H_2O , вважаючи флегматизаторами інертною речовиною ($\beta = n_C + n_H / 4$).

Встановлено, що для формування рівномірної газового середовища достатньо подати компоненти в реакційний посудину і витримати приготовлену суміш протягом не менше 5 хв.

Для формування сферичного фронту полум'я джерело запалювання встановлений в центрі судини. Як джерело запалювання можливо використання ніхромовий дріт, що перепалюється, діаметром 0,2 мм і довжиною 3 ± 1 мм, розташованої в центрі реакційного судини. для перепалювання зволікання на неї подається напруга живлення 42 ± 2 В від системи запалювання (Рис. 2.1). Дана система забезпечує енергію запалювання 8-10 Дж. Можливо також використання іскрового запалювання в центрі реактора.

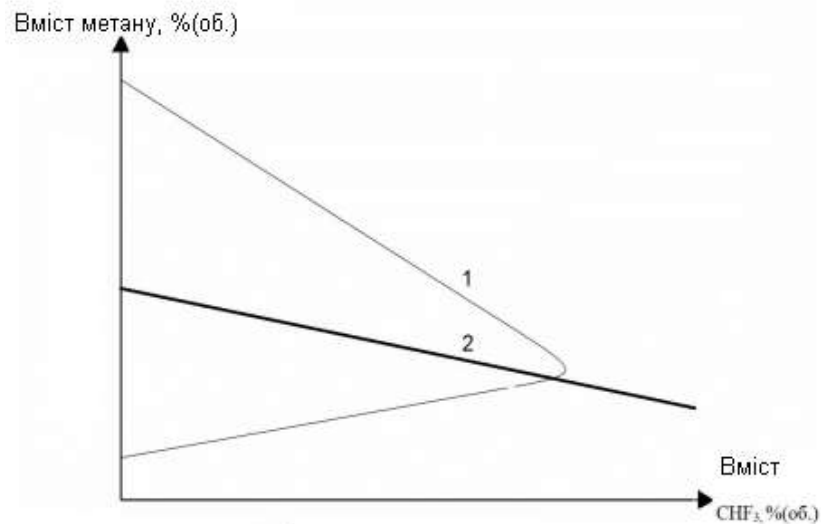


Рис. 2.2 - Типова крива флегматизації пального фторованим вуглеводнем: 1 - крива флегматизації; 2 - пряма, яка є графіком залежності (2.5)

В цьому випадку система являє собою блок іскрового запалювання «Іскра - 2», що забезпечує регульовану енергію розряду від 7 мДж до 2 Дж. З аналізу наявних в літературі експериментальних даних про мінімальні енергії запалювання водородвмісних і метанвмісних сумішей в якості енергії запалювання була обрана енергія в 2 Дж. Ця енергія помітно перевершує всі наявні в літературі дані за мінімальними енергій запалювання водородвмісних і метанвмісних сумішей.

Тиск, що розвивається при горінні в замкнутому посуді реєструється за допомогою швидкодіючого тензометричного датчика тиску «Карат ДИ» з постійною часу не більше 10^{-3} с. Сигнал з датчика тиску подається на АЦП Е14-440 з максимальною частотою перетворення 400 кГц і далі на комп'ютер. Пульт управління (рис. 2.1) забезпечує синхронну роботу джерела запалювання та системи реєстрації. Для видалення з реактора продуктів горіння використовують вакуумний насос. Горючими газами служили водень і метан. Як флегматизатори використовували пентафторетан (C_2F_5H), тріфторметан (CF_3H) і перфторбутан (C_4F_{10}).

Розділ 3. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ОЦІНКИ ІСКРОБЕЗПЕЧНОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Як показав аналіз, представлений в першому розділі цієї роботи, одним з поширених джерел запалювання горючих сумішей під вибухонебезпечних середовищах є фрикційні частки, які утворюються при терті або зіткненні робочих органів технологічних машин, механізмів, а також при виконанні обслуговуючим персоналом деяких технологічних і ремонтних операцій. Фрикційні частинки, що утворюються в результаті відносного переміщення двох контактуючих поверхонь, в залежності від дисперсності, початкової температури, наявності окислювача та інших факторів можуть розігріватися до температури видимого світіння. Частинки речовини, які утворюються в результаті тертя та зіткнення і розпечені до температури видимого світіння, прийнято називати фрикційними іскрами.

В силу цього нормативні документи містять вимогу на застосування іскробезпечних матеріалів для виконання багатьох видів робіт. Так всі роботи по дрібному ремонту елементів не дегазованої цистерни проводяться інструментом, що не іскрить, а робоча частина інструментів і пристосувань з чорного металу повинна рясно змащувати тавотом, солідолом або інший мастилом. Застосування електроінструментів, що дають іскріння, і виконання зварювальних робіт забороняються. Відповідно до [60], при знятті запірно-пломбувальних пристроїв з вагонів і цистерн неприпустимо виникнення іскор щоб уникнути загоряння або вибуху вантажу, що перевозиться, а також травмування персоналу.

Відповідно до вимог роботи в приміщеннях, цистернах, технологічних апаратах (обладнанні), зонах (територіях), в яких можливе утворення горючих пароповітряних сумішей, слід виконувати іскробезпечним інструментом в одязі і взутті, не здатних викликати іскру.

При цьому відсутній стандартизований метод, що дозволяє проводити оцінку іскробезпеки матеріалів. В результаті виникають ситуації, коли ряд сплавів на

					Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	55

основі металів з низькою твердістю і температурою плавлення (наприклад, сплави цинку і алюмінію, берилію і міді) вважають іскробезпечними без достатніх на те підстав і використовують їх як іскробезпечні покриття для робочих частин механізмів. При цьому відомо [61], що, наприклад, інструмент, виготовлений зі сплаву міді та берилію, небезпечний при ударі об іржаві деталі з маловуглецевої сталі, забруднені алюмінієм.

У стандарті [62] описана методика випробувань матеріалів на іскробезпеку для електрообладнання. Дана методика призначена для перевірки на фрикційну іскробезпечність матеріалів і окремих складальних одиниць електрообладнання, при експлуатації якого можливе виникнення фрикційних іскор (наприклад, переносне електрообладнання, застосовується в місцях з небезпекою удару сторонніми предметами, і електрообладнання, що має рухомі і нерухомі елементи). Експериментальна установка може бути заснована на установці з падаючим вантажем, або на установці з обертовим диском.

Для установки з падаючим вантажем моделювання процесу іскроутворення забезпечується формою поверхні вантажу (циліндр, конус, сфера), енергією і відносною швидкістю переміщення деталей в момент зіткнення.

Для установки з обертовим диском для заданої пари матеріалів моделювання процесу іскроутворення забезпечується формою поверхонь деталей, що труться, відносною швидкістю ковзання і зусиллям притиснення деталей, що труться, для механізмів з амортизаторами.

При випробуваннях на фрикційну іскробезпечність інтенсивно окислюючихся матеріалів застосовують повітряні суміші з наступним вмістом горючих компонентів: CH_4 (5,5-6,5)% (об.), H_2 (10-13)% (об.).

Запалювальна здатність фрикційних іскор, що утворюються при терті або зіткненні алюмінію і його сплавів без захисних або з захисними покриттями з іржавої сталлю, а також фрикційних іскор матеріалів оболонок, що важкоокислюються, визначають в горючих сумішах з наступним вмістом горючих компонентів: CH_4 (6,5-7,5)% (об.); H_2 (17-20)% (об.).

					Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	56

Оцінку іскробезпеки щодо здатності запалювати частинок, що активно окислюються, проводять за допомогою проведення випробувань в збагачених киснем середовищах (до $25 \pm 0,5$)%.

Питання оцінки іскробезпеки матеріалів висвітлюються також в стандарті ISO/DIS 80079-36 «Вибухонебезпечні середовища. Частина 36. Неелектричне обладнання для вибухонебезпечних середовищ. Загальні вимоги і методи випробувань» [63]. При цьому положення стандарту не застосовуються до наступних джерел запалювання:

- які з'явилися в результаті дроблення і тертя;
- одиничним іскрам, що утворюється при зіткненні, а також в гірській справі.

Регламентується, що немає необхідності розглядати поодинокі зіткнення між металевими деталями як потенційні джерела запалювання, якщо виконується одна з наступних умов:

- швидкість зіткнення менш 1 м / с і значення максимальної енергії зіткнення менш 500 Дж;
- алюміній, титан і магній не використовуються в поєднанні з феритної сталлю;
- алюміній у поєднанні з нержавіючої сталлю (понад 16,5% хрому) може бути використаний тільки в тому випадку, якщо сталь не піддається корозії;
- тверду сталь не використовують в поєднанні з твердою сталлю;
- не використовують тверду сталь в тих випадках, коли можливо її удар з гранітом;
- якщо при поєднанні металів, що не дають іскор, швидкість зіткнення менше або дорівнює 15 м / с, а максимальна потенційна енергія менше 60 Дж для середовищ з газом або парою.

До металів, що не викликають іскріння, відносять, наприклад, мідь, цинк, олово, свинець, деякі мідні сплави, в тому числі бронзу.

Немає необхідності розглядати джерела запалювання, що виникають при зіткненні, якщо швидкість зіткнення менше 15 м/с, і значення максимально можливої потенційної енергії нижче регламентованих цим стандартом величин.

Положення [63] можуть використовуватися тільки для попередньої оцінки іскробезпеки матеріалів, при цьому в ньому не міститься будь-якої методики випробувань на фрикційну іскробезпечність.

Таким чином, представлений вище аналіз показав, що в даний час відсутні загальноприйняті міжнародні або національні стандарти розвинених країн, які регламентують методи випробувань конструкційних матеріалів на фрикційну іскробезпечність.

					НУЦЗУ.2. 25-13-128.СХтаХТ.РПЗ-01	Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		58

Розділ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФТОРИРОВАНИХ ВУГЛЕВОДОРОДІВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРІННЯ БІЛЯСТЕХІОМЕТРИЧНИХ СУМІШЕЙ ВОДНЮ І МЕТАНУ В ОКИСЛЮВАЛЬНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

4.1 Визначення характеристик горіння білястехіометричної воднево-повітряної суміші в замкнутому сосуді

В даний час фторовані вуглеводні, безпечні з точки зору руйнування озонового шару земної атмосфери, широко використовуються в пожежогасінні. Починається використання фторованих вуглеводнів і для цілей вибухопопередження, що особливо актуально для вибухопожежонебезпечних приміщень, для яких неможливо або важко застосування такого широко відомого засобу вибухоподавлення, як легкоскідні конструкції (наприклад, для морських нафтогазовидобувних платформ). У відомих джерелах визначені концентраційні області поширення полум'я в сумішах виду пальне (водень, метан) - середовище окислення (суміш азоту і кисню, закис азоту) – фторований вуглеводень. Визначено характеристики вибуху зазначених сумішей біляпредельного складу в замкнутому сосуді. Виявлено двоїста роль фторованих вуглеводнів як флегматизаторами і промоторів горіння газових сумішей, яка полягає в прояві ними властивостей додаткового пального або окислювача в залежності від виду пального та складу суміші.

Однак характеристики горіння сумішей зазначеного вище виду білястехіометричного складу вивчені значно слабкіше.

4.2 Визначення характеристик горіння білястехіометричних сумішей виду $H_2-(O_2+N_2)$ - фторований вуглеводень в замкнутому сосуді

В даний час проведені досить численні дослідження впливу фторованих вуглеводнів на кінетичні і дифузійні полум'я. Однак ці дослідження, як правило,

					НУЦЗУ.2. 25-13-128.СХтаХТ.РПЗ-01	<i>Лист</i>
<i>Зм</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		59

обмежувалися повітряними окисними середовищами і вуглеводневими горючими. Слід зазначити лише роботи з вивчення впливу фторованих вуглеводнів на близько-граничні полум'я сумішей водень - окислювальна середовище (суміш O_2 і N_2 з вмістом кисню, відмінним від його змісту в повітрі) [64, 65]. Результати вивчення ролі фторованих вуглеводнів в разі околостехіометричних сумішей, в яких окислювачем є повітря, представлені вище в розділі 4.1.

Досліди можливо проводи на установці «Варіант». Досліди проводили при кімнатній температурі і атмосферному тиску. визначали максимальну тиск вибуху, максимальну швидкість наростання тиску вибуху і нормальну швидкість горіння.

На рис 4.1 - 4.4 наведені залежності максимального тиску вибуху ΔP_{max} від змісту флегматизатора для білястехіометричних воденьвмісних сумішей. Для зручності аналізу дані представлені як для випадку, коли по осі абсцис відкладена абсолютна концентрація флегматизатора C_d (рис. 4.1, 4.2), так і для випадку, коли по осі абсцис відкладена величина C_{rel} , що представляє собою відношення величини C_d до змісту фторованими вуглеводню в точках флегматизації, яке було визначено в роботі [66].

З залежностей, представлених на рис. 4.1 - 4.4 видно, що трифторметан (CHF_3) відносно слабо впливає на максимальний тиск вибуху при відносно невеликих змістах флегматизатора (C_{rel} в діапазоні від 0 до 0,4), в той час як добавки пентафторетана (C_2HF_5) і перфторбутана (C_4F_{10}) помітно знижують ΔP_{max} . Залежність ΔP_{max} від вмісту флегматизатора викликана, на наш погляд, конкуренцією двох процесів. З однією боку, це участь фторованих вуглеводнів в реакціях з вихідним паливом.

З іншого боку, мають місце реакції обриву реакційних ланцюжків при взаємодії радикалів H, OH і O з фторованими вуглеводнями і продуктами їх перетворення у фронті полум'я.

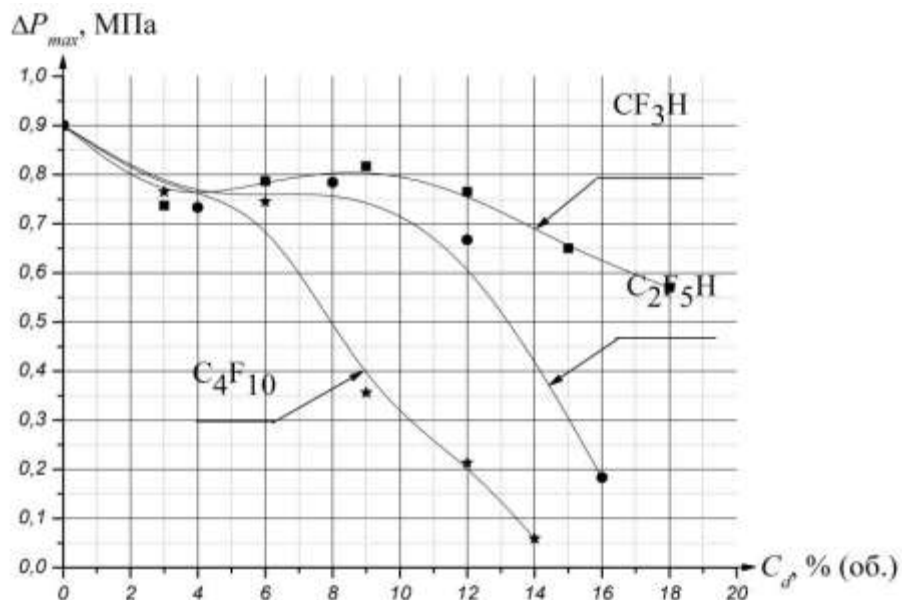


Рис. 4.1 - Залежність максимального тиску вибуху білястехіометричних водневмісних сумішей (ΔP_{max}) від змісту флегматизатора (C_d) при концентрації кисню в окислювальному середовищі 25% (об.).

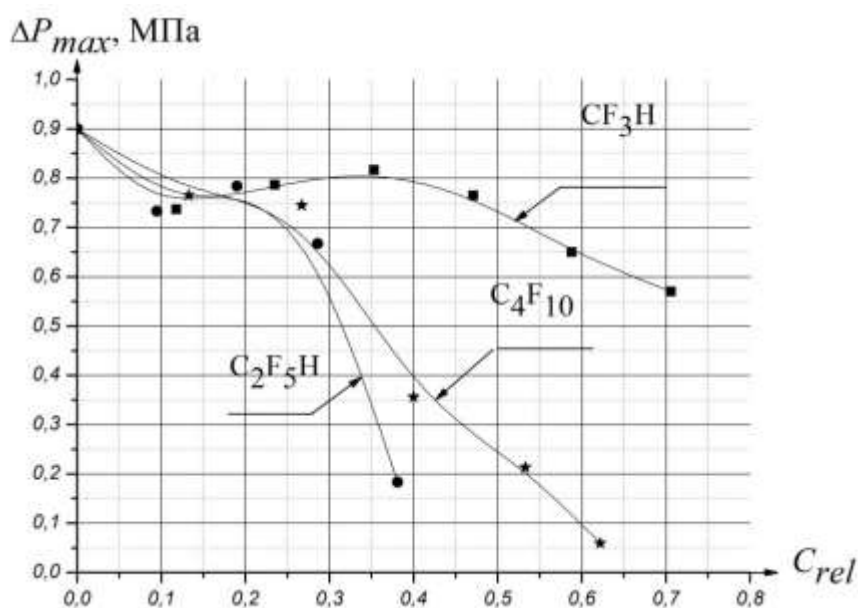


Рис. 4.20 - Залежність максимального тиску вибуху білястехіометричних водневмісних сумішей (ΔP_{max}) від відносного вмісту флегматизатора (C_{rel}) при концентрації кисню в окислювальному середовищі 25% (об.).

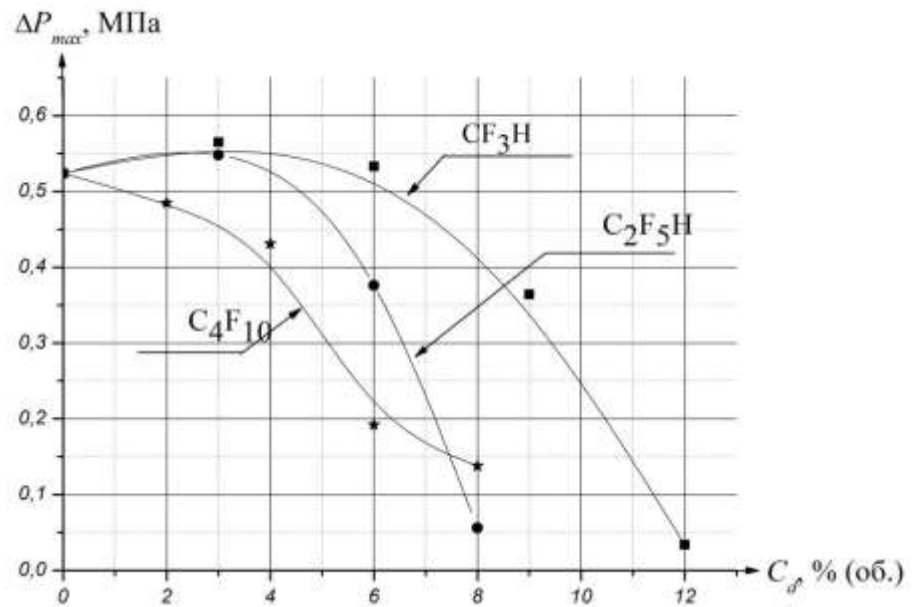


Рис. 4.3 - Залежність максимального тиску вибуху білястехіометричних водневмісних сумішей (ΔP_{max}) від змісту флегматизатора (C_d) при концентрації кисню в окислювальному середовищі 15% (об.)

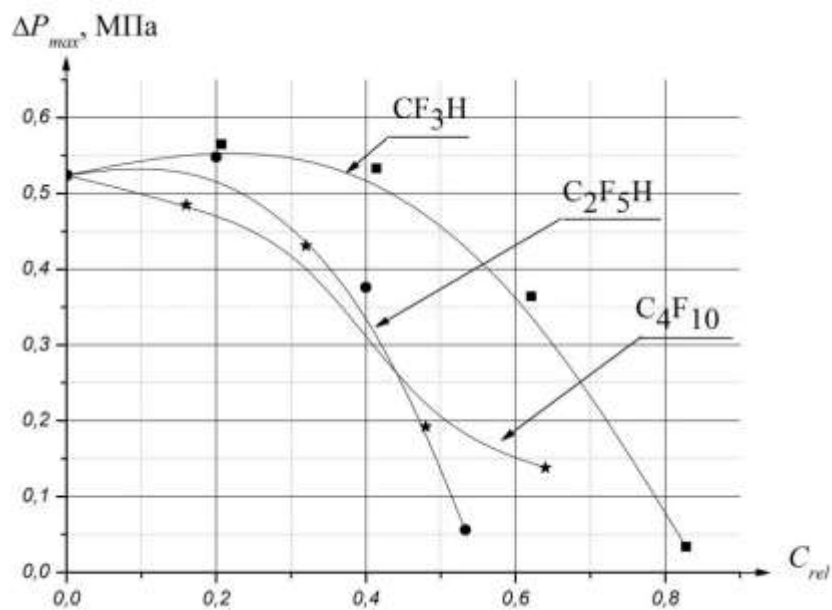


Рис. 4.4 - Залежність максимального тиску вибуху білястехіометричних водневмісних сумішей (ΔP_{max}) від відносного вмісту флегматизатора (C_{rel}) при концентрації кисню в окислювальному середовищі 15% (об.)

Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

Для C_2HF_5 і C_4F_{10} цей механізм, безумовно, набагато складніше, проте можна зробити висновок про те, що чим більше молекула фторованими вуглеводня, тим сильніше його хімічний вплив на полум'я, як це було згадано в попередньому розділі роботи для випадку горіння в повітрі. Це зазначено раніше в роботі [67], в якій виявлено ряд важливих особливостей інгібування горіння фторованими вуглеводнями, які наведено вище в розділі 4.1.

Зазначеними особливостями і визначається помітно більш висока інгібуруча ефективність C_2HF_5 і C_4F_{10} в порівнянні з CHF_3 , для якого аж до концентрації флегматизатора $C_{rel} \approx 0,4$ переважає промотування. При цьому істотних відмінностей від поведінки ΔP_{max} в залежності від C_d для концентрацій кисню 15 і 25% (об.) не спостерігається.

На рис. 4.5, 4.6 наведені залежності максимальної швидкості наростання тиску вибуху (dP/dt) $_{max}$ від змісту фторованих вуглеводнів C_d . Як і в разі горіння метанвмісних сумішей, відбувається монотонне зниження (dP/dt) $_{max}$ з ростом C_d . Якісно аналогічна картина спостерігається для залежності нормальної швидкості горіння S_u від концентрації флегматизатора C_d (див. рис. 4.7, 4.8). При цьому найбільш ефективним флегматизатором, як і в разі горіння метанвмісних сумішей, є C_4F_{10} , що обумовлено зазначеними вище особливостями інгібування горіння за допомогою фторованих вуглеводнів. Інгібування реалізується в процесах, аналогічних наведеним вище для флегматизації допомогою CHF_3 .

Таким чином, в цьому розділі роботи проведено дослідження впливу фторованих вуглеводнів (тріфторметан (CHF_3), пентафторетан (C_2HF_5), перфторбутан (C_4F_{10})) на характеристики горіння біястехіометричних сумішей водню в окислювальних середовищах, що представляють собою суміші азоту і кисню з вмістом O_2 15 і 25% (об.).

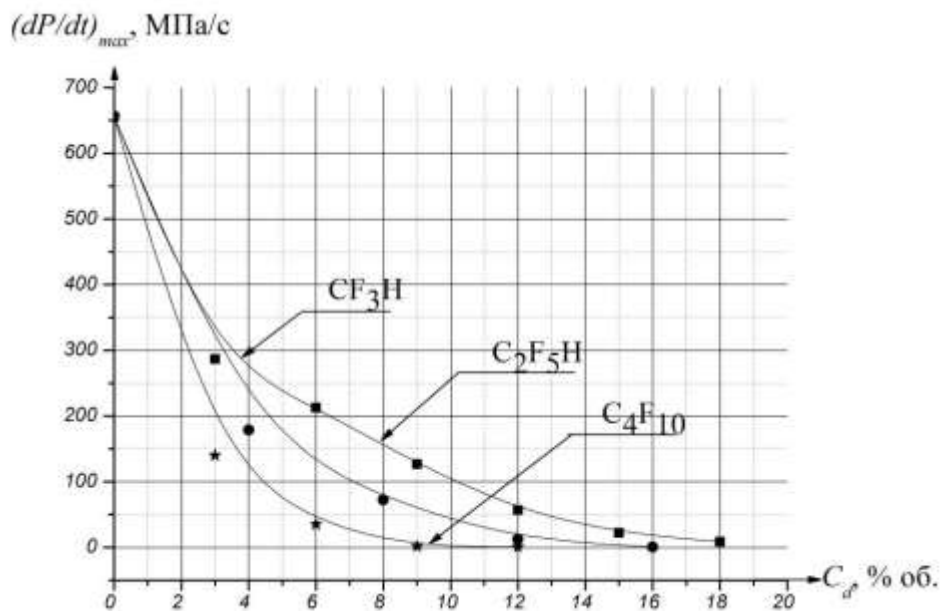


Рис. 4.5 - Залежність максимальної швидкості наростання тиску вибуху ($(dP / dt)_{max}$) білястехіометричних водневмісних сумішей від змісту флегматизатора (C_a) при концентрації кисню в окислювальному середовищі 25% (об.)

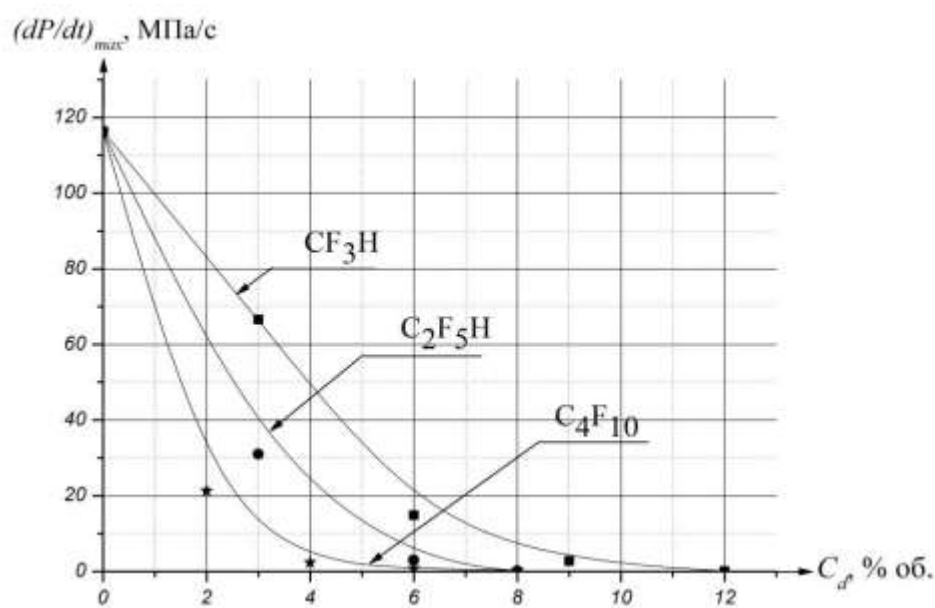


Рис. 4.6 - Залежність максимальної швидкості наростання тиску вибуху ($(dP/dt)_{max}$) білястехіометричних водневмісних сумішей від змісту флегматизатора (C_a) при концентрації кисню в окислювальному середовищі 15% (об.)

Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

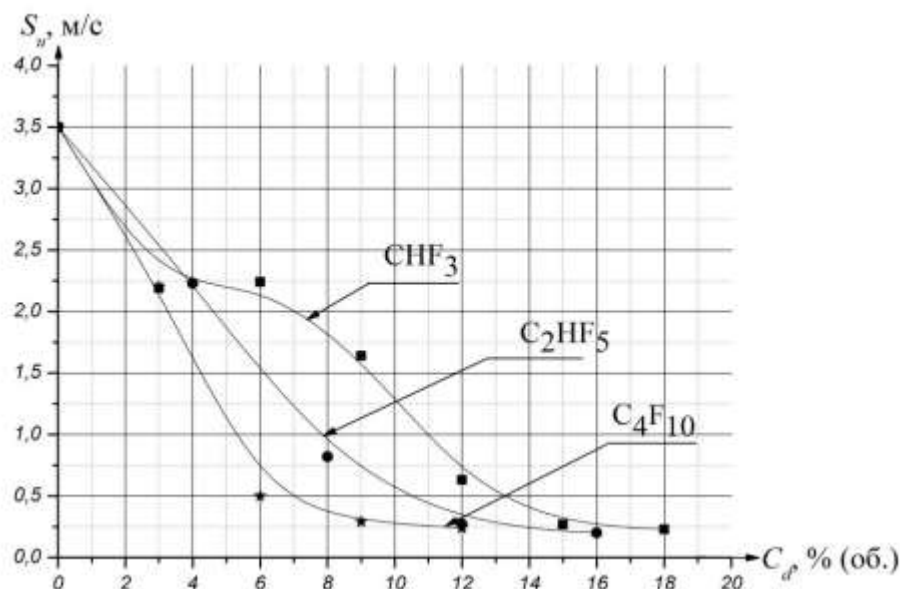


Рис. 4.7 - Залежність нормальної швидкості горіння білястехіометричних водневмісних сумішей (S_u) від змісту флегматизатора (C_d) при концентрації кисню в окислювальному середовищі 25% (об.)

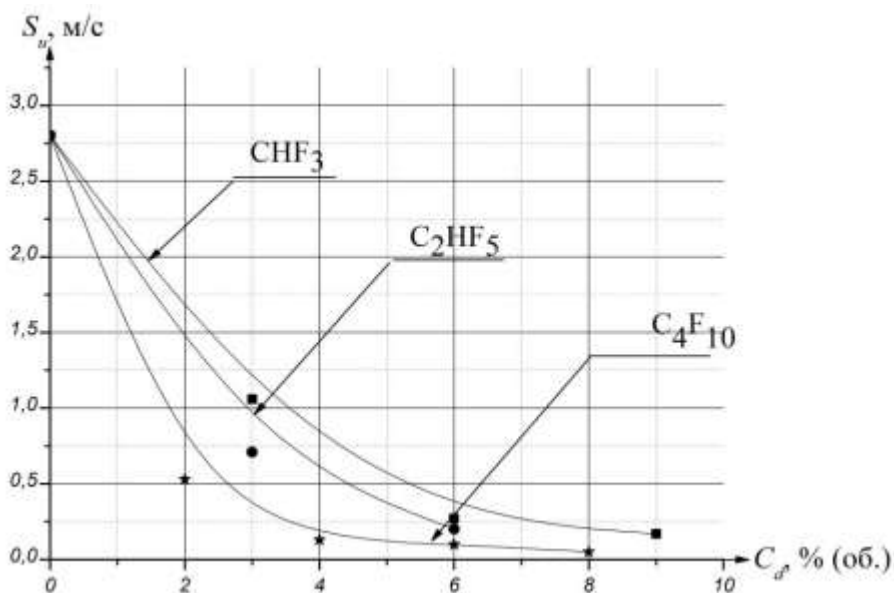


Рис. 4.8 - Залежність нормальної швидкості горіння білястехіометричних водневмісних сумішей (S_u) від змісту флегматизатора (C_d) при концентрації кисню в окислювальному середовищі 15% (об.)

Визначено залежності максимального тиску вибуху, максимальної швидкості наростання тиску вибуху і нормальної швидкості горіння від змісту фторованих

флегматизаторами C_d . Показано, що в діапазоні відносної концентрації трифторметана C_{rel} від 0 до 0,4 максимальний тиск вибуху відносно слабо залежить від змісту флегматизатора. У той же час максимальний тиск вибуху в разі C_2HF_5 і C_4F_{10} падає з ростом C_{rel} . Максимальна швидкість наростання тиску вибуху (dP/dt)_{max} і нормальна швидкість горіння S_u монотонно зменшуються зі збільшенням змісту кожного з вивчених флегматизаторами. При цьому найбільшою ефективністю володіє перфторбутан (C_4F_{10}).

					НУЦЗУ.2. 25-13-128.СХтаХТ.РПЗ-01	Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		66

ВИСНОВКИ

У даній роботі виконано дослідження, що спрямовано на вивчення особливостей займання і горіння горючих газів і парів в різних окисних середовищах. До числа основних результатів, отриманих в роботі, належать такі.

1. Вивчено вплив складу окисного середовища (підвищені і понижені концентрації кисню) і виду фторованого флегматизатора на характеристики горіння білястехіометричних сумішей водню, такі, як максимальний тиск вибуху, максимальна швидкість наростання тиску вибуху і нормальна швидкість горіння.

2. Показано, що добавки фторованих вуглеводнів до білястехіометричним газовим сумішам можуть одночасно приводити до зростання максимального тиску вибуху і падіння максимальної швидкості наростання тиску вибуху і нормальної швидкості горіння.

3. Досліджено методику оцінки фрикційної іскробезпеки конструкційних матеріалів, що поєднує в собі вплив на горючу суміш іскор як удару, так і тертя.

4. Визначено залежності максимального тиску вибуху, максимальної швидкості наростання тиску вибуху і нормальної швидкості горіння від змісту фторованих флегматизаторами C_d . Показано, що в діапазоні відносної концентрації трифторметана C_{rel} від 0 до 0,4 максимальний тиск вибуху відносно слабо залежить від змісту флегматизатора. У той же час максимальний тиск вибуху в разі C_2HF_5 і C_4F_{10} падає з ростом C_{rel} . Максимальна швидкість наростання тиску вибуху (dP/dt)_{max} і нормальна швидкість горіння S_u монотонно зменшуються зі збільшенням змісту кожного з вивчених флегматизаторами. При цьому найбільшою ефективністю володіє перфторбутан (C_4F_{10}).

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Потапенко О. С. Токсичність вогнегасних речовин і забруднення ними навколишнього середовища.
2. Нікітін Є. В., Шелест В. О. Україна в складі Віденської конвенції та Монреальського протоколу про охорону озонового шару. – 2014.
3. В. Свиридов Дії персоналу підприємства у випадку вибуху / «Охорона праці і пожежна безпека» № 12, 2015.
4. Теорія розвитку й припинення горіння. Практикум. Частина II: / О.В.Тарахно, Д.Г.Трегубов, К.В.Жернокльов, А.І. Шепелева, В.В. Коврегін — Х.: НУЦЗУ, 2010. -314 с.
5. Дудченко В. Г. Проблеми ліквідації пожеж у резервуарах з нагрітими нафтопродуктами підшаровим способом пожежогасіння.
6. Голов Н.В. Особенности воспламенения и горения горючих газов и паров в различных окислительных средах / Диссертация. Москва – 2017.
7. Pollard, R.T. The flammability limits of fluorobenzenes in oxygen and oxygen – nitrogen mixtures [Text] / R.T. Pollard // Combustion and flame. – 1971. – № 3. – P. 337–342.
8. Андросов А. С., Бегишев И. Р., Салеев Е. П. Теория горения и взрыва. – М. : Акад. ГПС МЧС России, 2007.
9. Fuller, L.E. Fluorocarbon combustion studies. IV – fundamental burning velocities of perfluorocyclobutane – oxygen mixtures [Text] / L.E. Fuller, E.A. Fletcher // Combustion and flame. – 1969. – № 3. - P. 434–436.
10. Croom, E.F. The combustion of hydrocarbons and fluorosubstituted hydrocarbons with nitrogen trifluoride and nitrogen trifluoride – oxygen mixtures [Text] / E.F. Croom // Combustion and flame. – 1966. – № 1. - P. 71–77.
11. Warnatz, J. Concentration - pressure - and temperature – dependence of the flame velocity in hydrogen – oxygen – nitrogen mixtures [Text] / J. Warnatz // Combustion Science and Technology. – 1981. – № 5/6. - P. 203–213.

					НУЦЗУ.2. 25-13-128.СХмХТ.РПЗ-01	Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		68

12. Баратов, А.Н. Новые средства пожаротушения [Текст] / А.Н. Баратов // Журнал ВХО им Д.И. Менделеева. – 1976. – № 4. - С. 369–379.
13. Mattula, R.A. Burning velocities of fluorocarbon – oxygen mixtures [Text] / R.A. Mattula, D.I. Orloff, J.T. Agnew // Combustion and Flame. – 1970. – № 1. – P. 97–102.
14. Simmons, R.F. The burning velocities of near limit mixtures of propane, air and hydrogen bromide [Text] / R.F. Simmons, N.W. Right // Combustion and Flame. – 1972. – № 2. - P. 203–206.
15. Yu, G. Laminar flame speeds of hydrocarbon – air mixtures with hydrogen addition [Text] / G. Yu, C.K. Laro, C.K. Wu // Combustion and Flame. – 1986. – № 3. - P. 339-347.
16. Андреева, Н.В. Нормальные скорости распространения пламени в смесях CO – O₂ – CO₂ [Текст] / Н.В. Андреева, А.И. Эльтанатов, И.И. Стрижевский // Физика горения и взрыва. – 1987. - № 4. - С. 41-44.
17. Лисочкин, Я.А. Определение параметров взрыва при дефлаграции в замкнутом объеме газообразных фторированных мономеров и их смесей [Текст] / Я.А. Лисочкин, В.И. Позняк, В.А. Рыкунов. // Химическая физика. - 1998. – № 11. – С. 117-119.
18. Noto, T. Inhibition effectiveness of halogenated compounds [Text] / T. Noto, V. Babushok, A. Hamins, W. Tsang // Combustion and Flame. – 1998. – № 1/2. - P. 147-160.
19. Babushok, V. Inhibition influence on the bistability of a CSTR [Text] / V. Babushok [et al.] // Combustion and Flame. – 1997. – V. 108. - № 1. - P. 61-70.
20. Азатян, В.В. Ингибирование развившейся детонации водородовоздушных смесей [Текст] / В.В. Азатян [и др.] // Доклады Академии Наук. - 2001. - № 1. - С. 55-58.
21. Ohtani, H. Experimental study on flammability characteristics of perfluorocarbons [Text] / H. Ohtani // Proceedings of the 6-th International Symposium: Fire Safety Science. – Melbourne: IAFSS, 2001. - P. 245-254.

22. Ohtani, H. Combustion characteristics of flammable gas mixtures with halon alternatives gases [Text] / H. Ohtani // Proceedings of the 2-nd NRIFD Symposium: Science, Technology and Standards for Fire Suppression Systems. - Mitaka, Tokyo: National Research Institute of Fire and Disaster, 2002. – P. 131–140.

23. Лисочкин, Я.А. Флегматизация метановоздушных смесей составами на основе углекислого газа и азота с добавками галоидуглеводородов [Текст] / Я.А. Лисочкин, В.И. Позняк // Физика горения и взрыва. - 2005. – № 5. - С. 23-28.

24. Takahashi, A. Effect of vessel size and shape on experimental flammability limits of gases [Text] / A. Takahashi [et al.] // Journal of Hazardous Materials. – 2003. – V. A105. - P. 27-37.

25. Azatyan, V.V. Flammability limits in mixtures of flammable gas (CH₄, H₂) – N₂O – fluorinated hydrocarbons [Text] / V.V. Azatyan [et al.] // Proceedings of the Seventh International Seminar: Fire and Explosion Hazards (ISFEH7). – USA: Providence, RI, 2013. – P. 312–320.

26. Shebeko, A.Yu. An experimental investigation of an inertization effectiveness of fluorinated hydrocarbons in relation to premixed H₂ - N₂O and CH₄ - N₂O flames. [Text] / A.Yu. Shebeko, [et al.] // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. - 2013. - № 26. - P. 1639–1645.

27. Шебеко, А.Ю. Влияние фторированных углеводородов на концентрационные пределы распространения пламени в смесях H₂ – N₂O и CH₄ – N₂O [Текст] / А.Ю. Шебеко [и др.] // Химическая физика. – 2014. – № 1. – С. 37–43.

28. Shebeko, A.Yu. Influence on Fluorocarbons Flammability Limits in the Mixtures of H₂–N₂O and CH₄–N₂O [Text] / A.Yu. Shebeko [et al.] // Russian Journal of Physical Chemistry. – 2014. – № 1. – P. 65–70.

29. Шебеко, А.Ю. Влияние бромистого водорода на нормальную скорость горения смесей водорода и метана с закисью азота и азотнокислородными составами [Текст] / А.Ю. Шебеко, Ю.Н. Шебеко, А.В. Зубань // Пожарная безопасность. – 2011. – № 2. – С. 25–35.

30. Маршалл, В. Основные опасности химических производств [Текст] / В.

					НУЦЗУ.2. 25-13-128.СХмаХТ.РПЗ-01	Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		70

Маршалл // пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 672 с.

31. Jansson, L. In: International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosion [Text] / L. Jansson [et al.] // The Eighth International Colloquium: Dust Explosions. – USA: Illinois, 1998. – P. 171–174.

32. Кравченко, В.С. Воспламеняющая способность электрического искрения [Текст] / В.С. Кравченко // Электричество. – 1952. – № 9. – С. 21–25.

33. Кочерга, Н.Г. Исследование условий обеспечения взрывоопасности рудничного производства, при эксплуатации которого возможно фрикционное горение: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 [Текст] / Кочерга Николай Григорьевич. – Днепропетровск, 1967. – 22 с.

34. А.с. 211009 СССР, МПК F 04d. Вентилятор [Текст] / И.А. Рашевский [и др.] (СССР). – № 1076585/24-6; заявл. 16.05.1966; опубл. 08.02.1968, Бюл. № 7. – 2 с. : ил.

35. Powell, F. Ignition of Gases and Vapors [Text] / F. Powell // Industrial and Engineering Chemistry. – 1969. – V. 61. – P. 29–37.

36. Гескин, С.С. Поджигание горючих смесей при одиночных ударах и моделирование процесса искрообразования [Текст] / С.С. Гескин, И.И. Стрижевский // Безопасность труда в промышленности. – 1968. – № 4. – С. 49–51.

37. Монюшко, В.Н. Количественная оценка взрывоопасности фрикционных искр [Текст] / В.Н. Монюшко // Безопасность труда в промышленности. – 1983. – № 12. – С. 37–38.

38. Гескин, С.С. Исследование процесса поджигания взрывоопасных парогазовоздушных смесей нагретыми при трении и ударах телами и выбор конструкционных материалов для подвижных узлов взрывозащищенного электрооборудования: в кн. взрывобезопасное электрооборудование [Текст] / С.С. Гескин. – М.: Энергия. – 1971. – С. 31–35.

39. Кочерга, Н.Г. Предотвращение вспышек метана при работе исполнительных органов горных машин с помощью орошения: в кн. Безопасная эксплуатация электромеханического оборудования [Текст] / Н.Г. Кочерга. –

					ЛУЦЗУ.2. 25-13-128.СХмАХТ.РПЗ-01	Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		71

Макеевка – Донбасс. – 1971. – С. 3–9.

40. Proust, C. Development of a method for predicting the ignition of explosive atmospheres by mechanical friction and impacts [Text] / C. Proust, [et al.] // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2007. – V. 20. – P. 349–369.

41. Komai, T. Ignition of methane - air mixtures by frictional sparks from light alloys [Text] / T. Komai, S. Uchida, M. Umezu // Safety Science. – 1994. – V. 17. – № 1. – P. 91–102.

42. Powell, F. Ignition of flammable gases and vapors by friction between footwear and flooring materials [Text] / F. Powell // Journal of Hazardous Materials. – 1977. – V. 2. – P. 309–319.

43. Schurlz, F. Experimentelle Untersuchungen über die Zündfähigkeit von Schlagfunken gegenüber explosiblen gasförmigen Gemischen [Text] / F. Schurlz, P. Dittmar // In: Arbeitsschutz. – 1963. – V. 10. – P. 259-266.

44. Пат. 2049332 Российская Федерация, МПК G01 N 33/20, E 21F 5/00. Способ испытания на фрикционную безопасность образцов из легких сплавов [Текст] / Ихно С.А., Белоконь Г.С.; заявитель и патентообладатель Макеевский науч.-исслед. ин-т по безопасности работ в горной промышленности. – № 5067567/28; заявл. 18.09.1992; опубл. 27.11.1995, Бюл. № 21. – 3 с.: ил.

45. Proust, Ch. A few fundamental aspects about ignition and flame propagation in dust clouds [Text] / Ch, Proust // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2006. – V. 19. – № 2. – P. 104–120.

46. Powell, F. Ignition of gases and vapors by friction and impact [Text] / F. Powell // Industrial Engineering Chemistry. – 1969. – V. 61. – № 12. – P. 29–37.

47. Lunn, G. Frictional ignition of powders: A review [Text] / G. Lunn // Health and Safety Laboratory, Harpur Hill, BUXTON, Derbyshire SK17 9JN. UK. – 2002. – 34 p.

48. Kragelskii, I.V. Friction and Wear [Text] / I.V. Kragelskii. – London: Butterworth, 1965. – 150 p.

49. 69. Proust, C. Toward modeling of frictional ignition [Text] / C. Proust, D.

					НУЦЗУ.2. 25-13-128.СХмаХТ.РПЗ-01	Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		72

Raveau // Proceedings of the 11th International Symposium: Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries. – Praha, 2004. – P 3348-3358.

50. Mc Geehin, P. Optical techniques in industrial measurements: safety in hazardous environments [Text] / Mc P. Geehin [et al.] // Final report № 3365/0/165/90/8-BCR-UK, 1994. – 15 p.

51. Carleton, F. Prenormative research on the use of optics in potentially explosive atmospheres [Text] / F. Carleton [et al.] // Final report № SMT4-CT96-2104, 2000. – 145 p.

52. Rogers, R. Ignition of dust clouds and dust deposits by friction sparks and hotspot [Text] / R. Rogers [et al.] // Communication to Hazards XIX. – Manchester: Institution of Chemical Engineers, 2006. – P. 387–400.

53. Beyer, M. Mechanisch erzeugte Ziindgefahrren in explosionfahigen Atmospharen – Ergebnisse des MECHEX – Projektes [Text] / M. Beyer [et al.] // 10 PTB – BAM Kolloquium zum Fragen des chemisches and physikalischen sicherheitstechnik. – Berlin: BAM, 2004. – P. 7–12.

54. Киселев, Я.С. Физические модели горения в системе пожарной безопасности [Текст] / Я.С. Киселев, О.А. Хорошилов, Ф.В. Демехин. – Санкт – Петербург: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2009. – 347 с.

55. BS EN 15967:2011. Determination of maximum explosion pressure and the maximum rate of pressure rise of gases and vapours [Text]. – London: BSI Standards Limited, 2012. – 42 p.

56. Andrews, G.E. Determination of Burning Velocities: A Critical Review [Text] / G.E. Andrews, D. Bradley // Combustion and Flame. – 1972. – № 2. – P. 133-153.

57. Бабкин, В.С. Влияние кривизны на скорость распространения ламинарного пламени в бедной пропано-воздушной смеси [Текст] / В.С. Бабкин, И.Л. Кузнецов, Л.С. Козаченко. – М.: АН СССР. – 1962. – № 3. – С. 625–627.

58. Bradley, D. Mathematical Solutions for Explosions in Spherical Vessels [Text] / D. Bradley, A. Mitcheson // Combustion and Flame Journal. – 1976. – № 2. – P.

					НУЦЗУ.2. 25-13-128.СХмаХТ.РПЗ-01	Лист
						73
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

201–217.

59. ГОСТ 12.1.044-89 (ИСО 4589-84). Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения [Текст]. – Введ. 1991-01-01. – М.: Стандартиформ, 2006. – 100 с

60. СОУ 49.2-20077720-001:2014 Налив, слив и перевозка сжиженных углеводородных газов в железнодорожных вагонах-цистернах. Общие технические требования.

61. Таубкин, С.И. Пожар и взрыв, особенности их экспертизы [Текст] / С.И. Таубкин. – М.: ВНИИПО МЧС России, 1998. – 600 с.

62. ГОСТ 22782.0-81 (СТ СЭВ 3141-81). Электрооборудование взрывозащищенное. Общие технические требования и методы испытаний [Текст]. – Введ. 1982-07-01. – М.: Госстандарт. – 1982. – 32 с.

63. ISO/DIS 80079-36. Взрывоопасные среды. Часть 36. Неэлектрическое оборудование для взрывоопасных сред. Общие требования и методы испытаний.

64. Шебеко, Ю.Н. Вплив вмісту кисню в окислювальному середовищі на ефективність інгібування горіння водню [Текст] / Ю.М. Шебеко [и др.] // Пожежна безпека. - 2006. - № 4. - С. 65 - 72.

65. Азатян, В.В. Подвійна роль фторованих вуглеводнів як флегматизаторами і промотерів горіння газових сумішей [Текст] / В.В. Азатян [и др.] // Пожежна безпека. - 2008. - № 3. - С. 40-51.

66. Шебеко, Ю.Н. Вплив вмісту кисню в окислювальному середовищі на ефективність інгібування горіння водню [Текст] / Ю.М. Шебеко [и др.] // Пожежна безпека. - 2006. - № 4. - С. 65 - 72.

67. Копылов, С.Н. Механизм деструкции фторированных углеводородов в пламени [Текст] / С.Н. Копылов, С.А. Кольцов // Пожарная безопасность. – 2005. – № 2. – С. 56–62.

68. Методичні вказівки до виконання дипломного проекту /роботи освітньо-кваліфікаційного рівня «спеціаліст» за напрямом підготовки 05.13.01 –

					НУЦЗУ.2. 25-13-128.СХтаХТ.РПЗ-01	Лист
Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		74

«Хімічна технологія» спеціальність 7.05130106 «Природоохоронні хімічні технології» / Уклад. О.В. Тарахно, В.Д. Калугін, М.А. Чиркіна . — Х. : НУЦЗУ, 2015 . — 38 с.

					НУЦЗУ.2. 25-13-128.СХтаХТ.РПЗ-01	Лист
Зм	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		75

ДОДАТКИ

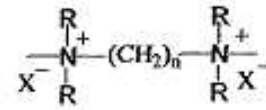
					<i>Лист</i>
<i>Зм</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>76</i>

НУЦЗУ.2. 25-13-128.СХтаХТ.РПЗ-01

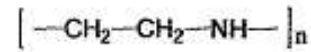
Додаток А

Хімічні формули сполук, згадуваних в тексті

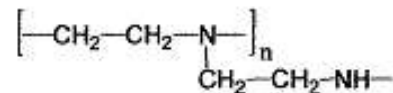
Ионены



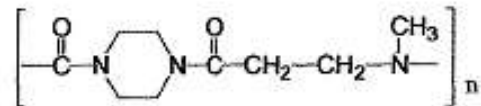
полиэтиленимин линейный



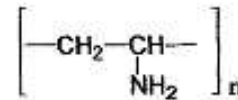
полиэтиленимин
разветвленный



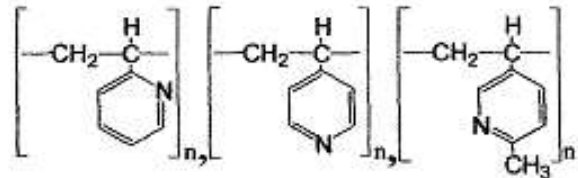
полиамидоамины



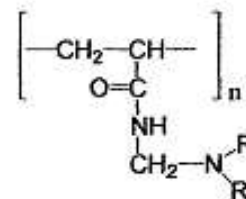
поливиниламин



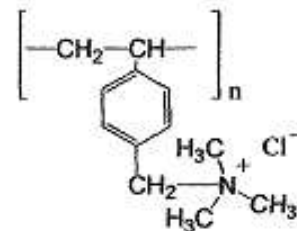
поливинилпиридины



полиаминоалкилметакрилаты

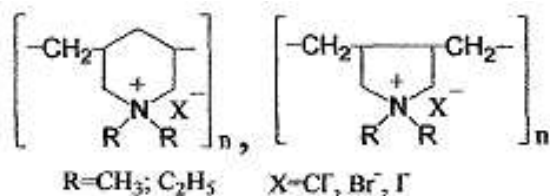


поли-4-винилбензил-
триметиламмоний хлорид

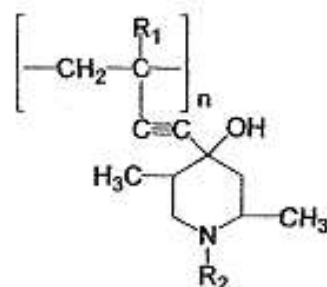


Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

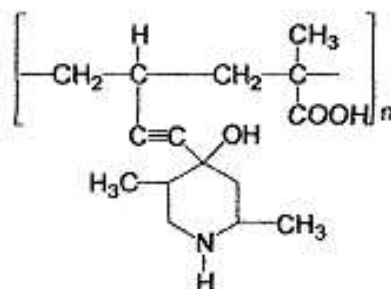
ПОЛИАЛЛИЛАММОНИЕВЫЕ
СОЛИ



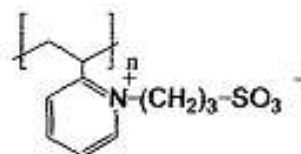
ВИНИЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДНЫЕ
ПОЛИПИРЕДОЛОВ



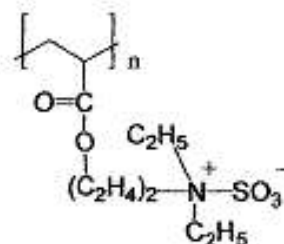
ПОЛИАМФОЛИТЫ (НАПРИМЕР,
НА ОСНОВЕ 2,5-ДИМЕТИЛ-4-
ВИНИЛЭТИНИЛПИПИДОЛА-4
И МЕТАКРИЛОВОЙ КИСЛОТЫ)



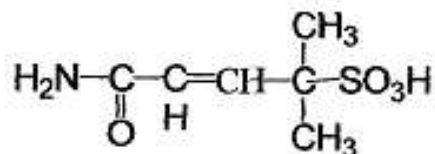
АРОМАТИЧЕСКИЕ ПОЛИСУЛЬФО
ПРОПИЛБЕТАИНЫ



АЛИФАТИЧЕСКИЕ ПОЛИСУЛЬФОПРОПИЛБЕТАИНЫ



2-АКРИЛАМИДО-2-МЕТИЛПРОПАН
СУЛЬФОКИСЛОТА



Зм	Арк.	№ документа	Підпис	Дата