

Державна служба України з надзвичайних ситуацій  
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

**С.О. Ємельяненко, О.І. Лавренюк, Б.М. Михалічко**

# **ТЕОРІЯ ГОРІННЯ ТА ВИБУХУ**

**Пожежі та їх ліквідація**

**Навчальний посібник**

Львів 2019

УДК 542.9  
ББК 24я2  
Є 60

**С.О. Ємельяненко, О.І. Лавренюк, Б.М. Михалічко**

Теорія горіння та вибуху. Пожежі та їх ліквідація [Текст] : навчальний посібник / Ємельяненко С.О., Лавренюк О.І., Михалічко Б.М.; ЛДУ БЖД. – Львів : ЛДУ БЖД, 2019. – 158 с.

**Рецензенти:** **Кочубей В.В.**, кандидат хімічних наук, доцент кафедри фізичної, аналітичної та загальної хімії Національного університету «Львівська політехніка»

**Сиса Л.В.**, кандидат хімічних наук, доцент, науковий співробітник науково-дослідної лабораторії Львівського державного університету безпеки життєдіяльності

У навчальному посібнику наведено теоретичні основи припинення горіння та запобігання вибуху, розкрито основні методи гасіння пожеж для їх ліквідації, також розкрито небезпеку факторів пожеж, контрольні запитання, рекомендована література. Навчальний посібник «Теорія горіння та вибуху. Пожежі та їх ліквідація» є логічним продовженням навчального матеріалу викладеного в першій частині навчального посібника «Теорія горіння та вибуху».

Навчальний матеріал посібника призначений для курсантів, студентів та слухачів зі спеціальності цивільного захисту та споріднених спеціальностей, які використовують методи припинення горіння, та для виконання бакалаврських і магістерських робіт.

Рекомендовано вченою радою Львівського державного університету безпеки життєдіяльності (*Протокол № 5 від 20. 12. 2018 р.*)

©С.О. Ємельяненко, 2019  
© О.І. Лавренюк, 2019  
© Б.М. Михалічко, 2019  
© ЛДУ БЖД, 2019

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	7
<b>РОЗДІЛ 1. ПОЖЕЖА. ПАРАМЕТРИ ПОЖЕЖ</b> .....	8
1.1. Пожежа, класифікація пожеж .....	8
1.2. Пожежне навантаження та його розподіл. ....	12
1.3. Основні параметри пожежі. Поняття про динаміку пожеж.....	14
1.4. Зони пожежі .....	17
<b>РОЗДІЛ 2. НЕБЕЗПЕЧНІ ЧИННИКИ ПОЖЕЖІ</b> .....	20
2.1. Поняття про продукти згорання, їх склад та агрегатний стан ....	20
2.2. Полум'я та іскри .....	21
2.3. Температура пожежі .....	22
2.4. Токсичні продукти горіння і термічного розкладу .....	25
2.5. Дим .....	26
<b>РОЗДІЛ 3. ВИБУХ. ПАРАМЕТРИ ВИБУХУ</b> .....	28
3.1. Вибух, класифікація вибухів. ....	28
3.2. Умови виникнення вибуху. ....	31
3.3. Вибух газопароповітряних сумішей .....	33
3.4. Вибух пилоповітряних сумішей.....	34
3.5. Параметри, що характеризують пожежовибухонебезпеку аерозолів.....	41
<b>РОЗДІЛ 4. НЕБЕЗПЕЧНІ ФАКТОРИ ВИБУХУ</b> .....	44
4.1. Чинники, що впливають на концентраційні межі поширення полум'я .....	44
4.2. Чинники, що впливають на межі вибуху .....	46
4.3. Температура і тиск вибуху.....	48
4.4. Ударні хвилі, детонація.....	49
<b>РОЗДІЛ 5. ВОГНЕГАСНІ ЗАСОБИ</b> .....	51
5.1. Вогнегасні засоби та їх класифікація.....	51
5.2. Вода. Компактні і розприскані струмені води. ....	53
5.3. Повітряно-механічна піна.....	61
5.4. Вогнегасні порошки. ....	62
5.5. Аерозолі. ....	64
5.6. Використання хладонів для гасіння пожеж і запобігання вибухам.....	66

<b>РОЗДІЛ 6. МЕХАНІЗМ ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ ТА ВИБУХУ</b> .....	71
6.1. Гасіння пожежі через вилучення однієї зі складових частин горіння та граничні параметри процесу горіння. ....	71
6.2. Теплова теорія згасання полум'я. ....	73
6.3. Умови та принципи припинення горіння. ....	74
6.4. Способи запобігання та припинення горіння. ....	77
<b>РОЗДІЛ 7. ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ ОХОЛОДЖЕННЯМ</b> .....	79
7.1. Механізм припинення горіння охолоджувальними вогнегасними засобами. ....	79
7.2. Рідинні розприскані струмені. ....	80
7.3. Підвищення вогнегасної ефективності води. ....	83
7.3.1. Вплив хімічних добавок на вогнегасну ефективність води. ....	84
7.3.2. Підвищення вогнегасної ефективності води шляхом використання змочувачів. ....	84
7.3.3. Підвищення вогнегасної ефективності води шляхом використання загущувачів. ....	86
7.3.4. Добавки проти замерзання. ....	88
<b>РОЗДІЛ 8. ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ ІЗОЛЮВАЛЬНИМИ ВОГНЕГАСНИМИ ЗАСОБАМИ</b> .....	90
8.1. Припинення горіння через ізолювання. ....	90
8.2. Механізм припинення горіння піною. ....	92
8.3. Класифікація піноутворювачів. ....	94
8.4. Застосування пін для гасіння пожеж. ....	97
<b>РОЗДІЛ 9. ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ ФЛЕГМАТИЗУВАЛЬНИМИ ВОГНЕГАСНИМИ ЗАСОБАМИ</b> .....	101
9.1. Механізм припинення горіння нейтральними газами. ....	101
9.2. Види флегматизувальних вогнегасних засобів та їх характеристика. ....	102
9.2.1. Флегматизувальна дія вуглекислого газу. ....	105
9.2.2. Флегматизувальна дія азоту. ....	109
9.2.3. Флегматизувальна дія водяної пари. ....	110
9.3. Механізм припинення горіння за допомогою інертних газів. Показник вогнегасної ефективності інертних газів. ....	110
9.4. Ефективність і вибір флегматизатора залежно від типу горючого матеріалу та умов пожежі. ....	112

<b>РОЗДІЛ 10. ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ ІНГІБУВАННЯМ.....</b>	<b>116</b>
10.1. Припинення горіння методом хімічного гальмування реакції. ....	116
10.2. Механізм припинення горіння речовинами-інгібіторами. ....	117
10.3. Припинення горіння галогенвуглеводнями.....	119
10.4. Припинення горіння вогнегасними порошками. ....	124
10.5. Припинення горіння вогнегасними хладонами.....	126
<b>РОЗДІЛ 11. ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ АЕРОЗОЛЯМИ.....</b>	<b>130</b>
11.1. Механізм припинення горіння аерозолями.....	130
11.2. Переваги та недоліки аерозолів. ....	131
11.3. Фактори, що впливають на вогнегасну ефективність аерозолів.....	137
11.4. Застосування аерозолів для гасіння пожеж.....	138
<b>РОЗДІЛ 12. ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ КОМБІНОВАНИМИ ЗАСОБАМИ .....</b>	<b>141</b>
12.1. Принцип комбінування вогнегасних засобів. ....	141
12.2. Методи підвищення вогнегасної ефективності води. ....	143
12.3. Комбінування добавок з метою підвищення вогнегасної ефективності води.....	145
12.4. Застосування поверхневоактивних речовин з метою підвищення вогнегасної ефективності води.....	148
12.5. Застосування водорозчинних полімерів з метою підвищення вогнегасної ефективності води .....	151
12.6. Застосування неорганічних солей з метою підвищення вогнегасної ефективності води. ....	153
Література.....	157

**УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ:**

ГВА –генератори вогнегасного аерозолю;

ЛЗР – легкозаймисті речовини;

ГР – горюча речовина;

Ок – окисник;

НКМПП – нижня концентраційна межа поширення полум'я;

ВКМПП верхня концентраційна межа поширення полум'я;

ПАР – поверхнево-активні речовини;

СПП – стволи повітряно-пінні;

ГПС – генератори піни середньої кратності;

ТПК – твердопаливна композиція.

## ВСТУП

Для успішної та ефективної боротьби з пожежами фахівцям органів та підрозділів цивільного захисту необхідно знати механізм і закономірності виникнення горіння, його розвитку та припинення, умови, за яких може статися вибух.

Теоретичний матеріал навчальної дисципліни «Теорія горіння та вибуху» базується на знаннях із дисциплін: фізики, хімії, термодинаміки тощо.

Основою навчальної дисципліни «Теорія горіння та вибуху» є вивчення теоретичних положень виникнення та припинення горіння та вибуху, які були висвітлені в посібнику «Теорія горіння та вибуху». В посібнику «Теорія горіння та вибуху. Пожежі та їх ліквідація» аналізуються умови виникнення пожеж, основні чинники та вплив різних способів припинення горіння задля ліквідації пожеж.

Мета курсу – закласти основу для підготовки кваліфікованих фахівців, які володіли б об'ємом знань необхідних для прогнозування умов виникнення, поширення та припинення процесів горіння, для визначення параметрів пожежної небезпечності речовин і матеріалів.

Завданням курсу є:

- набуття курсантами (студентами) теоретичних знань і практичних умінь з хімічних основ, аналізу і прогнозування умов виникнення, поширення та припинення процесів горіння, з визначення параметрів пожежної небезпечності речовин і матеріалів;
- набуття курсантами (студентами) навичок дослідного та розрахункового визначення окремих показників пожежної небезпечності речовин та матеріалів;
- формування вмій самостійно здобувати і застосовувати знання, спостерігати і пояснювати явища, що супроводжують процес горіння, а також вмій користуватися підручником, довідковою та хрестоматійною літературою;
- формування експериментальних вмій: навиків використовувати прилади та інструменти, обробляти результати вимірювань і робити висновки на основі експериментальних даних, дотримуватись правил безпеки праці.

## РОЗДІЛ 1 ПОЖЕЖА. ПАРАМЕТРИ ПОЖЕЖ

### 1.1. Пожежа, класифікація пожеж

Пожежа (ДСТУ 2272:2006) – позарегламентний процес знищення або пошкодження вогнем майна, під час якого виникають чинники, небезпечні для живих істот і довкілля.

Пожежна небезпечність речовини (матеріалу) – сукупність показників, що кількісно характеризують властивості речовини (матеріалу), які можуть бути чинниками пожежної небезпеки об'єкта.

Пожежна небезпека об'єкта – сукупність чинників, які зумовлюють можливість виникнення та (або) розвитку пожежі на об'єкті.

Речовини або матеріали, властивості яких певним чином сприяють виникненню або розвитку пожежі, відносять до пожежонебезпечних. До пожежонебезпечних можуть відноситися речовини різних класів. Серед них можуть бути і горючі, і ті, що не горять, але підтримують горіння. Наприклад, це можуть бути окисники.



**Рисунок 1.1** – Лісова пожежа





**Рисунок 1.2** – Пожежа на об'єкті електромереж



**Рисунок 1.3** – Пожежа на об'єкті хімічної промисловості

У теорії горіння пожежі класифікують за умовами масо- і теплообміну і за видами горючих матеріалів. За умовами масо- і теплообміну розрізняють дві великі групи: пожежі на відкритих просторах (пожежі I класу) і внутрішні пожежі (пожежі II класу).

Пожежі I класу умовно поділяють на ті, що поширюються (клас I а), ті, що не поширюються (клас I б) та масові (клас I в).

Пожежі I а класу – це пожежі, розміри яких, тобто межі яких (ширина фронту, периметр, радіус, подовженість флангів тощо) із часом збільшуються. При цьому пожежа може поширюватися в різних напрямках із однаковою швидкістю, а може поширюватись переважно в од-

ному напрямку. Все залежить від умов теплообміну, розмірів факела полум'я, критичних теплових потоків (тих, що викликають підігрівання матеріалу аж до займання), напрямку і швидкості вітру тощо.

Пожежами класу I б називаються пожежі, розміри яких із часом лишаються незмінними. Така пожежа спостерігається тоді, коли займання інших об'єктів від теплового випромінювання об'єкта, що горить, виключене. До подібних пожеж відносять, наприклад, горіння окремого резервуара на складах нафти або нафтопродуктів.

Пожежі I б класу можуть переходити в пожежі I а класу. Наприклад, викид палаючої нафти з резервуара, охопленої пожежею, в інші резервуари робить пожежу, що не поширюється, пожежею, що поширюється.

Окремим типом пожеж є пожежа I в класу. Під цим розуміють масову пожежу, тобто сукупність окремих і суцільних пожеж у населених пунктах, на великих складах горючих матеріалів і на промислових підприємствах. Розглядають таку пожежу, як уже говорилося, як підклас пожеж на відкритих просторах, хоча це і не зовсім точно, адже вона може включати й окремі пожежі в огороженні.

Окрема пожежа – це пожежа, що виникла в окремій будівлі або споруді.

Суцільна пожежа – це одночасне інтенсивне горіння переважної більшості будівель та споруд на даній ділянці забудови.

Пожежа I в класу може перейти у вогняний шторм – особливу форму пожежі, яка характеризується утворенням суцільного турбулентного факела полум'я. У такому факелі спостерігається потужний, спрямований вгору конвективний потік продуктів згорання і нагрітого повітря; навколишнє повітря затягується до меж вогняного шторму зі швидкістю 14 м/с і більше.

Пожежі в огороженні поділяють на закриті і відкриті. (Не потрібно плутати відкриті пожежі в огороженні з пожежами на відкритих просторах!).

Відкриті пожежі (клас II а) розвиваються при повністю або частково відкритих витяжних отворах вікнах, дверях тощо. Відкриті пожежі характеризуються великою швидкістю поширення полум'я з переважним напрямком у бік відкритих отворів. У свою чергу, відкриті пожежі поділяють на дві групи. До першої відносять пожежі у приміщеннях висотою до 6 м, у яких отвори розташовані на одному рівні і газообмін проходить у межах висоти цих отворів (житлові приміщення, адміністративні будинки, лікувальні і навчальні заклади тощо).

До другої групи відносять пожежі у приміщеннях висотою більше 6 м, у яких отвори в огороженнях розташовано на різних рівнях, а відстані між центрами припливних і витяжних отворів можуть бути досить значними. У таких приміщеннях спостерігаються великі перепади тиску по висоті і, відповідно, великі швидкості руху газових потоків, а звідси і велика швидкість вигорання. До таких приміщень відносять машинні зали, цехи промислових підприємств, видовищні заклади тощо.

Закриті пожежі (клас II б) проходять при повністю закритих витяжних отворах. Коли газообмін здійснюється тільки внаслідок інфільтрації повітря і продуктів згорання крізь нещільні огороження – щілини у дверях, вікнах тощо. При закритих пожежах швидкість вигорання не залежить від фізико-хімічних властивостей і розподілу в приміщенні горючих матеріалів, а лімітується витратою повітря, яке надходить крізь щілини. Виняток становлять особливо небезпечні кисневмісні горючі матеріали (целулоїд, порох тощо), для горіння яких повітря або взагалі не потрібне, або потрібне в дуже невеликих кількостях.

Закриті пожежі можуть бути розділені на три групи: у приміщеннях із заксленими віконними отворами (житлові та громадські будівлі); у приміщеннях із незаксленими дверними отворами (склади, виробничі приміщення тощо); у замкнених об'ємах без віконних отворів (підвали промислових будівель, трюми морських суден тощо).

Залежно від виду матеріалів і речовин, які горять, пожежі поділяють на класи А, В, С, D та F (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

### Класифікація пожеж

Клас пожежі	Характеристика класу
А	Супроводжуються горінням твердих матеріалів, зазвичай органічного походження, під час горіння яких, як правило, утворюються тліючі продукти згорання
В	Супроводжуються горінням рідин або твердих речовин, які переходять у рідкий стан
С	Супроводжуються горінням газів
D	Супроводжуються горінням металів та металорганічних сполук
F	Супроводжуються горінням речовин, які використовують для приготування їжі (рослинна і тваринна олії та жири) і які містяться в кухонних приладах

Як бачимо, на відміну від ГОСТ 27331-87, поділ класів пожеж на підкласи не передбачено, натомість додано новий клас пожеж – F. Варто зазначити, що цей клас було внесено до європейських норм лише 2004 року, після того як принципи підходи і способи гасіння олій та жирів, що використовують у кухонних приладах, вже було належним чином розроблено і впроваджено.

Пожежа класу А характеризується горінням твердих матеріалів, зазвичай органічного походження, під час горіння яких, як правило, утворюються тліючі вуглини.

До пожеж класу В відносяться пожежі з горінням рідин або твердих речовин що плавляться.

До пожеж класу С відносяться пожежі з горінням газоподібних речовин (водень, метан, гази з газової свердловини тощо).

До пожеж класу D відносяться пожежі з горінням металів та металорганічних сполук (натрій, калій, метилнатрій, діетилмагній тощо).

До пожеж класу F відносять горіння речовин, які використовуються для приготування їжі (рослинні і тваринні олії та жири) і які містяться в кухонних приладах.

## 1.2. Пожежне навантаження та його розподіл

В основі кожної пожежі лежить процес горіння. Горіння – це хімічна реакція взаємодії між горючою речовиною та окисником. Ця взаємодія проходить через руйнування старих зв'язків з утворенням нових. Розрив старих зв'язків потребує затрати енергії, а при утворенні нових – виділяється енергія. Тобто для розриву хімічних зв'язків потрібне підігрівання чи джерело запалювання.

Таким чином, головними умовами горіння є наявність горючої речовини, надходження в зону хімічної реакції окисника і безперервне виділення тепла, необхідного для підтримування горіння. При виникненні горіння відповідними умовами є наявність горючої речовини, наявність окисника і джерела запалювання, у тому числі джерела запалювання від самозаймання.

Горючий матеріал це категорія кількісна. Характеризується вона, по-перше, типом горючого матеріалу і, по-друге, пожежним навантаженням. Тип горючого матеріалу визначає кількість тепла, яке виділяється при горінні одиниці маси матеріалу, тобто – це теплота згоряння 1 кг матеріалу ( $Q_n$ ). А пожежне навантаження – це кількість цього матеріалу на одиницю площі.

Часто, у тому числі в ДСТУ, пожежне навантаження визначається як величина, яка одночасно відображає горючого матеріалу і його кількість.

Характеризуючи тільки кількість, під пожежним навантаженням розуміють масу всіх горючих і важкогорючих матеріалів, які є в приміщенні або на відкритому просторі, віднесену до площі підлоги приміщення або площі, яку займають ці матеріали на відкритому просторі. Загальноприйнятого позначення цього показника немає. Ми будемо позначати цей показник як  $P$ . Отже, згідно з визначенням:

$$P = \frac{m}{S},$$

де  $m$  – маса горючих та важкогорючих матеріалів, кг;

$S$  – площа підлоги приміщення або відкритої місцевості, м<sup>2</sup>.

До складу пожежного навантаження входять всі горючі і важкогорючі матеріали, які є на заданому майданчику: обладнання, меблі, двері, віконні рами, сировина, готова продукція, навіть стіни і перекриття, якщо їх зроблено з горючих або важкогорючих матеріалів.

Пожежне навантаження у приміщеннях поділяють на постійне та тимчасове. До постійного відносять горючі та важкогорючі матеріали будівельних конструкцій, технологічне обладнання тощо. До тимчасового – сировину, готову продукцію меблі тощо, тобто те, що можна без особливих зусиль і наслідків пересувати з місця на місце.

Повне пожежне навантаження визначається як сума постійного і тимчасового.

У багатоповерхових будинках пожежне навантаження для кожного поверху визначають окремо. Маса горючих елементів перекриття горища входить до пожежного навантаження горища.

Приблизне пожежне навантаження для деяких приміщень приймається такою:

1. житлові, адміністративні і промислові будівлі – не більше 50 кг/м<sup>2</sup> (якщо основні елементи будівель негорючі);
2. окремі квартири:
  - однокімнатна – 27 кг/м<sup>2</sup>;
  - двокімнатна – 30 кг/м<sup>2</sup>;
  - три кімнатна – 40 кг/м<sup>2</sup>;
3. будинки III ступеня вогнестійкості – 100 кг/м<sup>2</sup>;
4. виробничі приміщення, пов'язані з виробництвом і обробкою горючих речовин і матеріалів – 250-500 кг/м<sup>2</sup>;
5. складські приміщення, сушарні – 1000-1500 кг/м<sup>2</sup>;

б. приміщення, де розташовані лінії сучасних технологічних процесів, та високостелажні склади – 2000-3000 кг/м<sup>2</sup>.

Якщо горючі матеріали – тверді, велике значення мають подрібненість і розташування пожежного навантаження. Матеріали подрібнені, розташовані на стелажах і з великими проміжками, горіти будуть набагато інтенсивніше, ніж матеріали, розміщені на підлозі щільно складені один близько одного. Так, окремі аркуші паперу згорають за секунди. У той же час рулон паперу або щільно складені книжки майже не горять. Розміри зазору, необхідного для вільного горіння, залежать від розмірів самого предмета, що горить, і від його поверхні. Для того, щоб із всіх боків горів сірник, достатньо зазорів у 3 мм. А для поверхні дерев'яного щита розмірами 2×2 м може виявитися недостатнім і зазор у 15 мм. На практиці вільною для горіння вважають поверхню, яка від іншої стоїть на відстані у 20-50 мм. Для оцінки вільної поверхні пожежного навантаження вводять коефіцієнт поверхні  $K_n$ . Коефіцієнтом поверхні називають відношення площі поверхні горіння  $S_{nz}$  до площі пожежі  $S_n$ :

$$K_n = \frac{S_{nz}}{S_n},$$

Рідини горять тільки з поверхні, тому для рідин  $S_{nz} = S_n$  і  $K_n = 1$ .

Тверді матеріали мають змогу горіти одночасно і по горизонтальній, і по вертикальній, і по нахиленій поверхні. Тому для них  $K_n > 1$ . Так, для куба з ребром  $a$ :  $S_n = a^2$ , а  $S_{nz} = 5a^2$ ;  $K_n = 5$ .

Такий коефіцієнт спостерігається, наприклад, для складів деревини. Для меблів і подібних об'єктів він здебільшого дорівнює 2-4. Для більшості видів пожежного навантаження  $K_n$  розраховується завчасно і приведений у спеціальних таблицях.

Відоображаючи вираз пожежного навантаження у теплових одиницях, ДСТУ визначає його як “кількість тепла, що може виділитися при повному згорянні всіх матеріалів, які перебувають у замкненому об'ємі, включаючи поверхні стін, перегородок, підлоги та стелі”.

Відповідно, питома пожежна навантаження – це пожежна навантаження на 1 м<sup>2</sup> площі (для будинків і споруд – на 1 м<sup>2</sup> підлоги).

### 1.3. Основні параметри пожежі. Поняття про динаміку пожеж

Пожежі не бувають повністю однаковими. Ми вже бачили, що горіння, яке лежить в основі пожежі, може, бути дефлаграційним і детонаційним, кінетичним і дифузійним, гомогенним і гетерогенним, за режимом: ламінарним і турбулентним. Відрізняються й умови по-

жеж: місце і форма розташування пожежного навантаження, умови тепло- і газообміну тощо.

Для того, щоб пожежу описати і порівняти з іншими, необхідні певні параметри, за якими пожежі можна було б характеризувати. Ми розберемо найбільш інформативні з них.

Тривалість пожежі  $\Delta\tau_n$  (хв) – час від моменту її виникнення до повного припинення горіння.

Площа пожежі  $S_n$  (м<sup>2</sup>) – площа проекції зони горіння на горизонтальну або вертикальну площину. У більшості випадків зону горіння проєктують на горизонтальну площину. Проекцію на вертикальну площину використовують при горінні газових фонтанів, тонких вертикальних об'єктів (перегородок, стендів) тощо. У багатоповерхових будинках площу пожежі визначають як суму площ пожеж на окремих поверхах.

Температура пожежі  $T_n$  (К) або  $t_n$  (°С). Температура внутрішньої пожежі – це середньоб'ємна температура у приміщенні, тобто температура, до якої нагріваються продукти горіння всередині приміщення. Температура пожежі на відкритому просторі – це температура полум'я. Температура на відкритому просторі в загальному випадку більша за температуру пожежі в огороженні.

Лінійна швидкість поширення полум'я  $v_n$  (м/с) – швидкість поширення полум'я по поверхні горючого матеріалу, тобто відстань, яку проходить фронт полум'я за одиницю часу. Залежить цей параметр від природи горючої речовини і ступеня її подрібненості, початкової температури, умов газообміну. Під час навіть однієї пожежі лінійна швидкість поширення полум'я не залишається постійною, тому користуються приблизними середніми значеннями. Найбільшою швидкість поширення полум'я є для газів, які не потребують великої підготовки до горіння. У рідинах ця швидкість менша, бо рідини спочатку треба підігріти до температури кипіння і випарувати. Найменша швидкість поширення полум'я є у твердих речовинах. Тверді речовини перед горінням треба нагріти, розплавити або розкласти до газоподібного стану.

Масова швидкість вигорання  $v_m$  (кг/м<sup>2</sup>·с) – маса речовини, яка вигоряє за одиницю часу з одиниці поверхні.

Теплота пожежі  $Q_n$  (кДж/с) – кількість тепла, що виділяється в зоні горіння за одиницю часу.

$$Q_n = \eta \cdot v_m \cdot S_n \cdot Q_n,$$

де  $\eta$  – коефіцієнт хімічного недопалу;

$v_m$  – масова швидкість вигорання, кг/м<sup>2</sup>·с;

$S_n$  – площа пожежі, м<sup>2</sup>;

$Q_n$  – нижча теплотворна спроможність горючої речовини, кДж/кг.

Коефіцієнт хімічного недопалу для речовин і матеріалів обирається залежно від об'єму повітря  $V_n$  ( $\text{м}^3$ ), необхідного для повного згоряння одиниці маси горючого матеріалу (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2

### Коефіцієнт хімічного недопалу для речовин і матеріалів

$V_n, \text{м}^3$	$\eta$
$> 10$	0,80-0,90
5 – 10	0,90 - 0,95
$< 5$	0,95-0,99

Інтенсивність газообміну  $I_2$  ( $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ) – кількість повітря, що надходить за одиницю часу до одиниці площі пожежі. Розрізняють необхідну  $I_2^H$  і фактичну  $I_2^F$  інтенсивність газообміну. Кожна з цих величин показує, яка кількість повітря повинна подаватися за одиницю часу до одиниці площі пожежі для забезпечення повного згоряння матеріалу. В умовах пожежі повне згоряння ніколи не досягається, навіть тоді, коли є надлишок повітря. Тому цей параметр є теоретичним, свого роду точка відліку. Фактична інтенсивність газообміну відображає фактичне надходження повітря до пожежі. Цей параметр визначає повноту згоряння, густоту задимлення, інтенсивність поширення пожежі тощо. Обидва параметри інтенсивності газообміну мають сенс тільки при застосуванні до внутрішніх пожеж, коли доступ повітря можна оцінити за розмірами витяжних отворів. У випадку пожежі на відкритому просторі оцінити притік повітря неможливо.

Інтенсивність (або густота) задимлення  $z$  ( $\text{г}/\text{м}^3$ ) характеризує погіршення видимості і ступінь токсичності атмосферного повітря в зоні задимлення. Вона визначається за товщиною шару диму, крізь який вже не видно світла еталонної лампи, або за кількістю твердих частинок, що містяться в одиниці об'єму (таблиця 1.3).

Таблиця 1.3

### Густота задимленості, що утворюється при горінні карбонвмісних речовин

Щільність задимленості	Густота диму, $\text{г}/\text{м}^3$	Видимість предметів, які освітлюються еталонною лампою, м
Щільна	$> 1,5$	$< 3$
Середньої щільності	0,6-1,5	3-6
Низької щільності	0,1-0,6	6-12



Крім перелічених параметрів пожеж користуються ще такими параметрами як фронт поширення горіння, висота полум'я, інтенсивність випромінювання тощо.

Кожен із параметрів пожежі не є таким, що існує сам по собі. Кожен із них залежить від інших і, у свою чергу, впливає на інші. Наприклад, температура пожежі залежить і від типу матеріалу, і від умов газообміну. Умови газообміну, не в останню чергу, залежать від розмірів пожежі та кількості горючої речовини, яка ще не згоріла. Остання залежить від швидкості вигорання матеріалу і величини пожежного навантаження. Швидкість вигорання залежить від швидкості хімічної реакції окиснення, яка, у свою чергу, залежить від температури експоненціально, тощо.

Окрім того, що параметри пожежі взаємопов'язані, вони під час пожежі ще й не лишаються постійними, вони динамічні. Під динамікою пожежі розуміють зміну основних параметрів пожежі в часі і просторі. Дослідити зміну в часі і просторі всіх параметрів неможливо, а оскільки вони взаємопов'язані, то цього і не потрібно. При вивченні динаміки пожежі використовують такі її параметри, як площа пожежі, її температура та інтенсивність задимлення. Ці параметри найлегше виміряти і вони найбільш інформативні.

#### 1.4. Зони пожеж

Простір, у якому відбувається пожежа, а також простір навколо пожежі умовно поділяють на три зони: горіння, теплової дії, задимлення. Чітких меж ці зони, як правило, не мають.

Зоною горіння називається частина простору, в якій завершується підготовка горючих речовин до горіння і власне горіння. Підготовка до горіння це розігрівання, розплавлення, випаровування або розклад речовин. Зона горіння включає об'єм парів і газів, обмежений самою зоною горіння і поверхнею речовини, що горить. Із цієї поверхні пара і гази потрапляють в об'єм зони горіння.

У випадку гетерогенного горіння і тління зона горіння збігається з поверхнею горіння. На пожежі зона горіння є єдиною зоною, яка продукує тепло. Інші дві зони тепло тільки розсіюють. Таким чином, саме в зоні горіння температура полум'я найвища. Сама ця зона теж не однорідна. Горіння відбувається не в усьому об'ємі, а лише у фронті горіння. Про це йшлося при розгляді теми 1. Фронт горіння – вузька смуга, товщиною частки міліметра. Саме в цій смугі і досяга-

ється максимальна температура. Всередині факела вона нижча, а близько поверхні горючого матеріалу ще нижча.

Зоною теплової дії називається частина простору дотичного до зони горіння в якій тепла дія веде до помітної зміни стану матеріалів та конструкцій і робить неможливим перебування в ній людей без спеціального теплового захисту.

Якщо в зоні теплової дії є горючі матеріали, то під дією тепловипромінювання і конвекції із зони горіння відбувається підготовка цих матеріалів до горіння тобто підігрівання, плавлення, розкладання тощо.

За розмірами зона теплової дії на пожежі в огороженні буде меншою, ніж для пожежі на відкритому просторі. Річ у тім, що стіни будівлі відіграють роль екрана. Тепловипромінювання і конвекція крізь витяжні отвори незначні, до того ж, дим, що виділяється при пожежі в огороженні, різко знижує інтенсивність випромінювання, оскільки є середовищем, яке добре поглинає променеву енергію. Важливою характеристикою зони теплової дії є напрям передачі тепла. При пожежах на відкритому просторі енергетично найбільш потужною є верхня частина зони. На цих пожежах тепловипромінювання спрямоване у всі боки, а конвекція –

тільки вгору. При пожежах в огороженні енергетично найпотужнішим може виявитися будь-яке місце. Зона теплової дії тут може складатися з окремих ділянок. На одних із них буде діяти тільки тепловипромінювання, на інших – тільки конвекція. А на деяких – і тепловипромінювання, і конвекція.

Практично важливим є знання меж зони теплової дії. Близькою межею зони теплової дії є зона горіння. Дальня межа зони теплової дії визначається за двома показниками: за температурою або за інтенсивністю тепловипромінювання. За температурою зона теплової дії закінчується там, де температура вже не перевищує 60–70 °С. За інтенсивністю тепловипромінювання, інтенсивністю променевого теплового потоку за цю межу береться така відстань від зони горіння, де променеве тепло, діючи на незахищені частини тіла людини (обличчя, руки), вже викликає больові відчуття не миттєво, а через деякі проміжки часу, співрозмірні з оперативним часом, тобто часом, необхідним для активних дій із впливу на параметри пожежі. Дальня межа теплової дії визначає межу, за якою вже неможливе тривале перебування людей і виконання ними активних дій без спеціального спорядження. Експериментально встановлена дальня межа зони теплової дії для пожежі в огороженні при середній інтенсивності її розвитку оцінюється приблизно в 3500 Вт/м<sup>2</sup>. Знаючи допустимі (граничні)

значення інтенсивності випромінювання і температури, можна знайти відстань, яка гарантує безпечну роботу пожежної техніки і людей.

Зоною задимлення називається частина простору, що прилягає до зони горіння і заповнена димом в концентраціях, які створюють загрозу для життя та здоров'я людей або перешкоджають діям пожежників. Зона задимлення може включати в себе частково зону горіння і цілком або частково зону теплової дії. Як правило, зона задимлення більша за інші дві зони пожежі.

Дим – це твердий аерозоль, в якому дрібні частинки твердої речовини суспендовані в суміш повітря і газоподібних продуктів повного і неповного згорання.

Зона задимлення має особливе значення при пожежах в огороженні. Складні конструкції будівель сприяють тому, що дим нагромаджується всередині будівлі, а це маскує осередки горіння і перешкоджає веденню активних дій.

При пожежах на відкритому просторі розміри і положення зони задимлення переважно залежать від розмірів площі пожежі і від метеорологічних умов. Найбільші розміри ця зона має при швидкості вітру від 2 до 8 м/с. За відсутності вітру або швидкості його до 2 м/с дим конвективними потоками піднімається вгору і не перешкоджає діям пожежників. При швидкості, більшій 8 м/с, дим стелиться по землі, але він сильно розведений повітрям і не має великої густоти.

Межі зони задимлення визначаються ступенем видимості, концентрацією кисню, яка для забезпечення життєдіяльності людини не повинна бути нижчою за 12-15%, наявністю токсичних продуктів розкладу і токсичних продуктів горіння, а також температурою. При великій вологості повітря температура у 60-70 °С створює важкі умови перебування людини, особливо за умови фізичної праці.

### Контрольні питання

1. Яку пожежу називають масовою?
2. Що розуміють під пожежним навантаженням?
3. Яке пожежне навантаження відноситься до постійного?
4. Яка пожежне навантаження відноситься до тимчасового?
5. Що називається площею пожежі?
6. Скільки показників визначають дальню межу зони теплової дії?
7. Що називається інтенсивністю газообміну?
8. На які зони умовно поділяється простір, в якому відбувається горіння?

## РОЗДІЛ 2. НЕБЕЗПЕЧНІ ЧИННИКИ ПОЖЕЖІ

### 2.1. Поняття про продукти згоряння, їх склад та агрегатний стан

Продуктами згоряння називають газоподібні, рідкі, тверді речовини, які утворюються при взаємодії горючої речовини з киснем в процесі горіння. Їх склад залежить від матеріалу горючої речовини і умов горіння. В умовах пожежі найчастіше горять органічні речовини (деревина, тканина, бензин, газ, гума тощо), до складу яких входять в основному карбон, гідроген, оксиген, нітроген.

Основну частину продуктів згоряння становлять усе ж таки газоподібні речовини, у тому ж числі водяна пара. Якщо до складу речовини входить гідроген, то в умовах горіння утворюється вода. Крім того, вода часто міститься в горючій речовині, просто як домішка, що визначає вологість матеріалу. Вся ця вода випаровується і входить до складу продуктів горіння.

Під пожежною безпекою людей слід розуміти запобігання впливу на людину небезпечних чинників пожежі, в тому числі їх побічних проявів.

Небезпечними чинниками пожежі є:

- полум'я та іскри;
- підвищена температура навколишнього середовища;
- токсичні продукти;
- дим, густина задимленості;
- знижена концентрація кисню.

До побічних проявів небезпечних чинників пожежі відносяться:

- уламки, частини зруйнованих апаратів, агрегатів, установок, конструкцій, будівель і споруд;
- радіоактивні та токсичні речовини і матеріали, що вийшли із зруйнованих апаратів і установок;
- електричний струм, що виник в результаті винесення високої напруги на струмопровідні частини конструкцій, апаратів, агрегатів;
- ударна хвиля вибуху;
- негативні наслідки зумовлені застосуванням вогнегасних речовин.

Гранично допустимі параметри небезпечних чинників пожежі визначають:

- за підвищеною температурою –  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- за тепловим потоком –  $1400\text{ Вт/м}^2$ ;
- за втратою видимості –  $20\text{ м}$  (для випадку, коли обидва горизонтальні лінійні розміри приміщення менше  $20\text{ м}$ , гранично допустиму відстань за втратою видимості слід приймати рівною найбільшому горизонтальному лінійному розміру);
- за зниженою концентрацією кисню –  $0,226\text{ кг/м}^3$ ;
- за кожним з токсичних газоподібних продуктів горіння ( $\text{CO}_2$  –  $0,11\text{ кг/м}^3$ ;  $\text{CO}$  –  $1,1610^{-3}\text{ кг/м}^3$ ;  $\text{HCl}$  –  $23 \cdot 10^{-6}\text{ кг/м}^3$ ).

## 2.2. Полум'я та іскри

Всі пожежі відбуваються в режимі полум'яного горіння. Не зважаючи на те, що пожежі можуть розпочатися з тління, переважно всі вони згодом переходять у полум'яне горіння.

Полум'я чи відкритий вогонь становить значну загрозу життю та здоров'ю людей, а також сприяє поширенню пожежі об'єктом. Поширення пожежі може відбуватись на десятки метрів через теплове випромінювання полум'я. Критерієм оцінки полум'я, як небезпечного фактора пожежі, є тепловий потік і густина теплового випромінювання.

Як правило в будівлях (житлових і громадських) полум'я не становить значної небезпеки, оскільки до моменту поширення пожежі, люди встигають евакуюватись. Але так буває не завжди.

Полум'я, точніше тепловий потік, який ним створюється, є дуже небезпечним на промислових об'єктах, особливо там, де використовуються горючі гази і легкозаймисті та горючі речовини. Аварії на таких об'єктах можуть відбуватись раптово, а тепловий потік від пожежі представляє загрозу життю та здоров'ю людей на великі відстані від осередку пожежі. Граничне значення теплового потоку становить від  $1,4\text{--}2,5\text{ кВт/м}^2$ . Наприклад, під час пожежі на сцені небезпека настає від теплового потоку для глядачів перших рядів партеру вже через  $0,5\text{ хв}$  після початку пожежі. Ще більша інтенсивність теплових потоків спостерігається при пожежах на технологічних установках, причому людина без спеціальних засобів захисту виявляється не в змозі наблизитися до таких установок ближче, ніж на  $10\text{ м}$ . Небезпечні для людини значення теплових потоків невеликі. Так, час переносимості по-струму  $2,8\text{ кВт/м}^2$  становить  $30\text{ с}$ ;  $3,5\text{ кВт/м}^2$  –  $10\text{ с}$ ;  $7\text{ кВт/м}^2$  –  $5\text{ с}$ ;  $8,75\text{ кВт/м}^2$  –  $3\text{ с}$ .

Під час пожежі температура полум'я може досягати  $1200\text{--}1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , і у людей, що знаходяться у зоні пожежі, тепловий потік може спри-

чинити опіки та больові відчуття. Мінімальна відстань від полум'я у метрах, на якій людина ще може перебувати, приблизно становить  $L = 1,6H$ , де  $H$  – середня висота факела полум'я в метрах. Наприклад, при пожежі дерев'яного будинку висотою до гребеня покрівлі 8 м ця відстань буде близько 13 м.

Час, протягом якого людина ще може витримувати вплив теплового потоку різної інтенсивності, наведено в табл. 2.1:

Таблиця 2.1

**Інтенсивності теплового потоку та час,  
протягом якого людина може їх витримувати**

Інтенсивність теплового потоку, кВт / м <sup>2</sup>	0,84	1,4	2,1	2,8	3,5	7
Час витримування дії теплового потоку, с	360	150	40-60	30-40	10-30	5-11

Поширення полум'я на сусідні будівлі та споруди можливе також через випромінювання і перекидання на значні відстані гарячих конструктивних елементів або незгорілих часток (іскор).

За межами приміщень, в яких виникла пожежа, температура продуктів горіння може виявитися безпечною для людини, але вміст продуктів згорання в повітрі може бути небезпечним. Це характерно для високих будівель і коридорної системи, в яких небезпека для людини настає через 0,5-6 хв після початку пожежі, тому при пожежі необхідна негайна евакуація.

### 2.3. Температура пожежі

Дійсна температура пожежі у різних точках пожежі різна. Найбільша вона у осередку пожежі, у зоні полум'я.

Температурний режим пожежі має певні закономірності, так при спалюванні всіх речовин температура пожежі спочатку зростає, досягає певного максимуму, а потім з вигоранням матеріалу поступово знижується. Зі збільшенням кількості горючої речовини на одиницю площі підвищується максимальна температура і тривалість пожежі.

Кількісною характеристикою зміни тепловиділення на пожежі, залежно від різних умов горіння, служить температурний режим. Під температурним режимом пожежі розуміють зміну температури в часі.

При пожежах в огороженні на температуру впливають такі фактори, як вид горючого матеріалу, величина пожежного навантаження

і його розміщення, площа горіння, розміри будівлі (площа підлоги, висота приміщення і т.д.) та інтенсивність газообміну (розміри та розміщення отворів).

Тривалість всієї пожежі можна поділити на три характерні періоди за зміною температури. Початковий період, відповідає періоду поширення пожежі. Він характеризується порівняно невисокою середньооб'ємною температурою.

Основний період, протягом якого згорає 70-80% загального пожежного навантаження. Закінчення основного періоду відповідає моменту, коли середньооб'ємна температура досягає найбільшого значення.

Заключний період характеризується зменшенням температури внаслідок вигорання пожежного навантаження. Оскільки швидкість росту і абсолютне значення температури пожежі в кожному конкретному випадку має свої характерні значення, температурний режим пожежі залежить від інтенсивності газообміну. Ця залежність пов'язана з певними особливостями. Повітря яке надходить в приміщення, розділяється немовби на дві частини. Одна частина повітря активно підтримує та інтенсифікує процес горіння, друга частина втягується в рух внутрішніми конвективними потоками і в зону горіння не поступає. Остання розріджує продукти горіння в об'ємі приміщення і цим самим знижує їх температуру. Кількість повітря, яке не бере участі в процесі горіння, враховує коефіцієнт надлишку повітря для об'єму цього приміщення.

Температура пожежі залежить від розмірів отворів через які поступає повітря. При збільшенні припливу повітря в приміщення, в якому відбувається пожежа (при постійних площі пожежі та пожежного навантаження), температура пожежі збільшується. А за умов газообміну близьких до пожежі на відкритому просторі, коли масова швидкість вигорання не залежить від розмірів отворів, температура пожежі сягає максимуму майже так само, як і на пожежі у відкритому просторі.

Суттєвий вплив на температурний режим пожежі має висота приміщення. Коли приміщення високе швидкість росту температури вища, а максимальне значення температури менше, ніж у приміщеннях малої висоти. Це пояснюється тим, що у другому випадку коефіцієнт надлишку повітря вищий, ніж у першому, і втрата тепла із зони горіння більша. Приміщення, в яких відношення  $S_{om.} / S_n < 1/12$ , відноситься до приміщень з низькотемпературним режимом пожежі, тобто для цієї групи приміщень розвиток процесу горіння, а відпові-

дно, і інтенсивність тепловиділення стримується надходженням повітря як в об'єм приміщення, так і в зону горіння. Приміщення, у яких відношення  $S_{пр.} / S_n > 1/12$ , належать до приміщень з високотемпературним режимом пожеж, тобто в цих приміщеннях процес горіння розвивається в таких же умовах, як у пожеж відкритого простору або близьких до них. Різниця температур у приміщеннях з низькотемпературними і високотемпературними режимами в середньому становить 200-2500 °С. При цьому необхідно брати до уваги, що таку картину можна спостерігати і коли горючі матеріали з високою теплотворною здатністю горять у приміщеннях з низькотемпературним режимом, а горючі матеріали з низькою теплотворною здатністю горять у приміщеннях з високотемпературним режимом.

Температурний режим пожежі має певні закономірності. При спалюванні всіх речовин температура пожежі спочатку зростає, досягає певного максимуму, а потім з вигоранням матеріалу поступово знижується. Зі збільшенням кількості горючої речовини на одиницю площі підвищується максимальна температура і тривалість пожежі.

У першій фазі пожежі температура зі збільшенням площі спочатку зростає. А потім, у міру витрати кисню, спадає. У другій фазі, температура деякий час лишається постійною. Після руйнування вікон вона стрімко зростає. Максимальних значень температура на пожежі досягає тоді, коли згорає близько 50% горючого матеріалу.

Температурний режим внутрішньої пожежі можна показати так: через 10 хвилин після розвитку внутрішньої пожежі температура пожежі становить приблизно 0,1-0,2 частини калориметричної температури, через 20 хв 0,2-0,3, через 30 хв 0,3-0,35, через 40 хв 0,35-0,4. Користуючись цими даними можна за калориметричною температурою знаходити температуру внутрішньої пожежі.

Приклад пожежі газових фонтанів. Одним із факторів, який заважає ліквідації пожежі газових фонтанів, є висока інтенсивність теплового випромінювання факела полум'я. Тому при атаці на газовий фонтан велика кількість води (до 500 л/с) виливається на поверхню ґрунту навколо свердловини в радіусі 10-15 м для зниження температури в цій зоні, а також для захисту від теплового впливу особового складу та техніки.

Теплова напруженість факела тим більша, чим більша густина і теплота згорання газу, що горить, а також чим більша висота факела полум'я. Теплова напруженість тим менша, чим більший діаметр факела і чим менше цей факел витягнутий.



Від складу суміші залежить і колір полум'я. Газові фонтани горять світло-жовтим полум'ям. Газонафтові, коли нафти мало і вона згоряє в повітрі, – забарвлені в оранжевий колір, іноді з чорними клубами. Газонафтові з великою кількістю нафти, а тим більше нафтові фонтани, у повітрі згоряють дуже повільно, більша частина нафти випаруватися не встигає і виливається на землю; навколо свердловини утворюється нафтове озеро, яке горить оранжевим полум'ям із великою кількістю чорного диму.

#### 2.4. Токсичні продукти горіння і термічного розкладу

Продуктами згорання називають газоподібні, рідкі, тверді речовини, які утворюються при сполученні горючої речовини з киснем в процесі горіння. Склад їх залежить від складу горючої речовини і умов її горіння. В умовах пожежі найчастіше горять органічні речовини (деревина, тканина, бензин, газ, гума та ін.), в склад яких входять в основному карбон, гідроген, кисень, нітроген. При горінні їх в достатній кількості повітря і при високій температурі утворюються газоподібні продукти повного згорання  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{SO}_2$  і таке інше. Деякі прості речовини, згораючи, дають тверді оксиди. Так, горять фосфор, усі метали, натрій, алюміній, залізо та інші, окрім того, є речовини, які не горять, а розкладаються, утворюючи дрібні частинки солей та оксидів.

При горінні в недостатній кількості повітря або при низьких температурах окрім продуктів повного згорання утворюються продукти неповного згорання. Палітра продуктів неповного згорання ще різноманітніша. Тут з'являються і чадний газ  $\text{CO}$ , і частинки елементного вуглецю  $\text{C}$  (сажа).

В суміші, що розлітається від пожежі, присутній азот. Кисень витрачається, а азот залишається. Хоча буває так, що і кисень залишається (якщо він у надлишку або умови спалювання були несприятливими).

Рідкі продукти згорання утворюються дуже рідко. Це в основному продукти, піролізу, які не встигли згоріти або дуже високо киплячі рідини, які встигли вже сконденсуватися. Наприклад, деякі легкі метали або їх оксиди.

Якщо до складу речовини входить гідроген, то в умовах горіння утворюється вода. Крім того, вода часто міститься в горючій речовині як домішка, що визначає вологість матеріалу. Вся ця вода випаровується і входить до складу продуктів згорання.

## 2.5. Дим

Тверді і рідкі продукти згоряння у дрібнодисперсному стані піднімаються вгору у вигляді диму.

Дим – дисперсна система, що складається із дрібних твердих частинок, які зависли в суміші продуктів згорання і повітря. Діаметр твердих часток диму від 1 до 0,01 мм. Згідно з ДСТУ, дим – це видима суспензія твердих частинок у газовому середовищі, що утворюються в результаті горіння або піролізу матеріалів. Дим, який утворюється при спалюванні органічних речовин, містить тверді частини сажі і газоподібні речовини  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{SO}_2$  та інші. Залежно від складу і умов горіння речовини утворюється різний за складом дим.



**Рисунок 2.1** – Дим як грубодисперсна система

Якщо пожежа виникає у підвальних приміщеннях, де є велика кількість горючих речовин і дерев'яних конструкцій та мала кількість повітря, дим відрізняється підвищеним вмістом чадного газу  $\text{CO}$  і продуктів сухої перегонки горючих речовин: формальдегіду, ацетальдегіду, фурфуролу, спиртів, кислот, естерів та інших органічних сполук. Якщо пожежа виникла в квартирі житлового будинку, то дим також містить багато із цих сполук, але в значно меншій кількості.

Дими від горіння різних речовин, відрізняються один від одного не лише складом, але й кольором та запахом.

Запах диму залежить від складу речовини і утворення продуктів

неповного згорання. Коли горять тканини, вовна, волосся, шкіра, то дим має неприємний запах, оскільки містить піридин, хінолін, нітрогенні та сульфуристі сполуки. При горінні гуми в складі диму також є різні сульфуристі сполуки, які надають йому неприємного запаху. Якщо горять олії, жири тоді до складу диму входить акролеїн, який має певний запах і подразнює слизові оболонки очей та дихальних шляхів. Якщо в складі горючих речовин є хлор або нітроген, тоді у димі буде хлорид гідрогену, і ціанід гідрогену, оксиди нітрогену та інші, які є токсичними.

Горіння деяких речовин можна визначити за кольором диму, хоча колір його для однієї і тієї ж речовини може змінюватись залежно від умов горіння. При горінні деревини утворюється сірувато-чорний дим, а при горінні паперу, сіна, соломи білувато-жовтий. Тканини горять, утворюючи бурувато-чорний дим, а нафтопродукти – чорний. Фосфор, деякі метали горять, утворюють щільний білий дим. Тому під час гасіння пожеж необхідно враховувати утворення диму його токсичність і густину.

### **Контрольні питання**

1. Що називається продуктом згорання?
2. Від чого залежить склад і агрегатний стан продуктів згорання?
3. Що таке дим?
4. Від чого залежить склад і колір диму?
5. Що спільного при визначенні об'єму продуктів згорання горючих матеріалів, що є складна суміш речовини і горючих речовин – суміш газів?

## РОЗДІЛ 3. ВИБУХ. ПАРАМЕТРИ ВИБУХУ

### 3.1. Вибух, класифікація вибухів

Вибухонебезпечна зона – це простір у приміщенні або навколо зовнішньої установки, в якому присутнє вибухонебезпечне середовище або воно може утворюватися внаслідок природних чи виробничих чинників у такій кількості, яка потребує спеціальних заходів у конструкції електрообладнання під час його монтажу та експлуатації



**Рисунок 3.1** – Імітація вибухів бомб (бензин)



**Рисунок 3.2** – Вибух на складі боєприпасів



**Рисунок 3.3** – Наземний (зліва) та підводний (справа) ядерний вибух

Вибухонебезпечна суміш – це суміш повітря з горючими газами, паром, горючим пилом та волокнами, у якій за нормальних атмосферних умов після запалення процес горіння (вибух) поширюється на весь об'єм суміші.

До вибухонебезпечних належать суміші горючих газів та пари легкозаймистої рідини з киснем, хлором або іншими окиснювачами.

Газопароповітряне вибухонебезпечне середовище – вибухонебезпечне середовище, яке утворюється повітрям з горючими газами, паром.

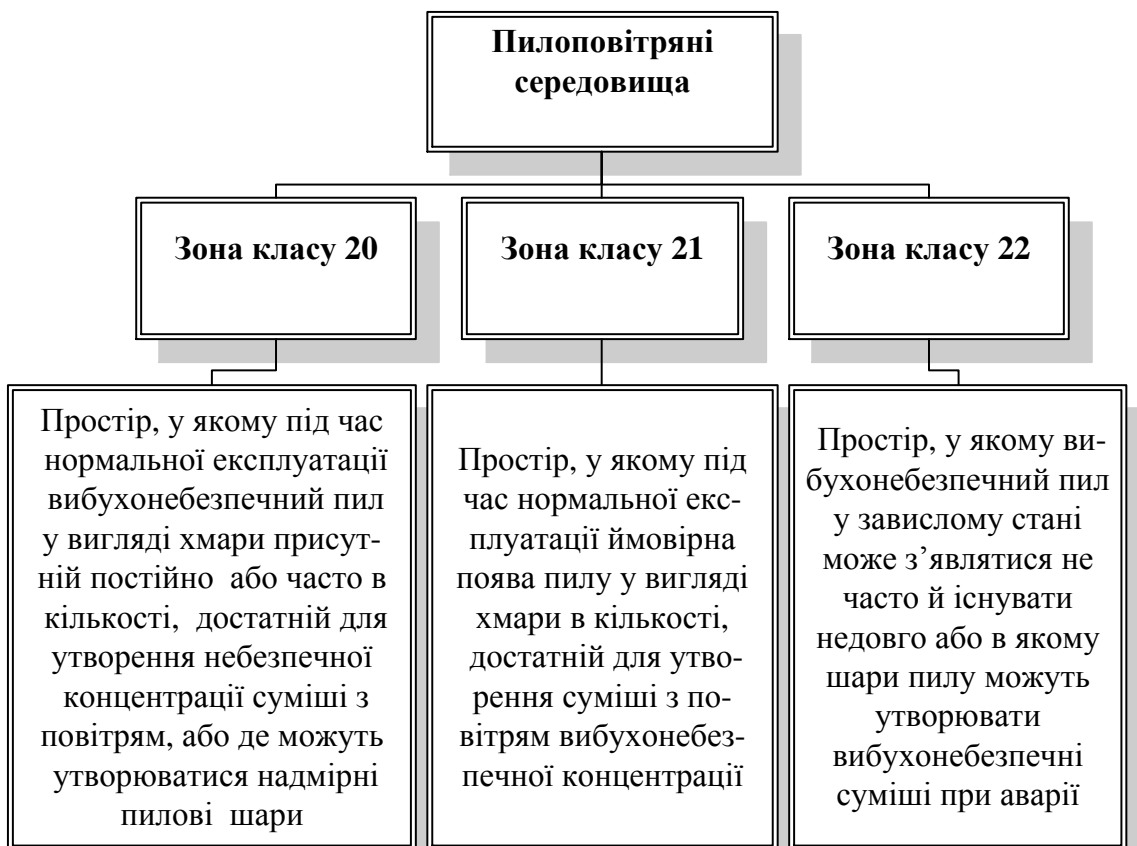
Пилоповітряне вибухонебезпечне середовище – вибухонебезпечне середовище, яке утворюється повітрям з вибухонебезпечними пилом і волокнами. Горючий газ – газ, який в суміші з повітрям у відповідній пропорції утворює газове вибухонебезпечне середовище.

Горюча пара – пара легкозаймистої рідини, яка в суміші з повітрям у відповідній пропорції утворює пароповітряне вибухонебезпечне середовище.

Легкозаймиста рідина (ЛЗР) – горюча рідина, здатна запалитися від короткочасного впливу джерела загоряння тривалістю до 1 секунди з низькою енергією (полум'я сірника, іскра, тліюча сигарета тощо), з температурою загоряння не більше  $+61^{\circ}\text{C}$  у закритому тиглі або  $+66^{\circ}\text{C}$  у відкритому тиглі.



**Рисунок 3.4** – Вибухонебезпечні зони для газопароповітряного середовища



**Рисунок 3.5** – Вибухонебезпечні зони для пилоповітряного середовища

### **Класифікація вибухонебезпечних зон згідно з ПУЕ**

При визначенні вибухонебезпечних зон приймається, що:

а) вибухонебезпечна зона в приміщенні займає весь об'єм приміщення, якщо об'єм вибухонебезпечної суміші перевищує 5% вільного об'єму приміщення;

б) вибухонебезпечною вважається зона в приміщенні в межах до 5 м по горизонталі і вертикалі від технологічного апарата, з якого можливе виділення горючих газів або парів ЛЗР, якщо об'єм вибухонебезпечної суміші дорівнює або менше 5% вільного об'єму приміщення. Приміщення за межами вибухонебезпечної зони можна вважати не вибухонебезпечним, якщо немає інших факторів, які створюють в ньому вибухонебезпеку;

в) вибухонебезпечна зона зовнішніх вибухонебезпечних установок обмежена розмірами, визначеними в п.7.3.44 (ПУЕ).

### **3.2. Умови виникнення вибуху**

В умовах виробництв можуть утворюватись будь-які суміші горючого газу чи пари з повітрям. Концентрація горючого в цих сумішах може бути в межах від частки 1 % до 100 % об'ємних. Однак не всі з цих концентрацій представляють небезпеку вибуху та виникнення пожежі. Властивості сумішей газів і парів з повітрям різні з точки зору можливості їх займання і горіння.

Наприклад, якщо суміш оксиду вуглецю з повітрям, що містить 5% CO, спробувати запалити потужною електричною іскрою, то легко помітити, що вона не може зайнятися. Також не займається суміш, яка містить 10% CO. Тільки суміш, до складу якої входить 12,5 % CO, здатна зайнятися і горіти зі швидкістю вибуху. Така вибухова концентрація пари чи газу, нижче якої всі концентрації не здатні вибухати, але вище якої здатні горіти з вибухом, називається нижньою концентраційною межею вибуху. Іноді ця концентрація називається нижньою границею вибуху або нижньою границею займання.

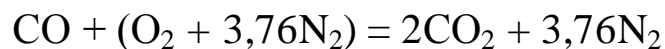
Суміш будь-якої пари чи газу при нижній границі вибуху містить надлишок повітря. Так, для суміші з CO, коефіцієнт надлишку повітря дорівнює 2,6, для сірковуглецю – 6,9, для метану – 2. Відповідно, гранична суміш, маючи невелику кількість горючого і значну кількість повітря, повинна володіти низькою теплотворною здатністю, малою швидкістю поширення полум'я, низькою температурою вибуху і невеликим тиском вибуху. Насправді, все це підтверджується, і сила вибуху (тиск при вибуху) у таких сумішах буває невелика.

Концентрація нижньої межі вибуху насиченої пари горючої рідини утворюється завжди, як було зазначено, при температурі спалаху рідини.

При збільшенні концентрації оксиду карбону в суміші вище концентраційної нижньої межі вибуху утворюються вибухові суміші, які характеризуються більшою силою вибуху, ніж суміш на нижній межі. Такі зміни властивостей сумішей стають зрозумілими, якщо врахувати, що вони містять в собі більшу кількість CO і менший надлишок повітря, аніж гранична суміш, і, відповідно, мають більш високу теплотворну здатність і температуру вибуху.

Збільшення тиску вибуху сумішей може продовжуватися теоретично до досягнення стехіометричної концентрації, тобто такої суміші, в якій концентрація горючої речовини і повітря точно відповідає реакції горіння. Насправді найбільший тиск при вибуху спостерігається для суміші з концентрацією горючої речовини, дещо більшою за стехіометричну, оскільки швидкість горіння такої суміші дещо вища за швидкість горіння стехіометричної суміші.

Стехіометрична концентрація оксиду карбону, як і будь-якого газу чи пари, може бути розрахована з реакції горіння в повітрі:



Згідно з цією реакцією, стехіометрична суміш CO з повітрям складається з  $2 + 1 + 3,76 = 6,76$  рівних об'ємів. При збільшенні концентрації оксиду карбону вище стехіометричної створюються вибухові концентрації, але сила вибуху їх буде поступово зменшуватися в результаті нестачі повітря. Нестача повітря в сумішах, ще більш багатих горючою речовиною, призводить до того, що суміш втрачає здатність займатися. Для оксиду карбону найвищою концентрацією, яка ще здатна займатися в суміші з повітрям, є 75% CO. Вище цієї концентрації жодна суміш оксиду карбону з повітрям не здатна зайнятися, хоча в них присутня деяка кількість повітря.

Така концентрація газу чи пари, нижче якої відбувається вибух, а вище якої суміш не здатна займатися, називається верхньою концентраційною межею вибуху. Тиск вибуху, а також швидкість поширення полум'я при цій концентрації невеликі.

Область вибухових концентрацій, яка лежить в межах між нижньою і верхньою межею вибуху називається проміжком вибуху. Найбільший проміжок вибуху у ацетилену, водню, оксиду карбону (78-60%), найменший – у бензину, бутану, пропану та ін. (4-6%).

Області концентрацій, розташовані нижче від нижньої межі ви-



буху і вище від верхньої називаються областями безпечних концентрацій. В цих областях суміші не здатні займатися, тому є безпечними.

Наявність області безпечних концентрацій дає можливість в процесі зберігання і застосування легкозаймистих рідин підтримувати такий режим, при якому концентрації були б вищими за верхню і нижчими за нижню межу вибуху. Це досягається створенням відповідних температур і тисків у сховищах, апаратах та інших ємностях.

Питання виробничої безпеки не можуть бути вирішені без знання меж вибуху газів і парів рідин. Хоча межі вибуху можуть змінюватися під впливом різних факторів, однак ці величини використовують, беручи на практиці до уваги з усіх відомих даних найменше значення для нижньої межі вибуху і найбільше значення для верхньої її межі.

### 3.3. Вибух газопароповітряних сумішей

В технологічних процесах, пов'язаних із застосуванням чи виготовленням горючих газів та рідин, можуть утворюватися суміші горючих газів і парів з повітрям. Такі суміші представляють велику небезпеку, вони підвищують ризик виникнення пожежі та вибуху, зберігання, утворення, добування (шахти).

Якщо горючі гази і пари не змішані з повітрям і поміщені у закриті посудини чи апарати, то вони горіти не можуть, бо нема доступу окисника. Якщо ж такі пари і гази випускати з посудини в атмосферу і в місці виходу підпалити, то вони будуть спокійно горіти у вигляді факела. Так горять пари гасу, які виходять з пальника примуса, природний газ, виходячи з пальників приладів газового опалення, будь-який горючий газ, який виходить при аварії з трубопроводу чи газгольдера, і т.д.

Процес горіння, швидкість якого залежить від швидкості дифузії парів чи газів та повітря, називається дифузійним. Йому протилежні процеси горіння, де вирішальну роль відіграє швидкість хімічних перетворень.

Якщо до горючого газу домішати небагато повітря, то швидкість горіння утвореної суміші буде вищою, ніж швидкість горіння чистого газу. Пояснюється це тим, що при горінні не весь кисень підводиться дифузією, а деяка кількість його знаходиться вже в суміші. Подібне – у вибухівці. При подальшому збільшенні кількості повітря в суміші все менше необхідно кисню, що підводиться в результаті дифузії, і відповідно, все більше зростає швидкість горіння суміші.

При деякому складі суміші горіння її може протікати завдяки кисню, який входить до її складу. При цьому швидкість горіння буде досить високою. Так, суміш повітря з воднем горить зі швидкістю 5-6 м/с. Згорання сумішей з такою швидкістю супроводжується виділенням значної кількості тепла за одиницю часу і, відповідно, нагріванням продуктів горіння до високої температури. Горіння гексогену (вибух) – 8360 м/с, але – це у вільному просторі.

Якщо ж горіння суміші відбувається в приміщенні або апараті, то розширення газів при нагріванні викликає різке підвищення тиску, що є найбільш характерною ознакою вибуху. Тому суміші горючих парів і газів з повітрям відносяться до вибухових сумішей.

Основні умови для хімічного перетворення такої суміші в формі вибуху :

- вкрай велика швидкість переходу початкової суміші в продукти горіння;
- обов'язкова наявність серед продуктів горіння газів;
- обов'язкове виділення тепла при реакції вибухового перетворення.

Імпульсами, які викликають вибух суміші, можуть бути полум'я, іскра або розжарене тіло.

Найчастіше вибухонебезпечні суміші виникають у виробничій апаратурі і рідше – у виробничому приміщенні.

### **3.4. Вибуховість пилоповітряних сумішей**

Пил-аерогель можна представити як тверду речовину в стані тонкого подрібнення. При її нагріванні виникає окиснення, яке при певній швидкості реакції переходить в самозаймання і горіння. Температура самозаймання пилу-аерогелю і процес горіння її практично не відрізняються від температури самозаймання і характеру горіння твердої речовини.

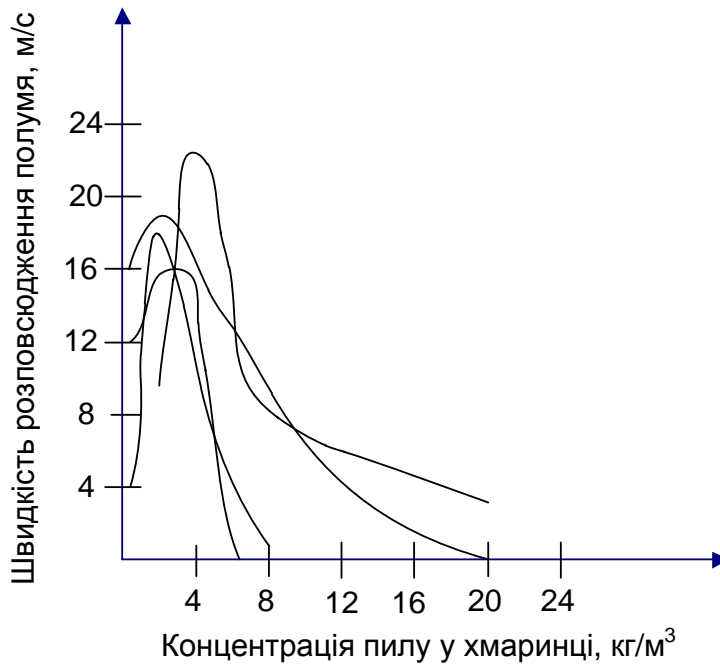
Як і інші тверді речовини, аерогелі здатні до самозаймання, тобто до довільного самонагрівання до температури самозаймання. Це може відбуватися під дією зовнішнього джерела нагрівання, яке доведе температуру до температури самонагрівання, а далі вже піде саморозігрів. Це може відбуватися під дією процесів адсорбції, хімічних реакцій або під дією мікроорганізмів. Найбільше підвладні мікробіологічному самозайманню трав'яне борошно, деревинне борошно і деревинна тирса, борошно торфу.

Важливою характеристикою аерогелів є температура тління: при певній температурі на деяких ділянках аерогелю утворюються обвуглені продукти реакції. При подальшому нагріванні вони переходять у пірофорний стан і самостійно розігріваються аж до світіння. Пил, що тліє, являє собою велику небезпеку: при найменшому струсі тліючої маси вона перемішується з киснем повітря і моментально займається; він також здатний переходити в аерозоль і вибухати, викликаючи підйом у повітря наступних порцій пилу і повторні вибухи. Температурою тління називається та найнижча температура, при якій на окремих ділянках з'являється тління. Залежить ця температура від ступеня дисперсності, вологості, теплоємності і теплопровідності. Дослідження процесу розповсюдження полум'я в аерозолі вугільного пилу показали, що в трубах або штольнях значної протяжності виникає ударна хвиля. Встановлено, що при горінні кам'яновугільного пилу швидкість розповсюдження ударної хвилі дорівнює 338 м/с, швидкість руху повітря за ударною хвилею – 30 м/с, швидкість полум'я 7 м/с, швидкість руху згорілих газів позаду полум'я 5 м/с. Цей режим швидкого розповсюдження полум'я, що до деякої міри наближається до режиму детонації, обумовлений не теплопровідністю або випромінюванням, а стисненням прилеглих до фронту полум'я шарів газу і пов'язаним з ним різким підвищенням температури. В цьому випадку процес розповсюдження вибуху, очевидно, визначатиметься властивостями газової фази, що утворилася при згоранні аерозолі.

Для швидкого протікання реакції горіння необхідні такі умови:

- зближення диспергованих часточок для теплообміну;
- виділення за індукційний період достатньої кількості горючих газів, щоб оповити газовою плівкою кожен часточку;
- прискорення тепловиділення від початку розвитку реакції окиснення до критичного його значення, при якому розпочинається самозаймання внаслідок перевищення тепловиділення над тепловідведенням у навколишнє середовище.

Горіння пилоповітряної суміші виникає тільки під дією високо-температурного джерела запалювання. Займання і поширення полум'я по пилоповітряній суміші відбувається тільки у тому випадку, якщо його концентрація перебуває в діапазоні концентраційних меж займання, між нижньою та верхньою межами поширення полум'я.



**Рисунок 3.6** – Залежність швидкості розповсюдження полум'я в торф'яному пилу різної дисперсності від концентрації пилу в повітрі

Примусове займання пилових сумішей залежить від того, у якому стані вона перебуває (гель це чи золь). Температура займання аерогелю – це та найнижча температура, при якій пил, окиснюючись і розкладаючись, виділяє газоподібні продукти, кількість яких достатня для займання від джерела запалювання; при цьому горіння їх продовжується і після видалення джерела запалювання. Для займання аерогелю велике значення мають інтенсивність і кількість тепла, що підводиться джерелом запалювання, ступінь дисперсності, вологість, відсотковий вміст кисню у повітрі. Під дією джерела запалювання відбувається запалювання пилу в елементарному об'ємі, з якого утворюється фронт полум'я.

Процес запалювання пилоповітряних сумішей протікає відповідно до теплової або ланцюгової теорії самозаймання. Для переважної більшості органічного пилу характерне протікання під впливом джерела запалювання підготовчих процесів, як і для твердих речовин. Потім починається окиснення, досягається температура самонагрівання і відбувається самосплахування.

Полум'яне горіння пилу обумовлене тим, що він виділяє горючі пари або гази в кількості не нижчій за нижню концентраційну межу поширення полум'я.

Фронт полум'я, що утворився, розповсюджується по пилоповітряній суміші з певною швидкістю, яка залежить від ряду чинників

$$\nu = \frac{\sigma T_E^4}{3600 c_0 (T_3 - T_0)}$$

де  $\sigma$  – коефіцієнт Стефана – Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);

$T_E$  – еквівалентна температура випромінювання;

$c_0$  – об'ємна теплоємність аерозолі, Дж/(м<sup>3</sup>·К);

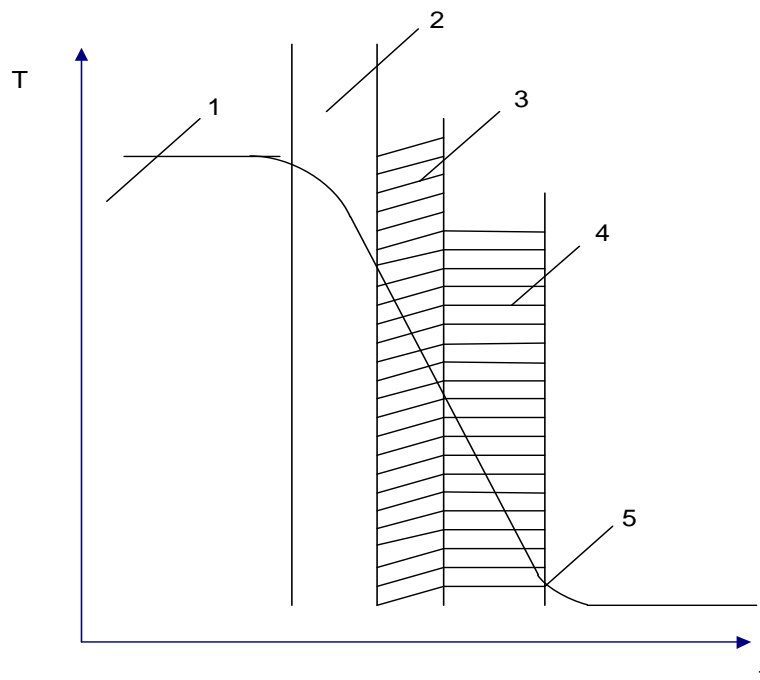
$T_3$  – температура запалювання частинок;

$T_0$  – початкова температура аерозолі.

Швидкість розповсюдження фронту полум'я зростає із зменшенням об'ємної теплоємності аерозолі і підвищенням його початкової температури.

Швидкість розповсюдження фронту полум'я обернено пропорційна діаметру частинок аерозолі.

Тиск при вибуху і швидкість його наростання зменшуються із збільшенням розміру порошинок. При розмірі порошинок 40–50 мкм нижня концентраційна межа запалювання і швидкість розповсюдження полум'я мало залежать від діаметра, але із збільшенням розміру частинок різко зростає нижня концентраційна межа запалювання і зменшується швидкість розповсюдження полум'я.



**Рисунок 3.7** – Температурний режим у фронті полум'я при горінні пилу:

- 1 – зона продуктів горіння; 2 – фронт полум'я;
- 3 – зона самозаймання; 4 – зона термічного розкладання;
- 5 – зона попереднього прогрівання

Швидкість розповсюдження фронту полум'я залежить від концентрації пилю. Мінімальна швидкість розповсюдження полум'я досягається при концентрації пилю, набагато більшій за стехіометричну. Це свідчить про те, що процес горіння пилю недосконалий; згорають найдрібніші частинки пилю, крупні – не встигають розкластися і лише обвуглюються на поверхні. Максимальна швидкість розповсюдження полум'я в різних аерозолях становить 16-22 м/с при концентрації торф'яної суспензії в повітрі 1-2 кг/м<sup>3</sup>. Якщо прийняти, що теоретично для спалювання 1кг торфу потрібно 5м<sup>3</sup> повітря, то відповідно до стехіометричного рівняння реакції концентрація аерозолу повинна становити 0,2 кг/м<sup>3</sup>.

Швидкість розповсюдження полум'я при горінні пилю залежить від концентрації кисню в повітрі. Із збільшенням концентрації O<sub>2</sub> швидкість розповсюдження полум'я зростає. Максимальна швидкість розповсюдження полум'я спостерігається в чистому кисні.

Температурний режим у фронті полум'я і поблизу нього аналогічний температурному режиму для газоповітряних сумішей.

При горінні аерозолу деяких речовин газоподібні продукти не утворюються (наприклад, при горінні алюмінію), і об'єм газоподібних продуктів після вибуху рівний об'єму газоподібних речовин до реакції. В цьому випадку збільшення тиску при вибуху пояснюється лише нагріванням. Наприклад, якщо газ мав початкову температуру ( $T_0$ ) 290 і тиск ( $P_0$ ) 0,1 МПа, то при температурі ( $T_1$ ) 2290 в тому ж об'ємі тиск буде

$$P_1 = \frac{P_0 T_1}{T_0} = \frac{0,1 \cdot 2290}{290} = 0,78 \text{ МПа}$$

Тиск збільшився в 7,8 рази.

Тиск, що виникає при вибуху аерозолу, супроводжується хвилею стиснення, швидкість розповсюдження якої в навколишньому середовищі може змінюватися від декількох сантиметрів на секунду до декількох сотень метрів на секунду. Швидке наростання тиску вибуху є в більшості випадків достатнім для руйнування і пошкодження устаткування.

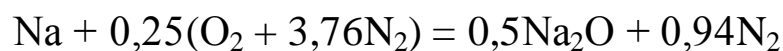
Аерозолі спалахують і горять аналогічно газоповітряним сумішам, однак механізм передачі теплового потоку дещо відрізняється. Для газових сумішей головним є передача тепла конвекцією і теплопровідністю; для аерозолів на перше місце висувається тепловипроміювання. Тверді частинки, поглинаючи променевий потік, розкладаються; продукти розкладу утворюють із повітрям горючі суміші. У ре-

зультаті перед фронтом полум'я є вже готовий шар газоповітряної суміші, прогрітої до температури, при якій розкладалася тверда фаза.

Фронт полум'я поширюється з певною швидкістю, яка залежить від ряду факторів. Швидкість поширення полум'я по аерозолях обернено пропорційна теплоємності аерозоллю і діаметру його частинок та прямо пропорційна початковій температурі. Здавалося б, максимальна швидкість поширення полум'я повинна спостерігатися при стехіометричних концентраціях пилу і повітря, але так було б в ідеальному випадку. В дійсності ж, навіть у газоповітряних сумішах, максимальною швидкістю поширення горіння буває при концентраціях, дещо більших, ніж стехіометричні; причиною є неповнота згоряння. Повнота згоряння пилу – ще менша, ніж газу, тому максимальна швидкість поширення полум'я по аерозолях спостерігається при концентраціях, що набагато перевищують стехіометричні. Чим грубіший пил, чим менша дисперсність, тим при більшому надлишку горючої речовини реалізується максимальна швидкість поширення полум'я. А взагалі, порядок цієї швидкості становить метри за секунду. Залежно від природи пилу, його дисперсності, вологості, зольності, а також від концентрації кисню у повітрі і початкової температури середовища, вона може становити 3, 5, 10, 20, 30 м/с.

Тверді речовини, порівняно з газоподібними, займають дуже малий об'єм, тому при їх згорянні продукти згоряння займають значно більший об'єм, ніж вихідна суміш. В результаті у замкнених об'ємах горіння пилу набуває характеру потужного вибуху, з перепадом тиску ще більшим, ніж при горінні газів.

Виняток становить горіння металів. В останньому випадку утворюються тверді оксиди. Але на утворення твердих оксидів пішов газоподібний кисень, який займав певний об'єм. Наприклад, при горінні натрію рівняння реакції виглядає таким чином:



У лівій частині рівняння газоподібних речовин ми маємо на 0,25 моля більше, ніж у правій, відповідно, і об'єм продуктів згоряння за нормальних умов був би меншим, ніж об'єм аерозоллю натрію. Практично, він все одно більший, але тільки через збільшення температури. Так що і тиск при горінні металів теж збільшується, але не так різко, як при горінні твердих речовин, які дають газоподібні продукти згоряння і викликають збільшення об'єму як через збільшення кількості газоподібних речовин, так і через збільшення температури.

Займання і поширення полум'я по аерозоллю відбувається тільки у тому випадку, якщо його концентрація перебуває в діапазоні концен-

траційних меж займання, між нижньою та верхньою межами поширення полум'я. Що стосується верхньої межі, то для всіх аерозолів вона дуже велика і практично недосяжна. Важко втримати в підвішеному стані в 1 кубічному метрі повітря 13,5 кг пороху цукру або 2,2 кг пороху торфу. А от НКМПП має дуже велике значення. Якщо суміш має таку концентрацію, то вона вже здатна зайнятися і поширювати полум'я. НКМПП залежить від багатьох факторів: потужності джерела запалювання, вологості пилу і повітря, зольності пилу, початкової температури, вмісту кисню у повітрі і, безперечно, від природи речовини і ступеня дисперсності її пилу. Найнижчою нижня концентраційна межа буде при дії того джерела запалювання, яке має найбільшу температуру і найбільшу поверхню.

Волога, яку містить пил, перешкоджає займанню і подальшому поширенню полум'я. Пояснення криється у тому, що в процесі нагрівання частинок аерозолу деяка кількість тепла витрачається на випаровування води. Чим вологіший пил, тим вища НКМПП.

Збільшує НКМПП і зольність пилу. Збільшення вмісту золи приводить до збільшення відстані між горючими порошинками, тому при розкладі цих горючих порошинок вони не утворюють суміші з необхідною для поширення горіння концентрацією. Крім того, збільшення зольності підвищує тепловитрати у зоні реакції.

Домішки негорючих парів та газів теж знижують вибухонебезпечність аерозолу, в основному тим, що знижують концентрацію кисню в суміші. Наприклад, при концентрації кисню в суміші, нижчій за 16 %, торф'яний пил вже не займається.

Зростання початкової температури за однакових інших умов викликає збільшення НКМПП, тому що зменшується густина повітря, а значить, і кількість кисню в одиниці об'єму суміші.

Цікавим і неоднозначним є вплив дисперсності пилу. Дуже малі частинки згорають так швидко, що тепловипромінювання не встигає нагріти достатньо значного об'єму. Аерозолі, частинки пилу яких мають розміри, менші за 10 мкм, горять, як газові суміші, які нібито складаються з повітря і продуктів розкладу цих частинок, тобто тут, як і в газових сумішах, головним є дифузія нагрітих газів і передача тепла теплопровідністю.

Із збільшенням діаметра частинок від 10 мкм до 40-50 мкм все більшу роль починає відігравати поширення полум'я за механізмом, який був розглянутий вище, коли найважливішим є розклад під дією випромінювання. За таким механізмом полум'я для поширення має кращі умови, і тому НКМПП, порівняно з дрібнішим аерозолем, зни-



жується. При зміні розмірів частинок із 10 мкм до 40-50 мкм НКМПП зменшується приблизно в 2,5 рази.

А далі умови згоряння знов погіршуються. Коли частинки більші за 50 мкм, стає помітним недопал; і чим грубіші частинки, тим менша повнота згоряння. Крім того, із збільшенням розмірів зменшується відношення  $S/V$ , а це означає, що при тій самій концентрації речовини в аерозолі поверхня горіння зменшуються. Таким чином, із подальшим збільшенням частинок аерозолу НКМПП зростає, золь стає менш небезпечним. Виходячи з вищевказаного, золі розподіляють на такі, що мають частинки, менші за 10 мкм, такі, що мають частинки від 10 до 40-50 мкм, і такі, що мають частинки у 40-50 мкм. Утворення з грубішими твердими частинками (850 мкм) до пилоповітряних аерозольних сумішей не відносять.

### **3.5. Параметри, що характеризують пожежовибухонебезпеку аерозолів**

Пожежну небезпеку пилу визначають, враховуючи два чинники: нижню концентраційну межу поширення полум'я пилоповітряної суміші і температуру самозаймання аерогелю. Ступінь вибухонебезпеки аерозоля залежить від значення нижньої концентраційної межі поширення полум'я. Чим менше це значення, тим більша вірогідність утворення вибухонебезпечних концентрацій. Ступінь пожежної небезпеки аерогелю характеризується температурою самозаймання: чим нижча температура самозаймання, тим пожежонебезпечним є аерогель. Класифікація пилу за ступенем пожежної небезпеки показана на схемі. Характеристики аерозолів і аерогелів наведені в таблицях.

Одними з складних аварій є пожежі в резервуарах, в більшості випадків вони починаються з вибуху пароповітряної суміші. На утворення вибухонебезпечних концентрацій всередині резервуарів істотно впливають фізико-хімічні властивості нафти і нафтопродуктів, конструкція резервуара, технологічні режими експлуатації, а також кліматичні і метеорологічні умови. Вибух в резервуарі призводить до підриву (рідше зриву) даху з наступним горінням на всій поверхні горючої рідини. При цьому, навіть в початковій стадії, горіння нафти і нафтопродуктів в резервуарі може супроводжуватися потужним тепловим випромінюванням в навколишнє середовище, а висота частини полум'я становить 1-2 діаметра палаючого резервуара. Відхилення факела полум'я від вертикальної осі при швидкості вітру близько 4 м/с становить 60-70 °С.



**Рисунок 3.5** – Класифікація пи́лу за ступенем пожежовибухонебезпеки

Таблиця 3.1

### Характеристика аерозолів

Аерозолі	Вихід фракції 70мк, %	Фракція 85мк			НКПВ, г/м <sup>2</sup>	Температура самозаймання °С
		Вологість, %	Зольність, %	Насипна густина, г/см <sup>3</sup>		
Ебонітовий пи́л з вальцевого верстата	80,0	–	–	–	7,6	650
Пи́л пшеничних висівок	46,0	13,42	6,27	0,49	10,1	800
Пи́л млиновий сірий	21,0	8,35	9,45	0,45	10,1	650
Торф'яний пи́л	65	16,5	7,81	0,35	17,6	750
Борошняний житній пи́л	92,0	10,2	11,2	–	63,0	600

Таблиця 3.2

**Характеристика аерогелів**

Аерогелі	НКМПП г/м <sup>3</sup>	Температура займання °С
Тютюновий пил	68,0 – 101,0	205
Елеваторний пил	227,0	250
Вугільний пил	114 – 400	260
Деревна тирса	Вище 65,0	275

**Контрольні питання.**

1. Для якого стану пилу цукру температура самозаймання більша – для аерогелю чи для аерозолю? Поясніть свою відповідь.
2. Що називається температурою тління?
3. При яких концентраціях аерозолю спостерігається максимальна швидкість поширення полум'я?
4. Зменшиться чи збільшиться об'єм суміші алюмінію з киснем після проведення реакції згорання, якщо обидва об'єми вимірювати за нормальних умов?
5. Чому для аерозолів не вимірюють ВКМПП?
6. Від яких факторів залежить НКМПП аерозолю?
7. Як класифікують пил за вибухопожежо небезпекою?

## РОЗДІЛ 4. НЕБЕЗПЕЧНІ ФАКТОРИ ВИБУХУ

### 4.1. Чинники, що впливають на нижню концентраційну межу поширення полум'я

НКМПП залежить від багатьох факторів: потужності джерела запалювання, вологості пилу і повітря, зольності пилу, початкової температури, вмісту кисню у повітрі і, безперечно, від природи речовини і ступеня дисперсності її пилу.

Потужність джерела запалювання. Потужність джерела запалювання визначається числом активних центрів, які утворюються при його взаємодії за одиницю часу з одиниці поверхні. Чим більше утвориться таких центрів за одиницю часу, тим інтенсивніше почнеться розвиток ланцюгової реакції. Зі збільшенням потужності джерела запалювання НКМПП пилу знижується і вибуховість пилу зростає.

Здатність аерозоля спалувати з поширенням полум'я по всій поверхні залежить від температури джерела запалювання і розміру його нагрітої поверхні, що дотикається з твердими пилинками. Найнижчою нижня концентраційна межа буде при дії того джерела запалювання, яке має найбільшу температуру і найбільшу поверхню.

Волога, яку містить пил, перешкоджає займанню та поширенню полум'я. Це пояснюється тим, що в процесі нагрівання частинок аерозолю деяка кількість тепла витрачається на випаровування води. Чим вологіший пил, тим вища НКМПП. Також експериментальні дослідження показують, що при збільшенні вологості повітря зменшується інтенсивність вибуху торф'яного, кам'яновугільного пилу. Вміст вологи пилу неоднаково впливає на вибуховість пилу різного походження.

Зольність пилу. Під зольністю пилу розуміють залишок негорючих частинок твердої речовини. Збільшення вмісту золи призводить до збільшення відстані між горючими порошинками, тому при розкладі цих горючих порошинок вони не утворюють суміші з необхідною для поширення горіння концентрацією. Крім того, збільшення зольності підвищує тепловитрати у зоні реакції що також ускладнює поширення фронту полум'я на весь об'єм пилоповітряної суміші. Пил кам'яного вугілля з виходом летких продуктів до 40 % при зольності від 15 до 30 % не вибухає. Отже, чим вища зольність частинок твердої речовини, тим менша вибуховість пилу і більше значення має НКМПП пилу.

Домішки негорючих парів та газів теж знижують вибухонебезпечність аерозолі, в основному тим, що знижують концентрацію кисню в суміші. Наприклад, при концентрації кисню в суміші, нижчій за 16 %, торф'яний пил вже не займається.

Зростання початкової температури за однакових інших умов викликає збільшення НКМПП, тому що зменшується густина повітря, а значить, і кількість кисню в одиниці об'єму суміші. Швидкість хімічної реакції при цьому зменшується, і відповідно НКМПП підвищується.

Таблиця 4.1

**Залежність максимального тиску вибуху від температури та вмісту кисню**

Залежність максимального тиску вибуху від температури та вмісту кисню				
Температура, °С	10	25	200	300
Вміст кисню, кг/м <sup>3</sup>	0,29	0,27	0,17	0,14
Максимальний тиск вибуху, МПа	0,25	0,22	0,16	0,12

Цікавим і неоднозначним є вплив дисперсності пилу. Дуже малі частинки згоряють так швидко, що тепловипромінювання не встигає нагріти достатньо значний об'єм. Аерозолі, частинки пилу яких мають розміри, менші за 10 мкм, горять, як газові суміші, які складаються з повітря і продуктів розкладу цих частинок, тобто тут, як і в газових сумішах, головним є дифузія нагрітих газів і передача тепла теплопровідністю.

Із збільшенням діаметра частинок від 10 мкм до 40-50 мкм все більшу роль починає відігравати поширення полум'я за механізмом, який був розглянутий вище, коли найважливішим є розклад під дією випромінювання. За таким механізмом полум'я має кращі умови для поширення і тому НКМПП, порівняно з дрібнішим аерозолем, знижується. При зміні розмірів частинок із 10 мкм до 40-50 мкм НКМПП зменшується приблизно в 2,5 раза.

А далі умови згоряння знов погіршуються. Коли частинки більші за 50 мкм, стає помітним недопал; і чим грубші частинки, тим менша повнота згоряння. Крім того, із збільшенням розмірів зменшується відношення  $S/V$ , а це означає, що при тій самій концентрації речовини в аерозолі поверхня горіння зменшується. Таким чином, із подальшим збільшенням частинок аерозолі НКМПП зростає, золь стає

менш небезпечним. Виходячи з вищевказаного, золі розподіляють на такі, що мають частинки, менші за 10 мкм, такі, що мають частинки від 10 до 40-50 мкм, і такі, що мають частинки більші 40-50 мкм. Утворення з більшими твердими частинками (850 мкм) до пилоповітряних аерозольних сумішей не відносять.

Склад повітря. Домішки негорючих парів і газів в пилоповітряній суміші знижують її вибуховість. Пояснюється це тим, що під час введення негорючих парів і газів знижується концентрація кисню в суміші, знижується швидкість хімічної реакції пропорційно до концентрації кисню.

#### **4.2. Чинники, що впливають на межі вибуху**

Межі вибуху або межі займання не є постійними, а залежать від певних зовнішніх факторів. Найбільший вплив на зміну меж вибуху проявляють: потужність джерела запалювання, домішки інертних газів і парів, температура газової суміші, тиск суміші, дифузія газів і розміри посудини.

При визначенні пожежної небезпеки технологічних процесів необхідно враховувати залежність границь вибуху суміші від того чи іншого фактора. Наприклад, в сушарках (з підвищеною температурою), де є пари горючих і легкозаймистих рідин, границі вибуху будуть інші, ніж при нормальній температурі. Іноді суміш горючих парів чи газів з повітрям пкркбуває під тиском, більшим чи меншим за нормальний. В даному випадку границі вибуху також будуть інші, ніж наведені в довідникових таблицях.

Щоб правильно врахувати вплив температури суміші, тиску та інших факторів на границі вибуху, необхідно знати загальні закономірності їх зміни. Розглянемо, як змінюються границі вибуху при зміні вказаних вище факторів.

Джерело запалювання. Під джерелом запалювання розуміють причину, з якої відбувається займання газової суміші. Такою причиною може бути відкрите полум'я, розжарене тіло, нагрівання частини газу до високої температури, електрична іскра, іскра при ударі металу об метал і т.ін.

Здатність електричних іскор викликати займання суміші парів і газів з повітрям залежить від властивостей металу, з якого виготовлені контакти, величини їх поверхні, швидкості розмикання ланцюга та інших факторів. Особливо великий вплив на займання газових сумішей виявляє потужність електричних іскор.

Довжина і товщина іскри, якщо потужність однакова, як показали дослідження, не впливають на межі вибуху. Потужність електричної іскри залежить від сили струму і напруги в мережі, тому при дослідженні впливу потужності іскри на границі вибуху одну з цих величин приймають постійною, а іншу змінюють в широкому діапазоні. Наприклад, при постійній напрузі в мережі 100 В іскра при силі постійного струму в 1 А не може викликати займання суміші метану, етану, бутану і пентану з повітрям. Іскра, при силі струму 2 А, викликає займання всіх газових сумішей, але проміжок вибуху у них при цьому невеликий. При силі струму 3 А розширюється проміжок вибуху, причому нижня межа вибуху знижується, а верхня зростає. Для деяких сумішей, наприклад, пропану, бутану, пентану, ця сила струму є вже граничною і її збільшення не змінює меж вибуху.

Мінімальна сила струму, що викликала займання суміші метану дорівнювала 1,1 А. Однак при напрузі в мережі 125 В мінімальна сила струму знижувалася до 0,3 А.

У міру зростання діаметра дроту збільшується мінімальна сила струму, необхідна для займання суміші метану з повітрям. Одночасно з тим відбувається розширення проміжку вибуху зі зміною як нижньої, так і верхньої межі вибуху.

У разі займання газових сумішей від нагрітих поверхонь виявлені ті ж закономірності. Чим більша поверхня нагрітого тіла, тим ширший проміжок вибуху при одній і тій же температурі тіла.

Межі вибуху газової суміші у разі займання її від полум'я змінюються залежно від величини полум'я, його температури і тривалості контакту з сумішшю. Збільшення часу контакту суміші з полум'ям знижує нижню межу вибуху і збільшує верхню її межу, при цьому межі вибуху змінюються на одну і ту ж величину.

Додатки інертних газів і парів. Введення в суміш горючого газу з повітрям домішок негорючого газу змінює властивості суміші.

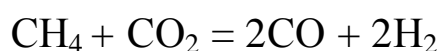
В сумішах при нижніх межах вибуху завжди є надлишок кисню порівняно з необхідною кількістю для горіння, тому нижня межа вибуху незначно змінюється при зменшенні концентрації  $O_2$  завдяки введенню інертних домішок.

В сумішах, на верхній межі вибуху, кисню недостатньо для повного горіння горючої речовини, яка знаходиться в суміші, тому верхня межа вибуху різко змінюється при зменшенні концентрації кисню.

Особливо активно впливають на межі вибуху домішки до вибухової суміші галогенпохідних. Введення у вибухову суміш 1 % галогенпохідних вже значно звужує проміжок вибуху.

Дія різних негорючих газів і парів на одну й ту ж вибухову суміш неоднакова. Щоб зробити суміш негорючою, одних газів потрібно більше, інших менше.

Я.Б. Зельдович, порівнюючи літературні дані про вплив добавки азоту на межі вибуху метану, показав, що добавка метану до стехіометричної суміші виявляє більший флегматизуючий вплив, ніж добавка азоту. Це пояснюється тим, що метан при високій температурі вступає в ендотермічні реакції з продуктами горіння стехіометричної суміші:



В результаті такої реакції температура полум'я метану знижується сильніше, ніж у випадку додавання до суміші інертних домішок. Початкова температура вибухової суміші впливає на її межі вибуху. З підвищенням температури проміжок вибуху розширюється, при цьому нижня межа зменшується, а верхня збільшується.

### 4.3. Температура і тиск вибуху

Зміна меж вибуху при підвищенні температури суміші відбувається в результаті зміни температури горіння суміші і пов'язаної з нею швидкості горіння. При розбавленні суміші продуктами її горіння температура горіння суміші зменшується в міру збільшення в ній концентрації продуктів горіння. Результати досліджень показали, що чим нижча температура горіння суміші, тим менша її швидкість горіння.

Таким чином, збільшення чи зменшення температури горіння вибухової суміші призводить до збільшення чи зменшення швидкості її горіння. Це положення можна застосувати для пояснення розширення проміжку вибуху газових сумішей при збільшенні початкової температури.

В зв'язку із збільшенням початкової температури суміші збільшується швидкість горіння граничних концентрацій суміші. При цьому суміші, дуже розбавлені горючою речовиною або повітрям і не здатні при низькій температурі вибухати, стають вибуховими.

Тиск суміші. Початковий тиск вибухової суміші впливає на її межі вибуху. Зміна границь вибуху при зміні тиску відбувається внаслідок зміни при цьому швидкості поширення полум'я. Вибухові суміші різних речовин при підвищенні тиску поведуть себе не однаково. Дослідження показують, що суміші метану з повітрям, навіть при тиску від 1 до 125 атм, не змінюють своїх меж вибуху. Нижня межа



вибуху метану з повітрям також майже не змінюється при зміні тиску, але верхня межа при підвищенні температури зростає. Така поведінка суміші метану пояснюється термічною стійкістю його під високим тиском, що виключає перебіг ендотермічних реакцій, які знижують температуру горіння. При зменшенні тиску вибухової суміші нижче за нормальний відбувається зменшення проміжку вибуху і при певному тиску суміш стає безпечною.

Напрямок поширення полум'я. На величину меж вибуху впливає також положення точки займання. Границі вибуху дещо змінюються залежно від того, чи відбувається поширення полум'я згори вниз, знизу вгору чи в горизонтальному напрямку.

Нижня межа вибуху є найменшою при поширенні полум'я знизу вгору і найбільшою – при поширенні полум'я згори вниз. При горизонтальному поширенні полум'я нижня межа для всіх сумішей має значення, що лежить в інтервалі між двома першими значеннями.

Верхня межа вибуху для всіх сумішей є найбільшою при поширенні полум'я знизу вгору і найменшою при поширенні полум'я згори вниз. Аналогічно при горизонтальному поширенні полум'я верхня межа має середнє значення між двома першими значеннями.

#### 4.4. Виникнення детонації

Поширення полум'я в газових сумішах відбувається з постійною швидкістю лише на відстані 0,5-1 м від точки займання, після чого полум'я вібрує, поширюється з прискоренням і сягає швидкості 2000-3000 м/с. Згорання газової суміші з такою швидкістю називається детонацією.

Характерні особливості детонаційної хвилі:

- детонаційна хвиля поширюється з постійною швидкістю. Швидкість детонаційної хвилі залежить від складу суміші і не залежить від умов проведення досліду (матеріалу і товщини стінок трубки, розташування трубки і т.ін.);

- при діаметрі трубок, більшому ніж 2 см швидкість детонаційної хвилі не залежить від їх діаметра;

- зміна тиску суміші на 1-3 атм і температури на декілька градусів не змінює швидкості детонаційної хвилі.

Велика швидкість згорання при детонації викликає наростання тиску. Внаслідок цього детонація, яка виникає в двигунах внутрішнього згорання, часто є причиною їх руйнування.

Існує декілька теорій детонації. Загальновизнаною теорією дето-

нації вважають гідродинамічну теорію.

Виникнення детонації в газових сумішах можна пояснити таким чином. При займанні газової суміші поблизу закритого кінця труби спостерігається спочатку рівномірне поширення полум'я. Прискорення полум'я виникає в результаті горіння суміші і розширення продуктів горіння близько закритого кінця труби. Розширення газів викликає стиснення і рух вибухової суміші перед фронтом полум'я. Швидкість утвореної ударної хвилі в 4-9 разів більша за нормальну швидкість поширення полум'я.

### **Контрольні запитання**

1. Які чинники впливають на нижню концентраційну межу поширення полум'я?
2. Які чинники впливають на верхню концентраційну межу поширення полум'я?
3. Чи впливає температура і тиск суміші на межі вибуху?
4. Що таке детонація?
5. Які характерні особливості детонаційної хвилі ви знаєте?
6. Яким чином виникає детонація в газових сумішах?

## РОЗДІЛ 5. ВОГНЕГАСНІ ЗАСОБИ

### 5.1. Вогнегасні засоби та їх класифікація

Вогнегасні засоби які використовуються для гасіння в основному представлені водою та її розчинами.

Відносну вогнегасну здатність води із добавками при гасінні пожеж класів А та В наведено у таблицях 5.1 та 5.2.

Таблиця 5.1

#### Ряд відносної вогнегасної здатності води із добавками при гасінні пожеж класу А

№ з/п	Вогнегасна речовина	Показник відносної вогнегасної ефективності
1.	Вода	1,0
2.	Вода + 2 % ПУ типу Pirena	1,6
3.	Вода + 2 % ГУР Prevento	3,0
4.	Вода + 34% $K_2CO_3$ + 0,5% ПУ типу AFFF	4,0
5.	ВВР ФСГ-2Ф	4,5

При гасінні пожеж майже у 90 випадках використовують в якості вогнегасного засобу воду. Вода як вогнегасний засіб має вагомні переваги, але і ряд недоліків.

До основних недоліків належать:

- водою не можна гасити горючі речовини і матеріали, з якими вона вступає в інтенсивну хімічну реакцію з виділенням тепла і горючих компонентів;
- водою не можна гасити пожежі з температурою вище 1800-2000°C, оскільки при таких температурах відбувається дисоціація води на водень і кисень, що інтенсифікує процес горіння. Однак більшість горючих матеріалів горить при більш низьких температурах. Із зазначеної причини неприпустимо застосовувати воду для гасіння магнію, цинку, алюмінію і деяких інших металів і сплавів;
- водою не можна гасити пожежі, якщо не гарантовано безпеку пожежників;

- воду проблематично застосовувати при низьких температурах, оскільки вона має високу температуру замерзання;
- водою заборонено гасити палаючі рідини, що мають меншу щільність, ніж щільність води. Зважаючи на це вода малоефективна при гасінні нафтопродуктів.

Таблиця 5.2

**Ряд відносної вогнегасної здатності води із добавками при гасінні пожеж класу В**

№ з/п	Вогнегасна речовина	Показник відносної вогнегасної ефективності
1.	H <sub>2</sub> O	1
2.	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> 5,00%	1,4
3.	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 2,00%	1,5
4.	KNO <sub>3</sub> 2,00%	1,6
5.	H <sub>2</sub> O (t <sub>кип.</sub> °C)	1,7
6.	K <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 3,00%	1,7
7.	ПУ типу AFFF 0,10 %	1,8
8.	ПУ «Пірена» 0,10%	1,8
9.	KNO <sub>3</sub> 4,40%	1,9
10.	ПУ «Пірена» 0,25%	1,9
11.	ПУ типу AFFF 0,40 %	1,9
12.	ПУ «Пірена» 1,00%	2,1
13.	K <sub>4</sub> Fe(CN) <sub>6</sub> (жовта кров. сіль) 1,00%	2,1
14.	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> 10,00% + 0,40% AFFF	2,3
15.	K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> 7,00%	2,5
16.	ВВР ФСГ-2Ф	2,5
17.	KBr 25,00%	3,9
18.	KNO <sub>3</sub> 3,00% + 0,40% AFFF	3,9
19.	KI 25,00 %	4,5
20.	114 B <sub>2</sub> (хладон)	5,3

Негативними властивостями води є її мала в'язкість і високий поверхневий натяг. Тому на практиці під час пожежогасіння широкого застосування набувають піни.

При цьому кінцева вогнегасна ефективність води як правило залежить від довжини струменя, дисперсності, концентрації добавок неорганічних солей у воді в якості добавок. Та основним недоліком при гасінні водою є необхідність забезпечення так званої вогнегасної витрати, яка дорівнює для більшості горючих матеріалів, які перебувають на об'єктах, від  $0,05 \text{ л}\cdot\text{с}/\text{м}^2$  до  $0,3 \text{ л}\cdot\text{с}/\text{м}^2$ . А при гасінні легкозаймистих та горючих рідин вона становить  $0,5 \text{ л}\cdot\text{с}/\text{м}^2$  і більше.

При гасінні стволами пожеж в резервуарних парках ефективно можна використовувати воду лише для охолодження стінок резервуарів, загасити полум'я струменями води при цьому не вийде, але їх можна використовувати для захисту і охолодження сусідніх резервуарів та особового складу, використовуючи розпилені струмені води.

Також для формування захисних завіс під час проведення оперативних дій на технологічних установках хімічної, нафтохімічної та нафтопереробної промисловості, а також на деяких інших підприємствах застосовують турбінні та щілинні розпилювачі НРТ-5, НРТ-10, НРТ-20, РВ-12, а також стволи Protec 366. Насадки-розпилювачі НРТ-5, НРТ-10 та РВ-12 встановлюють на ручні стволи РС-70 замість стандартної насадки. Насадку-розпилювач НРТ-20 встановлюють замість стандартної на лафетний ствол ПЛС-П20.

## 5.2. Вода. Компактні і розприскані струмені води

Вода – найбільш поширений та ефективний вогнегасний засіб. Вона застосовується для гасіння більшості твердих речовин та матеріалів, створення водяних завіс для охолодження об'єктів, технологічних установок та обладнання, що розташовані поблизу вогнища пожежі. Крім того, розпилена та тонкорозпилена вода застосовується під час гасіння легкозаймистих та горючих рідин.

Вода має високу теплоємність за нормальних умов ( $4,19 \text{ Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$ ) і добрі охолоджувальні властивості. Під час гасіння пожежі вода випаровується внаслідок контакту з нагрітими речовинами, матеріалами і конструкціями (з 1 л води утворюється 1725 л пари). При цьому відбувається розбавлення зони горіння. Маючи високу теплоту пароутворення ( $2258,36 \text{ Дж}/\text{кг}$ ), вода поглинає із зони горіння велику кількість теплоти, що забезпечує суттєвий охолоджувальний ефект.

Низька теплопровідність води сприяє створенню на поверхні горючого матеріалу надійної теплової ізоляції, а висока термічна стійкість – безпечному гасінню більшості твердих матеріалів, під час горіння яких температура не перевищує  $1300^\circ\text{C}$ , тоді як розкладання води на водень та кисень відбувається за температури понад  $1700^\circ\text{C}$ .

Здатність води розчиняти деякі рідини, наприклад спирт, ацетон, альдегіди, органічні кислоти, дає змогу розбавляти їх до негорючої концентрації та досягати припинення горіння. Крім того, вода здатна розчиняти деякі гази, поглинати аерозолі, що сприяє зниженню густини продуктів згорання, їх концентрації, створенню сприятливих умов для здійснення оперативних дій.

Однак воді, як вогнегасній речовині, притаманний ряд недоліків, зокрема, високий поверхневий натяг і, як наслідок, недостатня змочувальна здатність щодо неполярних горючих матеріалів; невисока кінематична в'язкість, яка обумовлює швидке стікання води з поверхонь, що горять. У результаті на саме гасіння витрачається близько 3-5 % всієї поданої води, решта проливається марно, призводячи до псування будівель, майна та обладнання. Воді також притаманна висока електропровідність, і це необхідно враховувати під час гасіння пожеж електроустановок, що перебувають під напругою. Вода також здатна вступати в реакцію з деякими речовинами та матеріалами.

Перспективним напрямком протипожежного захисту об'єктів багатьох типів є застосування розпиленої води з середнім діаметром краплин не більше 300 мкм, яка подається з вогнегасників і автоматичних установок пожежогасіння.

Компактні і розпилені струмені води дають можливість гасити пожежі переважно завдяки охолодженню палаючих речовин і матеріалів, їх ізоляції від окиснювача і механічному "зриву" полум'я. Вода, розпилена до краплин малого розміру (як правило, 40...150 мкм), дає можливість гасити полум'я переважно завдяки розбавленню газового горючого середовища водяною парою, що утворюється під час випаровування краплин.

Вода у виді компактних струменів використовується для гасіння пожеж, що вже сильно розвинулись; пожеж на висоті; коли необхідно подати воду на великі відстані (до 50-70 м) чи надати їй значної ударної сили для відриву полум'я від матеріалу, що горить; для створення водяних завіс та охолодження об'єктів, що розташовані поруч з осередком пожежі. Такий спосіб гасіння пожеж є простим та розповсюдженим, однак характеризується значними витратами води.

Розпиленими та тонкорозпиленими (краплинами менше 100 мкм) струменями води ефективно гасять тверді речовини і матеріали, горючі та навіть легкозаймісті рідини. При такому гасінні пожеж значно зменшуються витрати води, мінімально зволожуються та псуються матеріали, осаджується дим, створюються найбільш сприятливі умови для випаровування води, а відтак підсилюється охолоджувальний ефект (при випаровуванні 1 л води поглинається близько 22-105

Дж теплоти) та розбавлення горючого середовища. Гасіння розпиленою та тонкорозпиленою водою має низку переваг (в першу чергу зменшуються витрати води) і тому в останні роки набуває все ширшого застосування.

Як стверджується в роботі, за умови диспергування води до краплин розміром 400 мкм досягається ефект гасіння об'ємним способом, подібний до ефекту в разі застосування хладонів. Для раціонального використання розпиленої води з метою захисту великих площ поблизу вогнища пожежі розмір краплин не повинен перевищувати 100 мкм. Такі краплини краще покривають листя зелених насаджень, запобігаючи виділенню горючих речовин. Зі зменшенням відстані до вогню розмір краплин необхідно збільшити до 300 мкм. Вода такої дисперсності краще екранує предмети від інфрачервоного випромінювання і повільніше випаровується. В зоні пожежі найбільш ефективним є застосування води у вигляді великих краплин, які потрапляють на поверхню горючого матеріалу і випаровуються охолоджуючи її.

Краплини розміром до 40 мкм мають більшу здатність охолоджувати поверхню горіння, покриваючи її тонким шаром. Одночасно значно знижується витрата води. Для диспергування води використовували повітря під тиском від  $5 \cdot 10^5$  Па до  $8 \cdot 10^5$  Па. Відзначено, що цей спосіб є якісним стрибком у галузі дослідження можливостей застосування води для гасіння пожеж.

Вода, розприскана під високим тиском, здатна ефективно придушувати горіння, у певній мірі виконуючи роль засобу пожежогасіння об'ємним способом. Це пояснюється перш за все великою кількістю тепла, яке необхідне для переведення води у газоподібний стан. Водяною парою розбавляється повітря, внаслідок чого знижуються концентрація кисню та інтенсивність горіння. Ефектність застосування води залежить від розмірів краплин, оскільки цим зумовлюється швидкість їх випаровування. Тривалість випаровування краплин діаметром 20, 40 та 120 мкм може становити відповідно 50, 270 і 1600 мс.



**Рисунок 5.1** – Вода, розприскана під тиском

Водяна пара застосовується для гасіння пожеж у приміщеннях об'ємом до 500 м<sup>3</sup> та невеликих пожеж на відкритих майданчиках та устаткуванні. Пара зволожує матеріали та предмети, а також розбавляє повітря, знижуючи тим самим концентрацію кисню в зоні горіння. Вогнегасна концентрація водяної пари в повітрі становить приблизно 30-35% за об'ємом.

Дрібноросприскану воду можна отримати за допомогою відцентрових форсунок, крізь які під тиском подають холодну або перегріту воду, температура котрої перед соплом близька до 150 °С. Витікання перегрітої води супроводжується її випаровуванням з утворенням дисперсної рідкої фази.

Очевидні переваги використання дрібноросприсканої води у порівнянні з багатьма іншими вогнегасними речовинами пов'язані з такими факторами, як відсутність шкідливої дії або незначна шкідлива дія на людей, обладнання і довкілля, велика теплота пароутворення (2260 кДж/кг) і питома теплоємність (4,19 кДж/(кг·К)), низька теплопровідність. Вода характеризується високою термічною стійкістю, а також здатністю розчиняти деякі полярні горючі рідини, що дає змогу розводити їх до концентрацій, за яких горіння стає неможливим.

Дрібноросприскана вода ефективно поглинає теплове випромінювання і продукти згорання, одночасно з цим суттєво поліпшуються фізіологічні характеристики середовища, що має велике значення для проведення безпечної евакуації людей із приміщень. Відомо також, що у разі її використання значно зменшується надлишковий тиск, який виникає під час займання горючих сумішей. За результатами проведених досліджень, установки пожежогасіння модульного типу, в яких використовують тонкорозпилену воду, є реальною альтернативою хладонам у разі гасіння проливів і струменів палаючої рідини, пожеж у суднових приміщеннях, електротехнічного обладнання тощо. Під час проведення досліджень встановлено, що у разі застосування дрібноросприсканої води в різних системах, залежно від інтенсивності зрошення і діаметра краплин, тривалість роботи системи в десятки разів менша (0,5-6,0 хвилин), ніж у випадку спринклерних систем (30-120 хв). Завдяки цьому знижується витрата води і підвищується ефективність пожежогасіння.

Під час гасіння між факелом полум'я і краплинами води, які пролітають крізь нього, відбувається теплообмін, інтенсивність якого визначається низкою параметрів. Критеріальна залежність інтенсив-



ності теплообміну росприсканої води з газовим потоком може бути подана в такому вигляді:

$$N_u = A \cdot Re^n;$$
$$\alpha = B \cdot V^n / d^{1-n}$$

де  $N_u$  – критерій Нуссельта;  
 $Re$  – критерій Рейнольдса;  
 $A, B$  – емпіричні коефіцієнти;  
 $\alpha$  – коефіцієнт теплопередачі;  
 $d$  – середній діаметр краплин, м;  
 $n$  – показник ступеня, який визначається емпіричним шляхом;  
 $V$  – швидкість руху краплин води у факелі.

Зі збільшенням швидкості руху краплин у факелі й зменшенням їх розмірів теплообмін між ними і полум'ям інтенсифікується. Тому дисперсність потоку перегрітої води відіграє важливу роль у разі її застосування для пожежогасіння.

Досягнення в галузі розробки методів і технічних засобів для диспергування води, внаслідок якого забезпечується швидке поглинання тепла краплинами під час їх випаровування, що знижує температуру полум'я збивання. У стандарті NFPA 750 (США) на установки пожежогасіння, якими струмені води тонко диспергуються, відзначено, що найбільш ефективною для гасіння є вода, середній розмір краплин якої становить (80–200) мкм, а 99% від загальної кількості краплин мають розмір не більше ніж 500 мкм.

Встановлено, що максимальний розмір краплин води у випадку гасіння бензину не повинен перевищувати (100-110) мкм, гасу – (250-270) мкм, трансформаторної оливи – (380-400) мкм. У той же час зі зменшенням діаметра краплин різко знижується швидкість їх руху у факелі. В результаті суттєво зменшується радіус ефективної дії диспергованої води і знижується інтенсивність теплообміну. Дуже дрібні краплини (менші за 100 мкм) виносяться із зони горіння висхідними потоками газів.

Ефективність гасіння горючих рідин розпиленою водою збільшується при введенні до води добавок, що самоспінюються. Коефіцієнт ефективності композиції, що самоспінюється, пропорційний температурі поверхневого шару рідини і може становити від 2,7 до 14.

Одним із способів отримання тонкорозпиленої води, є застосування імпульсних високоенергетичних струменів. Отримання тонко-

розпиленої води цим методом відзначається специфічним механізмом формування і розвитком струменя у повітрі. Він полягає у викиданні дискретної кількості рідини із сопла у вигляді рідинного стрижня, який пролітає в повітрі певну відстань, розпилюється і утворює туманоподібну хмару в зоні пожежі. Можна збільшити далекобійність засобів пожежогасіння на 70% і отримувати краплини діаметром від 25 до 75 мкм, які містяться у хмарі більших краплин діаметром (400–1000) мкм. Краплини, отримані таким чином, характеризуються значною питомою поверхнею і великим коефіцієнтом теплопередачі. В разі застосування імпульсних струменів під час гасіння пожеж підвищується ефективність використання води в 6,5-7,0 разів. Проте, великим недоліком створення такої установки є її висока вартість.

Як було зазначено раніше, вогнегасна здатність води визначається насамперед її охолоджувальною дією, а також тим, що водяна пара розбавляє горюче середовище. Однак внаслідок невеликої в'язкості й поганої змочувальної здатності вода швидко стікає з палаючих предметів і значна її частка не бере участі у процесі гасіння. У зв'язку з цим доводиться збільшувати інтенсивність подавання і витрату води. З переходом від модельного вогнища до реальних пожеж різниця між теоретичними і фактичними значеннями витрати води збільшується в багато разів. За результатами проведених досліджень було зроблено висновки про основні причини такої залежності. З точки зору авторів цієї роботи, найбільш важливою з них є нерівномірність розподілу води на поверхні палаючої рідини, яка суттєво збільшується зі збільшенням площі пожежі. Слід відзначити, що будь-який розпилювальний пристрій розподіляє воду з певним ступенем нерівномірності, який залежить від його конструктивних особливостей. В ідеальному випадку розпилювальний пристрій повинен рівномірно розподіляти воду всією площею пожежі, що має суттєво збільшити коефіцієнт її використання. Однак досягнення цієї мети є складним інженерним завданням, яке для великих площ пожеж досі не має прийнятних рішень.

Одним із напрямків зменшення витрати тонкорозпиленої води під час гасіння пожеж є збільшення паровмісту. Дослідження з оцінювання витрат тонкорозпиленої води з установки, обладнаної електрорігрівачем, з об'ємом заповнення показують такі значення: 0,0052; 0,03 і 0,25 м<sup>3</sup>. Отже збільшення паровмісту у струмені від 0,1% до 5% веде до зменшення необхідної витрати води в 7-10 разів. У випадку отримання тонкорозпиленої води методом перегрівання

ефективність застосування деяких добавок ПАР залежить від способу перегрівання рідини, підвищення температури фазових переходів під час формування структури аерозолю.

Запропоновано метод одержання води аерозольного розпилу для гасіння пожеж, який базується на здатності води до адіабатичного кипіння після різкого зниження зовнішнього тиску. Воду нагрівають у закритій посудині до температури (150-170) °С, яка значно перевищує температуру кипіння за атмосферного тиску. Після випускання такої рідини в атмосферу внаслідок різкого падіння тиску відбувається миттєве закипання води у струмені по всьому об'єму. Це приводить до утворення дрібних краплин розміром не більше 100 мкм. Вода аерозольного розпилу найбільш ефективна для гасіння пожеж у замкнених просторах (гасіння об'ємним способом). Особливостями їх технології є використання вогнегасної речовини у вигляді газорідинної суміші, яка подається до зрошувачів одним трубопроводом, що значною мірою спрощує схему установки, її монтаж та експлуатацію.

Ефективність диспергування водної вогнегасної речовини забезпечують такі особливості технології:

- витікання із зрошувачів попередньо отриманої у спеціальному пристрої газорідинної суміші, що дає змогу застосувати відносно невеликий тиск (0,3-1,0 МПа) для отримання потоку краплин води з великою швидкістю, а це, у свою чергу, сприяє їх ефективному подрібненню;
- використання газорідинних струменевих форсунок-зрошувачів із співударянням струменів, які мають спеціальну форму, що також сприяє більш ефективному подрібненню вогнегасної речовини;
- створення особливого режиму витікання газорідинного струменя на вході в форсунку за допомогою спеціального пристрою;
- наявності вільного простору у форсунці, що дає змогу, використовуючи явище акустичного резонансу, забезпечити диспергування рідини до грубодисперсного туману.

Такими системами в Росії забезпечено понад 100 об'єктів різного призначення, зокрема фарбувальні виробництва, склади горючих і мастильних матеріалів, торговельні приміщення, сховища матеріальних цінностей банків, кабельні споруди, об'єкти метрополітену тощо.

Порівняльні характеристики установок пожежогасіння спринклерного типу та установок пожежогасіння тонкорозпиленою водою наведено в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3

**Порівняльні характеристики установок пожежогасіння**

Параметри	Установка спринклерного типу	Установка пожежогасіння тонкорозпиленою водою
Вогнегасна ефективність, кг/м <sup>2</sup>	до 300	1,5
Універсальність застосування	гасіння пожеж класу А	гасіння пожеж класів А, В і С та електроустановок, що перебувають Під напругою до 1000 В
Універсальність за способом подавання вогнегасної речовини	локально по площі	– по площі; – локально по площі; – по об'єму; – локально по об'єму
Необхідність зведення капітальних споруд	– водогони – резервуари – насосна станція – дренажні споруди	відсутня
Автономність	– водопостачання 30 л/с; – енергопостачання за I категорією (до 80 кВт)	автономна
Димоосаджувальна здатність	відсутня	висока
Питома вартість, USD/м <sup>2</sup>	до 30	до 15
Питома матеріалоємність, кг/м <sup>2</sup>	до 20	до 3
Особливості монтажу	монтаж розгалуженої мережі трубопроводів із застосуванням зварювальних робіт	монтаж на об'єкті з готових елементів
Особливості експлуатації	система перебуває під постійним надлишковим тиском	– простий регламент технічного обслуговування; – в черговому режимі відсутній надлишковий тиск

В Україні дотепер немає стандарту, який встановлює вимоги до водних вогнегасних речовин і методів їх випробувань.

### 5.3. Повітряно-механічна піна

Вогнегасні піни використовують при гасінні пожеж класу В, а також для запобігання загазованості навколишнього середовища або приміщень при розливах горючих рідин.

Піну заборонено застосовувати для гасіння пожеж класу Е і D (через електропровідність і хімічну активність водного розчину).

Піни чинять комплексну дію:

- ізоляція горючої пари,
- охолодження поверхні рідини,
- екранування поверхні горючої речовини від теплового впливу факела полум'я.

Домінуючим чинником є ізолююча дія.



**Рисунок 5.2** – Ізолююча дія піни

Процес гасіння палаючої рідини піною можна умовно розділити на кілька основних етапів:

1. Перші порції піни руйнуються в полум'ї. Відбувається випаровування розчину ПУ, розбавлення горючої суміші парами води. Це призводить до охолодження зони горіння.

Наступні порції піни потрапляють на розігріту поверхню горючої рідини і теж руйнуються. Холодний розчин ПУ, який виділився при цьому, охолоджує поверхневий шар горючої рідини безпосередньо у місцях подачі.

2. Після попереднього охолодження утворюється локальний шар піни на поверхні рідини. При цьому:

2.1. піна частково ізолює пару горючої речовини в своїх бульбашках, концентрація горючої речовини в зоні горіння зменшується, що обумовлює зменшення інтенсивності тепловиділення;

2.2. піна екранує частину горючої рідини від променистого теплового потоку полум'я, завдяки чому меншає швидкість випаровування. Це призводить до зменшення тепловиділення в зоні горіння і зниження температури горіння;

2.3. внаслідок охолодження поверхневого шару горючої рідини виникають конвекційні потоки в товщі рідини. При цьому перемішуються холодний і прогрітий шар горючої рідини, що обумовлює додаткове охолодження прогрітого поверхневого шару і стінок резервуара;

2.4. піна поступово поширюється по всій поверхні горючої рідини і покриває її.

3. Подальші порції піни накопичуються на поверхні горючої речовини шаром певної товщини і ізолюють пару рідини від зони горіння.

Горіння припиняється.

На вогнегасну ефективність піни впливають:

- природа горючої рідини;
- тривалість горіння пального до початку подавання піни (особливо при гасінні пожеж у резервуарах з нафтою і важкими нафтопродуктами);
- властивості піноутворювача;
- температура і склад води, яку використовують для приготування робочих розчинів;
- умови протікання пожежі;
- вид обладнання, яке застосовують для отримання та подавання піни.

#### **5.4. Вогнегасні порошки**

Вогнегасні порошки є найбільш універсальними вогнегасними засобами. Вони не викликають корозії металів, не електропровідні, не псують речовини і матеріали. Окрім високої вогнегасної ефективності до переваг порошоків слід віднести: здатність пригнічувати горіння під час гасіння пожеж твердих речовин, горючих рідин різних видів, газів, електроустановок, що перебувають під напругою; металів, у тому числі металоорганічних та інших пірофорних сполук, що не придатні до гасіння водою і піною. Порошковими вогнегасними речовинами можна ефективно гасити за низьких значень температури.

Основними компонентами вогнегасних порошків є мінеральні солі (фосфорно-амонійні солі: моно-, диамонійфосфати, амофос; карбонат і бікарбонат натрію та калію, хлориди натрію та калію) з домішками (кремнійорганічні сполуки, аеросил, біла сажа, тальк, стеарати металів, нефелін), що призначені для уникнення злежування та грудкування.

Вогнегасні порошки поділяються на дві групи: загального та спеціального призначення.

Порошки загального призначення використовуються для гасіння пожеж класів А, В, С звичайних органічних горючих речовин шляхом утворення порошкової хмари, яка "огортає" осередок пожежі.

До порошків загального призначення належать ті, що виготовляються на основі фосфорноамонійних солей (моноамонійфосфат, диамонійфосфат, амофос). Ці порошки гасять пожежі класів А, В, С та застосовуються для гасіння тліючих і твердих горючих матеріалів, горючих рідин, газів, електроустаткування, в тому числі під напругою. Вогнегасні порошки виготовлені на основі бікарбонату натрію використовуються для гасіння пожеж класів В, С:

- легкозаймистих та горючих рідин, газів;
- електроустаткування, двигунів (але не придатні для гасіння тліючих матеріалів (клас А) та лужних металів).

Порошки спеціального призначення використовуються для гасіння горючих речовин, припинення горіння яких досягається шляхом ізоляції поверхні, що горить, від навколишнього повітря шаром вогнегасного порошку.

Вогнегасні порошки забезпечують можливість швидкого припинення полуменевого горіння. Дрібнодисперсні частки, що входять до складу вогнегасних порошків, гальмують (інгібують) реакції окиснення в газовій фазі, а плівка, що утворюється в результаті розкладання і плавлення складових порошку, сприяє гасінню твердих горючих матеріалів і перешкоджає їх повторному займанню. Однак вогнегасні порошки, на відміну від води, практично не охолоджують будівельні конструкції і горючі матеріали, нагріті в результаті пожежі.

На відміну від води і піни, вогнегасні порошки не можна подавати у приміщення, де перебувають люди. Існують вогнегасні порошки, придатні для гасіння горючих рідин і твердих горючих матеріалів, а також порошки спеціального призначення, здатні гасити метали (наприклад, натрій, калій, літій, магній). Крім таких вогнегасних порошків, інші види вогнегасних речовин для гасіння металів практично не придатні, замість них можна застосовувати хіба що сухий пісок, інфузорну землю та інші подібні матеріали.

Вогнегасні порошки являють собою мілко подрібнені мінеральні солі з різними добавками, що протидіють злежуванню та утворенню грудок. Вони характеризуються високою вогнегасною спроможністю та універсальністю щодо сфери застосування. Вогнегасні порошки можна використовувати для різноманітних способів пожежогасіння, в тому числі для інгібування та придушення горіння вибухом. Розрізняють порошки загального та спеціального призначення. Основними компонентами порошоків є бікарбонат натрію (технічна сода), діамоній фосфат, карбонат натрію, насичений хладоном сілікогель.

### **5.5. Аерозолі**

Останнім часом набувають все більшого поширення нові засоби пожежогасіння – аерозолеутворюючі склади. В установках об'ємного пожежогасіння в якості вогнегасних агентів використовуються твердофазні аерозолі, які одержують при згорянні зарядів генератору аерозолів. За вогнегасною ефективністю аерозолі перевершують всі відомі засоби об'ємного гасіння.

Основою аерозолів служить окисно-відновна твердопаливна композиція (ТПК), що складається зі спеціально підібраних хімічно стабільних в початковому стані речовин, здатних до самостійного горіння без доступу кисню.

Існують три основних типи твердопаливних композицій:

- піротехнічні, основою яких є порох;
- сумішеві, основою яких є тверде ракетне паливо;
- балістичні, основою яких є нітроцелюлоза.

Вогнегасні аерозолі отримують здебільшого шляхом розкладу твердопаливних аерозольгенерувальних матеріалів – аерозольових вогнегасних речовин. Ці речовини являють собою спеціальні структурні композиції, основою яких є гетерогенні конденсовані суміші горючих (базових) компонентів та окисників з добавками (або без них) цільових і технологічних компонентів. За нормальних умов твердопаливні композиції характеризуються високою хімічною стабільністю, але під час нагрівання (від електричної спіралі, піропатрона, вогнища пожежі) здатні інтенсивно реагувати (згоряти) і забезпечувати бажаний ефект утворення вогнегасних аерозолів з прийнятними для практики пожежогасіння властивостями.

Горіння твердопаливних композицій являє собою окисно-відновний процес. Як відновники зазвичай використовують горючі органічні або неорганічні речовини (метали, неметали, комплексні



сполуки тощо), а окисниками є солі неорганічних кислот (наприклад, перхлорат або нітрат калію), оксиди металів, а також кисень повітря (або їх комбінації). Горіння твердопаливних композицій відбувається за високої температури (800-1000 °C і вище).

У результаті горіння можуть утворюватись такі продукти:

- суміші твердих і газоподібних речовин (наприклад, під час горіння сумішей фенолоформальдегідної смоли з перхлоратом калію):



- тверді речовини (наприклад, під час горіння терміту):



- газоподібні речовини (наприклад, під час горіння сумішей нітрату амонію з вуглецем або органічними речовинами).

Горіння різних за складом і хімічною природою компонентів твердопаливних композицій – складний процес, який можна умовно поділити на три стадії: ініціювання, займання і власне горіння (поширення вглиб). Для початку горіння необхідна зовнішня теплова дія (ініціювання), тобто нагрівання хоча б частини речовини до температури займання. Після займання правильно підібраної композиції немає необхідності в подальшому її нагріванні, оскільки теплоти, що виділяється під час згоряння, достатньо для займання сусідніх шарів і самостійного горіння. Горіння твердопаливних композицій являє собою сукупність багатьох екзо- та ендотермічних процесів, а також дифузії і теплообміну. Воно починається в конденсованій, а закінчується в газовій фазах (полум'я).

Сполуки металів, що утворюються в результаті газофазових хімічних реакцій і перебувають у полум'ї в газоподібному (пароподібному) стані, потрапляючи в холодне навколишнє середовище, охолоджуються і перенасичують газовий простір. Відбувається їх конденсація з утворенням у потоці газу твердих частинок мікронних і субмікронних розмірів. Таку двофазову систему, що утворюється під час горіння, називають твердофазовим аерозолем. Найбільш перспективними композиціями для отримання вогнеганих аерозолів є твердопаливні, наприклад такі, що складаються з нітрату (або перхлорату) калію та фенолоформальдегідної смоли. Вони згоряють практично повністю, утворюючи твердофазові золі, тобто суміші негорючих газоподібних (азот, діоксид вуглецю, водяна пара тощо) і твердих речовин, головним чином сполук лужних та (або) лужноземельних металів (оксидів, гідроксидів, карбонатів, бікарбонатів, хлоридів та ін.).

Аерозолеві вогнегасні речовини застосовують у вигляді вогне-

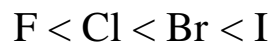
гасних зарядів, сформованих із попередньо подрібнених або розчинених компонентів з використанням різних технологій (пресування, лиття та ін.). Вогнегасні заряди можуть бути різної маси, розмірів і конфігурації, але найчастіше мають циліндричну форму. Вони призначені для отримання і подавання вогнегасних аерозолів у вогнище пожежі та застосовуються, головним чином, у замкнених (обмежених) просторах приміщень, споруд або окремих елементів стаціонарних чи пересувних об'єктів.

Вибір рецептур аерозольних вогнегасних речовин для практичного застосування здійснюється з урахуванням 16-24 показників, серед яких є фізико-хімічні, балістичні, вибухові, механічні експлуатаційні та показники вогнегасної ефективності. Під час вибору рецептур, призначених для застосування в установках аерозольного пожежогасіння, враховують також токсичність, оптичні, електричні властивості аерозолю, можливість руйнування озонового шару, корозійну активність тощо.

Усі сполуки, що входять до складу вогнегасних аерозолів, мають бути безпечними для довкілля, але деякі з них можуть являти небезпеку для людей, які перебувають у приміщенні, що підлягає захисту. Тому забороняється застосування автоматичних установок аерозольного пожежогасіння у приміщеннях з масовим перебуванням людей (більше 50 осіб), які не можуть залишити це приміщення до початку роботи генераторів вогнегасного аерозолю (ГВА), а допуск персоналу в захищене приміщення дозволяється після провітрювання та зниження концентрації аерозолів коли видимість становитиме не менше 5-6 метрів. Застосування аерозольних установок для гасіння пожеж в приміщеннях з електроустаткуванням та електрообладнанням до зняття з них напруги допускається за умови, якщо її значення не перевищує гранично-допустимої величини напруги для ГВА.

### **5.6. Використання хладонів для гасіння пожеж і запобігання вибухам**

Галогенопохідні вуглеводні застосовують у пожежогасінні як інгібуючі вогнегасячі засоби (хладони). Зрозуміло, якщо сполуки мають різний вміст атомів галогенів і різну молекулярну масу, то вони мають різні властивості гасіння полум'я. Чим більше атомів галогену у молекулі, тим більша вогнегасна здатність сполуки. Дія галогенів нерівноцінна: чим більша атомна маса цього елемента, тим вища його ефективність; так що вона підвищується у ряді:



Йод – речовина дуже дорога і дуже дефіцитна, тому у практиці більш поширені бромовмісні сполуки. Йодо-, бром-, і хлоровмісні сполуки настільки активні, що при зберіганні можуть гідролізуватися водою; крім того вони мають підвищену корозійну і токсичну активність. Для зниження такої дії у молекулу вводять атом флуору. Флуоробромпохідні і флуорохлоробромпохідні у дальньому зарубіжжі мають торгову назву "галони"; у нас "хладони". Хладони мають свою класифікацію, свою номенклатуру, яка склалася історично. Ця номенклатура дуже складна і дуже незручна, але нею користуються і її необхідно знати.

Писати номер хладону за формулою треба з кінця, справа наліво. Якщо хладон має атоми бром, у назві хладону стоїть буква В, за цією буквою іде цифра, яка позначає кількість атомів бром у молекулі. Наприклад,  $CF_3Br - 13B1$ ;  $C_2F_4Br_2 - 114B_2$ . Перед буквою В або, якщо бром немає, взагалі, останньою цифрою (так би мовити, одиниці) стоїть цифра, позначає кількість у молекулі атомів флуору; перед цією цифрою стоїть цифра (так би мовити, десятки), що вказує кількість атомів водню плюс один, ще лівіше – цифра, що вказує кількість атомів карбону мінус 1. Кількість атомів хлору ніяк не позначається, її треба вираховувати за вільними зв'язками карбону. Наприклад,  $C_2F_4Br_2 - 114B_2$ ;  $CF_2ClBr - 12B1$ .

У середньому полум'я гаситься при концентрації хладону у 2-3 %. Але до цифри 2-3 %-ва гасна концентрація хладону слід відноситися обережно. Це середня гасна концентрація. Дійсна, так звана "пікова", залежить від марки хладону і складу горючої суміші.

Має значення і інтенсивність процесу горіння, інтенсивність виділення тепла. За останньою ознакою пожежі поділяють на три категорії: малоенергетичні, коли тепло продукується тільки полум'ям; середньоенергетичні, коли тепло додатково випромінюється розпеченими поверхнями, і високоенергетичні, коли тепло постачається не тільки полум'ям і нагрітими поверхнями, але й додатковими джерелами (джерелом запалювання, хімічною або іншою реакцією).

Залежно від названих трьох факторів (природа горючої речовини, тип хладону та енергетичність пожежі) необхідна пікова гасильна концентрація засобу може коливатися у досить широких межах, від 1,9-2 % до 19-21%. Найвищою гасячою здатністю серед тих хладонів, що випускаються промисловістю, має 114B<sub>2</sub> (C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>Br<sub>2</sub>). Малоенергетичні пожежі вуглеводнів, спиртів, етерів і т.ін. він гасить вже при концентрації близько 2%. А, наприклад, пікова концентрація карбон тетраклориду, хладону 10 (CCl<sub>4</sub>) при гасінні тих же пожеж становить 16–18%. При гасінні середньоенергетичних пожеж необхід-

на пікова гасильна концентрація будь-якого хладону буде збільшуватися на 30–40%, а при гасінні високоенергетичних – ще на 30-40 %.

Залежність від типу горючої речовини чіткої закономірності не має, але чим більше тепла виділяється при горінні речовини, тим більша концентрація хладону потрібна для припинення цього горіння. Так, для припинення горіння ацетону чи гексану в умовах середньоенергетичних пожеж потрібна приблизно 4,3%-ва концентрація хладону 13В<sub>1</sub> (CF<sub>3</sub>Br); для припинення горіння у тих же умовах метанолу чи ацетилену – 9%-ва концентрація того ж засобу. Ще разючішою буде різниця в умовах високоенергетичних пожеж: відповідно, 4,5% – для ацетону, 6,9% – для гексану, 14% – для метанолу і 19% – для ацетилену.

Застосування галогеновуглеводнів має переваги перед застосуванням водних розчинів, пін або інертних газів. Основне – це відносно незначна кількість інгібіторів, яку треба ввести у зону, щоб загасити полум'я (2-3% від об'єму). Це в 10-12 разів менше ніж, наприклад, кількість вуглекислого газу і в 15-20 разів менше ніж потрібна кількість азоту. Мала кількість речовини, яка необхідна для гасіння пожежі та швидка дія, яка ефективно знижує тривалість пожежі і помітно зменшує втрати від неї, спричинили широке використання цих засобів, особливо хладону (фреону) 114В<sub>2</sub>. Основна область їх застосування – пожежі в огороженнях, тобто там, де пожежа має певний об'єм.

Але галогеновуглеводні мають і недоліки. Такий показник, як відносно велика ціна, особливо значення не має, оскільки усунення втрат від збільшення часу пожежі значно перевищує втрати на інгібітор. Більшу увагу привертає проблема отруєння навколишнього середовища. Хладони – токсичні самі по собі і дають токсичні продукти при піролізі і реакціях з продуктами горіння (активними частинками процесу горіння). У рідкому вигляді деякі з них проходять крізь шкіру людини, а у газоподібному стані і самі хладони і продукти, що з них утворюються, потрапляючи у дихальні шляхи, викликають подразнення.

Максимально безпечні концентрації самих хладонів, які людина може витримати протягом 1 хвилини, зображено в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4

#### Максимально безпечні концентрації хладонів

Назва хладону	Максимально безпечні концентрації
13В <sub>1</sub> (CF <sub>3</sub> Br)	1,0-1,2%;
12В <sub>1</sub> (CF <sub>2</sub> ClBr)	4,0-5,0%;
114В <sub>2</sub> (C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> Br <sub>2</sub> )	1,5-2,0%.

В умовах пожежі галогеновуглеводні розкладаються з утворенням вільних галогенів і галогеноводнів. Крім того, у продуктах розкладу з'являється незначна кількість галогенозаміщених кетонів, галогенозаміщених альдегідів і галогенозаміщених кислот, тобто сполук з лакриматорними (сльозогінними) властивостями. Ступінь розкладу хладонів і кількість продуктів, що утворюються, залежать від розмірів пожежі і коливаються у межах від 0,2 до 2%. У цілому, концентрації шкідливих речовин, які створюються при застосуванні цих засобів для гасіння пожеж, у 5-10 разів, нижчі від летальних і тому шкоду здоров'ю від них можна вважати навіть меншою ніж та, яку завдають на пожежі чадний газ і карбон діоксид.

В останні роки поширюється думка про те, що хладони накопичуючись у верхніх шарах атмосфери, спричиняють за зменшення там кількості озону. Згідно із сучасними поглядами, озоновий шар, який оточує стратосферу нашої планети, затримує більшу частину ультрафіолетового випромінювання Сонця і захищає планету від надмірного нагрівання, а біологічні об'єкти – від згубних доз ультрафіолетової радіації. За теорією, яку було висунуто у 70-ті роки, галогеновуглеводні, які викидаються вулканами і цивілізацією, активно реагують з озоном, зменшують товщину його шару і навіть призводять до утворення в цьому шарі отворів, "озонових дір".

Питома маса газоподібних хладонів на порядок перевищує питому масу азоту і кисню – основних складових повітря; більшість хладонів за нормальних умов має тиск насиченої пари, набагато нижчий від тиску насиченої пари кисню та азоту. Отже, згідно з законами конвекції, ці речовини будуть більше розподілятися у нижчих шарах атмосфери і зменшуватися з висотою. Крім того, порівняно з розмірами озонового шару кількість хладонів, що виробляється, зникаюче мала. Таким чином, виникають серйозні сумніви відносно того, що, по-перше, у верхніх шарах атмосфери дійсно є практично значимі кількості галогеновуглеводнів; по-друге, якщо вони там і є, то мають земне, а не космічне походження; по-третє, якщо ці галогеновуглеводні потрапили у стратосферу з землі, то вони мають техногенне, а не природне походження (наприклад, вулканічне).

Наприкінці 80-х років нашого століття Монреальським протоколом представників більшості розвинених держав було рекомендовано заборонити виробництво і застосування на нашій планеті будь-яких галогеновуглеводнів взагалі.

Корозійну активність ці засоби мають невисоку і при зберіганні сухі хладони помітної дії на метал не чинять. Однак, за наявності во-

логи, та ще й підвищеної температури, іде гідроліз галогенозаміщених вуглеводнів до спиртів з відщепленням галогеноводнів, які утворюють з вологою гідроген хлориду і подібні кислоти.

### **Контрольні питання**

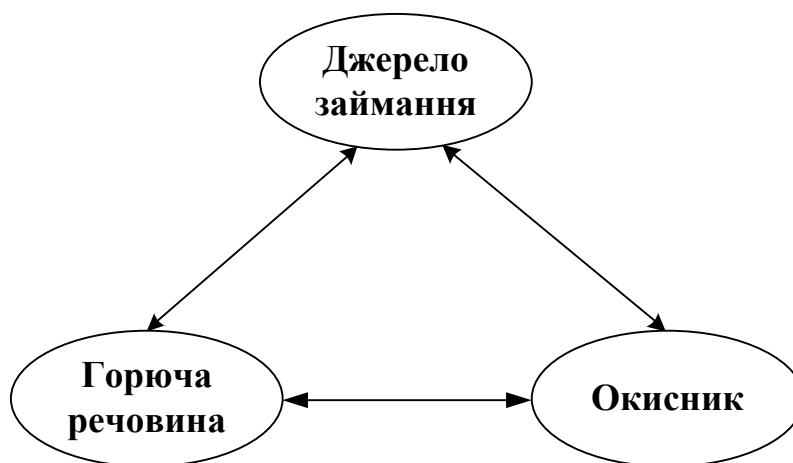
1. Які сполуки відносять до галогенопохідних вуглеводнів?
2. Від яких факторів залежать хімічні властивості галогенопохідних вуглеводнів?
3. Що більше потребує уваги: пожежонебезпечність чи токсичність галогенопохідних вуглеводнів?
4. Яка особливість класифікації і номенклатури хладонів?
5. У чому полягає основний принцип припинення горіння хладонами?
6. До якого класу речовин відносяться хладони?
7. Назвіть основні переваги застосування хладонів для гасіння пожеж.

## РОЗДІЛ 6. МЕХАНІЗМ ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ ТА ВИБУХУ

### 6.1. Гасіння пожежі через вилучення однієї зі складових частин горіння та граничні параметри процесу горіння.

Під поняттям гасіння пожежі перш за все розуміють припинення горіння у всіх його видах і формах, та створення умов для запобігання повторному відновленню горіння.

Згадаємо попередній матеріал де ми розглядали умови протікання процесів горіння і представляли цей процес у формі умовного трикутника пожежі.



**Рисунок 6.1** – Схема умовного трикутника пожежі

З цієї схеми видно, що достатньо обірвати хоча б один із зв'язків у трикутнику і горіння стане неможливим, а найкраще взагалі “прибрати” один із кутів трикутника. Наприклад, щоб припинити горіння газу чи ЛЗР, чи горючу речовину на технологічних установках, достатньо перекрити вентиль на трубопроводі або, якщо розмір осередку невеликий, достатньо його накрити металевим листом чи азбестовим полотном, чи просто мокрим брезентом, в цьому випадку “прибирають” одночасно два кути і горючу речовину та окисник. Або, наприклад, закрити отвори в приміщенні, тим самим “прибрати” окисник. Цей прийом застосовують в підвалах, шахтах, тунелях. Тим самим створюються умови для зниження концентрації кисню і припиняється полум'яне горіння (до 15-14 %) але буде продовжуватися безполум'яне горіння і тління, яке може протікати при концентраціях кисню до 5-6 % об. Прикладів можна наводити дуже багато. Але на реальних пожежах не все так просто.

Тому, щоб зрозуміти і вибрати правильний напрямок гасіння пожежі ми, в першу чергу, розглянемо ті умови або параметри, які ведуть до припинення горіння.

Граничними вважають такі умови та параметри, за межами яких процеси горіння не можуть виникнути та підтримуватися. Таких умов є багато, але назвемо головні:

- концентраційні межі поширення полум'я;
- температурні межі поширення полум'я;
- межі за тиском;
- критичні значення енергії запалювання;
- граничні швидкості поширення полум'я;
- граничні значення масової швидкості вигорання;
- граничні значення температури горіння.

Найбільший практичний інтерес представляють ті напрямки та характеристики, на які ми можемо впливати. Це перш за все:

- концентраційні межі поширення полум'я;
- швидкість поширення полум'я;
- межі за теплотою згоряння;
- температурні межі поширення полум'я.

Всі ці параметри тісно пов'язані один з одним. Дія на один з них автоматично тягне за собою зміну інших. Розглянемо детально ці параметри:

Концентраційні межі поширення полум'я. При зниженні до певного значення концентрації горючої речовини або окисника, енергія, необхідна для підпалювання горючої суміші, стає нескінченно великою і займання стає неможливим.

При концентрації горючої речовини нижчій за НКМПП чи вищій за ВКМПП полум'я не поширюється. В першому випадку бракує горючої речовини, а у другому – окисника. Відомо, що при концентрації кисню в повітрі меншій за 10-15% суміш вуглеводнів з таким повітрям не спроможна горіти.

Граничні межі за швидкістю поширення полум'я. Цей параметр цікавий з точки зору динаміки розвитку пожеж. При цьому треба відмітити, що численні величини верхніх меж поширення полум'я не є чіткими, а от нижні межі та масові швидкості вигорання для окремих речовин відомі достатньо точно. Якщо бути точним, то верхніх меж величин швидкостей поширення полум'я майже не існує. Вони змінюються від 0,4 до 2,5 м/с для нормального ламінарного горіння і можуть сягати 50-100 м/с, потім вони можуть перейти в інтенсивне



турбулентне горіння, а далі, в довгих каналах чи трубах, можуть розігнатися до 300-400 м/с, після чого переходять в режим детонаційного горіння, зі швидкістю 2-3 км/с. Нижні значення швидкості поширення полум'я мають більш конкретну величину – порядку 0,02-0,04 м/с. Масові швидкості вигорання твердих та рідких горючих речовин також залежать від виду горючої речовини і умов горіння. Для рідин верхня межа масової швидкості вигорання рідко буває більшою за 0,05-0,1 кг/м<sup>2</sup>·с. Для твердих горючих матеріалів – 0,015-0,02 кг/м<sup>2</sup>·с. Нижня межа масової швидкості вигорання практично однакова як для рідин, так і для твердих матеріалів і приблизно дорівнює 0,003-0,005 кг/м<sup>2</sup>·с. При маленьких швидкостях вигорання процес поширення горіння стає практично неможливим.

Межі за теплотою згорання. Цей параметр враховує інтенсивність тепловиділення. Звичайно, теплота згорання вуглеводневих речовин знаходиться в межах 10-50 тис. кДж/кг. Але з точки зору припинення горіння інтерес представляє нижня гранична межа теплового ефекту від згорання 1 м<sup>3</sup> газоповітряної суміші будь-якого виду горючої речовини. Ця величина дорівнює приблизно 1800-1830 кДж/м<sup>3</sup>, нижче цього значення самовільне продовження горіння стає неможливим і полум'я згасає.

Температура горіння. Теоретичні значення температури горіння становлять 2000-2500К (залежно від виду горючої речовини, складу горючої суміші). В реальних умовах, через втрати тепла із зони горіння і теплоти згорання, температура полум'я рідко перевищує 1700-1800 К. Звичайно приймають, що верхньою межею при горінні газів є температури 1600-1800 К; 1500-1600 К – рідин; 1400-1500 К – твердих матеріалів.

## 6.2. Теплова теорія згасання полум'я

Суть теорії зводиться до того, що при порушенні умов теплової рівноваги в зоні протікання хімічних реакцій горіння самовільний і безперервний перебіг цих реакцій стає неможливим і процес горіння припиняється, тобто коли  $q^+ < q^-$ . Це виникає тоді, коли в результаті порушення теплової рівноваги в зоні горіння температура знижується до деякого критичного значення.

Щоб знайти це критичне значення Я.Б. Зельдович склав систему рівнянь, які враховують залежність швидкості вигорання від температуропровідності горючої суміші, тепловтрат в зоні горіння в напрямку продуктів горіння, які поступово охолоджуються. При цьому розг-

лядалися два температурні рівні: теоретична (адіабатична) температура (без тепловтрат) і “максимальна”, тобто температура при якій горіння буде обов’язково поширюватися, навіть з урахуванням всіх теплових втрат. При температурі, нижчій за  $T_{\max}$ , полум’я може згаснути і навпаки, тобто – це гранична температура  $T_{кр}$ .

Розв’язавши ці рівняння Я.Б. Зельдович знайшов межу режиму поширення полум’я як різницю між теоретичною та критичною температурами.

$$\Delta T = T_{теор} - T_{кр} = \frac{RT^2}{E_a},$$

звідси:

$$T_{\max} = T_{теор} - \frac{RT^2}{E_a}$$

Для більшості горючих речовин  $T_{теор} \approx 2000-2600\text{K}$ , тобто в середньому 2300 К, енергія активації, навіть для найшвидших реакцій горіння не менше  $E_a \sim 40-45$  кДж/моль, універсальна газова стала  $R = 8,314$  Дж/(моль·К). Підставивши ці значення у вираз одержимо, що  $T_{\max} = 1250$  К (977°C).

Таким чином, температура, нижче якої полум’я не може існувати, приблизно дорівнює 1000°C. Цю температуру прийнято називати температурою згасання.

Якщо порівняти теоретичну температуру горіння (2300 К) і температуру згасання 1250 К то складається враження, що для припинення горіння необхідно відвести велику кількість тепла, щоб знизити температуру до  $T_{кр}$ , але насправді це не так, бо в реальних умовах пожежі завдяки тепловтратам на випромінювання і конвективний теплообмін, які в сумі сягають 40-45 %, температура дифузійного полум’я значно менша ніж адіабатична в середньому на 40-45 %, тобто лежить в межах 1100-1300°C. Отже, для того щоб знизити температуру в зоні горіння дифузійного факела до температури згасання 1250К (977°C) температуру факела достатньо знизити всього на 300°C.

### 6.3. Умови та принципи припинення горіння

Під принципом припинення горіння слід розуміти фізичний або хімічний процес, спрямований на створення в зоні реакції горіння умов для затухання (придушення полум’я).

До основних шляхів припинення процесу горіння належать:

- припинення надходження окиснювача (кисню) до осередку

горіння;

- зниження концентрації кисню в повітрі шляхом розбавлення його негорючими газоподібними речовинами;
- зниження температури горючої речовини до рівня, нижчого за температуру спалаху;
- зменшення концентрації горючих речовин шляхом розбавлення їх негорючими речовинами;
- інтенсивне зниження швидкості хімічної реакції (інгібування);
- механічний зрив полум'я потужним струменем води, порошку, газу.

Реалізація цих рішень з використанням вогнегасних речовин, що подаються з технічних засобів пожежогасіння, забезпечує можливість припинення процесу горіння.

Вибір тих чи інших способів гасіння пожеж, а також вогнегасних речовин, способів і засобів їх доставки в осередок горіння визначають у кожному конкретному випадку залежно від масштабу пожежі, особливостей горючих речовин і матеріалів, а також стадії розвитку пожежі.

В практиці гасіння пожеж найчастіше використовується поєднання декількох принципів. Вода, наприклад, діє як охолоджуючий засіб, але під час її нагрівання утворюється пара, яка розбавляє реагуючі речовини. Пінні вогнегасні засоби є основними під час ліквідації горіння за принципом ізоляції, але вони також мають властивість відбирати тепло. Вогнегасні порошки гасять полум'яне горіння завдяки інгібуванню (уповільненню, припиненню) хімічних реакцій горіння. Інгібування буває гомогенне (інгібітор газоподібний) та гетерогенне (інгібітор твердий). Для плавлення і випаровування мікронного розміру частинок порошку витрачається незначна частина тепла полум'я, тому охолоджувального ефекту вогнегасні порошки практично не дають. Інгібувальна дія порошку є одночасно і гомогенною і гетерогенною, інгібування відбувається за час  $10^{-3}$ - $10^{-6}$  с. Під час плавлення порошки створюють на поверхні матеріалу, що горить, ізолюючу плівку, через яку із горючого матеріалу в об'єм не можуть надходити горючі гази та пари горючих рідин. У разі подавання в зону горіння інертних газів відбувається відбирання тепла, розбавлення речовин та зниження загальної концентрації кисню в об'ємі приміщення (навколо зони горіння).

Вогнегасні речовини (засоби) за домінуючим принципом припинення горіння поділяють на чотири групи:

- 1) Охолодження горючих речовин або зони горіння:
  - суцільними струменями води;
  - розпиленими струменями води;
  - перемішуванням горючих речовин.
- 2) Ізоляції горючих речовин або окисника (повітря) від зони горіння:
  - шаром піни;
  - шаром продуктів вибуху вибухових речовин;
  - утворенням розривів у горючій речовині;
  - шаром вогнегасного порошку;
  - вогнегасними смугами.
- 3) Розбавлення повітря чи горючих речовин:
  - тонкорозпиленими струменями води;
  - газоводяними струменями;
  - негорючими газами чи водяною парою;
  - водою (для горючих та легкозаймистих гідрофільних рідин).
- 4) Хімічного гальмування (інгібування) реакції горіння:
  - вогнегасними порошками;
  - галогеновуглеводнями.

Використовують також комбінований механізм гасіння пожежі (одночасно кілька способів припинення процесу горіння).

Речовини з такими фізико-хімічними властивостями, які дають змогу створити умови для припинення горіння, називають вогнегасними речовинами. Вони повинні володіти високим ефектом гасіння при відносно малій їх витраті, бути дешевими, безпечними при застосуванні, не заподіювати шкоди матеріалам, предметам та навколишньому середовищу. Речовинами, що найбільш повно відповідають вищезазначеним вимогам, а відтак належать до основних вогнегасних речовин є: вода (в різних видах), піна, інертні та негорючі гази, галогенопохідні вуглеводнів, спеціальні порошки, пісок. Ці речовини, зазвичай комбіновано діють на процес горіння. Так, вода охолоджує та ізолює (або розбавляє) джерело горіння; піна здійснює ізолювальну та охолоджувальну дію; порошки можуть інгібувати процес горіння та ізолювати тверді горючі речовини від зони полум'я. Однак для будь-якої вогнегасної речовини характерна основна (домінуюча) дія. Наприклад, вода здійснює, в основному, охолоджувальну дію на процес горіння, піна – ізолювальну, інертні та негорючі гази – розбавлювальну, галогеновуглеводні та порошки – інгібувальну.

#### 6.4. Способи запобігання та припинення горіння

Умовами припинення горіння є видалення одного з чинників, що викликають горіння, а саме: горючої речовини, окисника чи джерела запалювання. Найчастіше під час пожеж для припинення горіння застосовують методи, які знижують інтенсивність джерела запалювання. Оскільки джерелом запалювання на пожежі є полум'я, яке передає тепло новим ділянкам горючого матеріалу шляхом випромінювання, конвекції, теплопередачі або перенесенням активних частинок, то для її гасіння необхідно знизити до критичного значення кожен з цих видів передачі енергії.

Чим вищою є температура горіння, тим більше енергії передається кожним із вказаних шляхів. Таким чином, для припинення горіння необхідною є лише одна умова – знизити температуру в зоні реакції горіння до значення, нижчого за температуру згасання. Цього можна досягнути шляхом збільшення швидкості тепловідведення або зменшення швидкості тепловиділення. За домінуючим принципом припинення горіння вогнегасні засоби поділяють на чотири групи:

- охолодження зони горіння чи горючої речовини;
- ізоляція реагуючих речовин від зони горіння;
- розбавлення реагуючих речовин;
- хімічне гальмування реакції горіння (інгібування).

В процесі гасіння пожежі умова згасання забезпечується шляхом фізичної і хімічної дії на реакцію горіння вогнегасними засобами.

Вогнегасні засоби – це речовини і матеріали, які безпосередньо вводяться в зону горіння і створюють умови для припинення горіння.

Однак не всі вогнегасні засоби застосовуються для гасіння пожеж, а лише ті, які відповідають певним вимогам. Вогнегасні засоби повинні:

- володіти високим ефектом гасіння при порівняно малій витраті;
- бути доступними, дешевими і простими в застосуванні;
- не проявляти шкідливого впливу на людей і матеріали, бути екологічно чистими.

Вогнегасні засоби класифікують за двома ознаками: за агрегатним станом та за механізмом дії.

Вогнегасні засоби за агрегатним станом класифікують на: газо-подібні, рідкі та тверді.

До газоподібних відносяться: нітроген, аргон, діоксид вуглецю, а також відпрацьовані гази двигунів (чадний газ).

До рідких – вода та її розчини, а також хімічна і повітряно-механічна піна.

Тверді вогнегасні засоби – це природні сипучі матеріали (пісок, глина), а також спеціальні порошкові суміші. До твердих вогнегасних засобів можна віднести і снігоподібну вуглекислоту – заморожений до  $-78,5^{\circ}\text{C}$  діоксид вуглецю.

Класифікація вогнегасних засобів за механізмом припинення горіння є умовною, оскільки кожен з таких засобів певною мірою проявляє всі чотири ефекти – охолодження, розбавлення, ізоляції, хімічного інгібування. Однак при цьому домінуючим може бути лише один ефект завдяки якому створюються умови для досягнення абсолютної границі згасання, а всі інші сприяють цьому і в комплексі забезпечують більшу ефективність процесу ліквідації горіння.

### **Контрольні запитання**

1. Розкрити суть теорії умовного трикутника пожежі.
2. Що називають температурою горіння?
3. Що називають межами за теплотою згорання?
4. Назвіть граничні межі за швидкістю поширення полум'я.
5. Розкрити суть теплової теорії згасання полум'я.
6. Назвіть основні шляхи припинення процесу горіння.
7. Назвіть класифікацію вогнегасних засобів за механізмом припинення горіння.

## РОЗДІЛ 7. ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ ОХОЛОДЖЕННЯМ

### 7.1. Механізм припинення горіння охолоджувальними вогнегасними засобами

Найбільш поширеним охолоджуючим вогнегасним засобом є вода та водні розчини. Воду застосовують без добавок або з добавками, формуючи компактні, розпилені і тонкорозпилені струмені.

Припинення горіння водою обумовлюється її охолоджуючою дією, розбавленням горючого середовища парою при випаровуванні, ізоляцією горючого матеріалу від кисню повітря або механічним впливом на речовину, яка горить, тобто зривом полум'я. Практично всі чинники діють одночасно, але домінуючим в кожному конкретному випадку є один або два.

Так, наприклад, при подачі тонкорозпилених струменів води в полум'я гасіння відбувається завдяки охолодженню зони горіння. Також внаслідок випаровування об'єм води збільшується в 1700 разів, завдяки чому відбувається розбавлення компонентів горючої системи негорючою водяною парою. Однак, через нетривалість контакту води з зоною горіння водяної пари в полум'ї утворюється недостатньо, тому її роль в припиненні горіння не є домінуючою.

При подачі води на палаючу речовину компактними струменями припиняється горіння внаслідок охолодження або ізоляції речовин, які горять, а в разі гасіння газових фонтанів можливий також зрив полум'я механічною дією потужного водяного струменя шляхом відокремлення зони горіння, тобто джерела запалення, від горючої системи.

В якості ізолюючого засобу вода виступає при гасінні нерозчинної в ній рідини з відносною густиною більшою за одиницю, наприклад, сірковуглецю або твердих речовин, які можна залити водою, наприклад, в підвалах або трюмах. Наступний ефект гасіння ґрунтується на розбавленні розчинних у воді деяких горючих речовин і втрати ними здатності горіти (наприклад, спирт, ацетон, розчиняючись у воді, утворюють негорючі суміші).

Під час гасіння тліючих пожеж ефект флегматизації водяною парою також не є визначальним, оскільки в самій горючій речовині міститься достатня для горіння кількість кисню, тому домінуючим механізмом припинення гетерогенного горіння є охолодження зони горіння.

Умовою гасіння пожежі є забезпечення певної інтенсивності тепловідведення від зони горіння або від горючої речовини  $Q_{відв}$ , що

призводить до зниження їх температури до певного чисельного значення, при якому горіння повністю припиниться. Необхідне тепловідведення може бути забезпечене завдяки поглинанню тепла вогнегасним засобом для протікання ендотермічних процесів його нагрівання та фазового переходу  $Q_{\text{погл}}$ . Отже математичним виразом умови гасіння пожежі за допомогою охолоджуючого вогнегасного засобу є співвідношення:

$$Q_{\text{погл}} > Q_{\text{відв}}$$

Інтенсивність теплопоглинання буде визначати необхідну питому витрату води та інтенсивність її подачі, при цьому параметри пожежогасіння будуть залежати від виду горючої речовини, її агрегатного стану та режиму горіння.

## 7.2. Рідинні розприскані струмені

Оцінюючи вогнегасну ефективність води для певного виду пожежі потрібно брати до уваги велике значення має спосіб подачі її в осередок пожежі – суцільним або розпиленим струменем.

Суцільні струмені являють собою нерозривний потік води, що має велику швидкість і порівняно невеликий переріз. Ці струмені характеризуються певною ударною силою і великою дальністю польоту; при цьому значні об'єми води попадають на малу площу. Компактний струмінь, пройшовши крізь зону горіння, не чинить на неї майже ніякого впливу і сам не відчує значного впливу полум'я, оскільки має невелику площу поверхні контакту з полум'ям і малий час взаємодії.

Суцільними струменями гасять великі пожежі, коли потрібно подати воду на велику відстань або надати їй значної ударної сили. Наприклад, суцільні струмені використовують при гасінні пожеж великої площі, коли через значний тепловий вплив осередку горіння до нього неможливо близько доставити пристрій для подачі води, а також якщо необхідно з великої відстані охолоджувати сусідні з палаючим об'єктом будівельні конструкції, резервуари тощо. Ударну силу могутніх компактних струменів води використовують при гасінні великих розвинених пожеж штабелів деревини. При цьому, завдяки сильному натиску, вода попадає всередину штабеля, де також відбувається горіння матеріалу. При гасінні газових фонтанів суцільні струмені “підіймають” нижню кромку факела полум'я. Цей спосіб гасіння й охолодження є найбільш простим і поширеним. Одним із недоліків такого традиційного способу водяного пожежогасіння є нерівномірне зрошування зони пожежі, при цьому далеко не вся вода, тим бі-



льше ті порції, які стікають нижче за рівень зони пожежі, впливає на процес горіння. Так, із загальної кількості води, яка подається у вигляді компактних струменів, на гасіння використовується усього від 6 до 10% її об'єму, а в окремих випадках – не більше 1%.

Підвищити вогнегасну ефективність води можна шляхом її перетворення з поверхневого в об'ємно-поверхневий засіб гасіння пожеж. При цьому вода в зону пожежі подається у виді розпиленого струменя, тобто одночасно впливає на факел полум'я і горючу речовину, причому практично однаково ефективно як на горизонтальну, так і на вертикальну її поверхні.

Розпилені струмені – це потік води, який складається з дрібних крапель. Розпиленість струменів буває тонкої (розмір крапель становить  $(10 \div 100) \cdot 10^{-6}$  м), середньої  $(100 \div 1000) \cdot 10^{-6}$  м) та грубої дисперсності  $(1000 \div 6000) \cdot 10^{-6}$  м).

Розпилені струмені характеризуються незначною ударною силою та дальністю дії, але зрошують велику поверхню. При подачі води розпиленими струменями створюються найбільш сприятливі умови для її випаровування, при цьому відбувається підвищення охолоджувального ефекту та розбавлення горючого середовища негорючою парою.

Підвищення охолоджувального ефекту води обумовлене зростанням тепловідведення завдяки збільшенню порівняно з компактным струменем, сумарної поверхні краплин, по якій відбувається тепловіддача.

Крім того, тонкорозпилені струмені з краплями води діаметром приблизно  $50 \cdot 10^{-6}$  м мають здатність рівномірно змочувати поверхні будь-якої складної конфігурації, проникати в об'єми й порожнини, недоступні для звичайних струменів, ефективно охолоджувати реакційну зону факела полум'я й продукти горіння. Завдяки розвиненій поверхні, потік таких крапель добре поглинає (абсорбує) частки диму. Таким чином, краплини заповнюють весь об'єм приміщення, що горить, і захоплюються газовими потоками, перешкоджаючи поширенню пожежі у напрямках цих потоків.

Відомо, що при подачі води розпиленими струменями завдяки зменшенню діаметра краплини скорочується час випаровування, збільшується коефіцієнт теплопередачі і тим самим підвищується охолоджуючий ефект. Крім того, завдяки утворенню досить великої кількості пари відбувається додаткове розбавлення горючого середовища в полум'ї. Отже, зменшивши діаметр крапель у розпиленому струмені, можна істотно зменшити витрату води на гасіння пожежі.

Гасіння розпиленими струменями має ряд переваг:

1) абсолютна екологічна чистота вогнегасної речовини, відсутність озоноруйнуючого ефекту й токсичності;

2) відсутність шкідливого впливу на людей, що перебувають у приміщенні, яке захищається;

3) підвищена вогнегасна ефективність завдяки комбінованому впливу:

- охолодження зони горіння;
- розбавлення реагуючих компонентів у зоні горіння шляхом збільшення повноти випаровування крапель води й утворення значної кількості водяної пари;
- охолодження й змочування поверхні матеріалу, що горить;

4) скорочення витрати вогнегасного засобу, а отже, зменшення негативного впливу води на матеріали й обладнання, що захищається;

5) підвищення ефективності поглинання теплового випромінювання й адсорбційної здатності води при димоосажденні, що має першочергове значення для безпечної евакуації людей з приміщень.

Для підвищення ефективності гасіння потрібно було б максимально збільшувати питому поверхню розпиленого струменя шляхом усе більшого подрібнення крапель. Однак такий шлях виправданий лише в тому випадку, коли пристрій викиду вогнегасної речовини розташований безпосередньо в полум'ї.

Якщо краплини мають дуже малий діаметр, то сумарна поверхня їх контакту буде досить великою, однак маса крапель при цьому буде незначною. При гасінні ж ззовні дрібні частки швидко гальмуються в газовому середовищі і не долітають не тільки до поверхні, яка горить, але й не зможуть проникнути в глибину осередку горіння. Вони випаровуються у зовнішніх зонах факела полум'я або підіймаються інтенсивними конвекційними газовими потоками, практично не вплинувши на процес горіння. Отже, існує певна межа для розміру крапель, при якій забезпечується максимальне відведення тепла із зони реакції горіння.

Останнім часом застосовують гасіння пожеж водою аерозольного розпилення, отриманого внаслідок перегрівання води електричним нагрівачем або завдяки проходженню хімічних екзотермічних процесів до температури, що перевищує температуру кипіння за нормальних умов. Гасіння водою з підвищеною температурою більш ефектвне, оскільки гаряча вода, попадаючи в полум'я, відбирає тепло із зони горіння в 5-7 разів більше, ніж холодна. Це пояснюється тим, що із зростанням температури зростає частка води, що випарувалася з по-

верхні краплини. Нагріта вода легше переходить у пароподібний стан і при цьому забирає значну кількість тепла із зони горіння ( $H_{\text{вип}} = 2265$  кДж/кг), а холодній воді необхідний більший час для попереднього нагрівання й переходу в пару. При цьому краплини холодної води за час їх перебування в полум'ї можуть не встигнути повністю випаруватися й забрати максимальну можливу кількість тепла. При проведенні експериментів і гасінні реальних пожеж встановлено, що цей спосіб найбільш ефективний при пожежогасінні в обмежених об'ємах. Зафіксовано також швидке осадження диму, чого не відбувалося при використанні звичайних засобів пожежогасіння.

Очевидно, що застосування перегрітої води для цілей пожежогасіння потребує певних затрат енергії для нагрівання води, однак вони можуть бути істотно знижені завдяки використанню перегрітої технологічної води, що є в ряді сучасних виробництв (теплових електростанцій, об'єктів металургії, нафтохімії та інших).

Таким чином за допомогою зміни дисперсності вогнегасної речовини можна змінювати умови тепломасообміну між вогнегасною речовиною й полум'ям і, отже, шляхом збільшення загальної площі поверхні випаровування збільшувати вогнегасну ефективність речовини.

### 7.3. Підвищення вогнегасної ефективності води

При гасінні водою, в більшості випадків, не реалізуються її унікальні фізичні властивості внаслідок ряду причин. Найбільший ефект гасіння при подачі води спостерігається в тому випадку, коли її охолоджуючий ефект буде максимальним, тобто коли вся подана на гасіння пожежі вода випарується завдяки відведенню тепла від факела полум'я. При гасінні ж водою шляхом подачі її на поверхню горючих рідин або твердих горючих матеріалів максимальний охолоджуючий ефект буде спостерігатися при повному випаровуванні всієї поданої на гасіння води завдяки відібранню тепла від прогрітого поверхневого шару конденсованого горючого матеріалу.

Вогнегасна ефективність води залежить від ряду чинників, основними з яких є розмір крапель води й вплив хімічних добавок. Тому можна виділити два основних методи підвищення вогнегасної ефективності: 1) фізичний – зміна дисперсності й температури води, що подається на гасіння, і 2) хімічний – використання для цілей пожежогасіння водних розчинів різних хімічних сполук. Розглянемо ці методи більш докладно.

### 7.3.1. Вплив хімічних добавок на вогнегасну ефективність води

При гасінні рідин із високою температурою спалаху й твердих горючих матеріалів велику роль відіграє охолодження поверхневого шару горючого матеріалу за допомогою води. Збільшення часу контакту завдяки підвищенню адгезійних властивостей води і зменшення швидкості стікання (збільшення в'язкості) приводять до зростання кількості тепла, що відбирається від поверхні горіння. Цей же результат спостерігається при збільшенні площі контакту й коефіцієнта тепловіддачі, який, у свою чергу, пов'язаний з кутом змочування. Отже, ефективність гасіння можна підвищити, інтенсифікуючи теплообмін завдяки зміні в'язкості, поверхневого натягу й кута змочування вогнегасного засобу.

Змінити властивості води, наприклад, підвищити змочувальну здатність і в'язкість, знизити температуру замерзання і корозійну активність, і тим самим підвищити вогнегасну ефективність води можна шляхом введення різних хімічних добавок.

### 7.3.2. Підвищення вогнегасної ефективності води шляхом використання змочувачів

Істотним недоліком води є її порівняно низька змочувальна здатність і велика текучість, які обумовлені високим значенням коефіцієнта поверхневого натягу при відносно малій в'язкості. Ці властивості води зумовлюють той факт, що поверхня зіткнення крапель води з палаючою поверхнею невелика, і при гасінні вода з них швидко стікає.

Для зменшення поверхневого натягу води при гасінні пожеж горючих речовин, що погано змочуються водою, застосовуються водні розчини змочувачів, а саме поверхневоактивних речовин (ПАР). Завдяки цьому краплі води втрачають кулеподібну форму, легко розтікаються та проникають у капіляри й пори твердих горючих матеріалів, витісняючи з них повітря.

Властивості ПАР залежать від хімічної природи та будови молекул. ПАР умовно можна розділити на дві великі групи.

До першої групи відносяться речовини, які розчинні у воді, але не дисоціюють на іони, – неіоногенні ПАР. До неіоногенних речовин можна віднести поліоксисполуки, прості поліефіри, поліаміни. Як подібні змочувачі при пожежогасінні використовуються змочувач ДБ, емульгатор ОП-4, допоміжні речовини ОП-7 і ОП-10, що є продуктами приєднання 7÷10 молекул етиленоксиду до моно- і діалкілфенолів, алкільний радикал яких містить 8 ÷ 10 атомів вуглецю.

У другу групу входять речовини, молекули яких при розчиненні у воді дисоціюють на іони. Такі ПАР називають іоногенними. Залежно від заряду вуглеводневих іонів їх ділять на дві підгрупи:

- катіоноактивні, при дисоціації яких утворюється позитивно заряджений вуглеводневий іон і, як правило, невеликий неорганічний аніон, що зумовлює розчинність молекули у воді (солі високомолекулярних органічних азотовмісних сполук);

- аніоноактивні, при дисоціації яких утворюється негативно заряджений вуглеводневий іон і невеликий катіон, що зумовлює розчинність ПАР у воді (мила, органічні сульфати і сульфонати, відомі як “миючі засоби”).

Найбільш широко в пожежній охороні застосовуються аніоноактивні сполуки:

- алкілсульфати первинних і вторинних спиртів (отримують сульфатуванням жирних спиртів сірчаною кислотою з подальшою нейтралізацією лугом);

- алкіларилсульфонати (сульфоноли НП-1 і НП-3, які синтезують із бензолу й полімерів пропілену з подальшим сульфатуванням і нейтралізацією алкілбензолсульфокислот, змочувач дибутилнафталін сульфонат НБ);

- алкілсульфонати (утворюються сульфохлоруванням парафінових вуглеводнів);

- змочувач РАС (отримують з фракції гасу з температурою кипіння 160-310°C із подальшим сульфуванням сірчанам ангідридом).

Серед змочувачів можна виділити окремо групу плівкоутворюючих фторвмісних поверхневоактивних речовин, які використовують в основному для гасіння пожеж класу В. Вони знижують поверхневий натяг водного розчину до величини, меншої, ніж в органічного розчинника, забезпечуючи умову плавучості плівки, що утворюється на органічній рідині. Прикладом таких речовин можуть бути піноутворювачі фірми Minnesota Mining and Manufacturing Co (3M) під назвою “легка вода”, піноутворювачі, що випускаються в Російській Федерації, такі як Форетол і ПОФ-9М, піноутворювач “ППЛВ-(Універсал)”, який розроблений в Україні.

Розчинені у воді молекули ПАР адсорбуються на поверхні води і концентруються з утворенням мономолекулярного шару, при цьому розташовуючись на межі розділу фаз “вода-повітря” певним чином: частина молекули, яка відштовхується водою, розташовується над поверхнею води та утворює мономолекулярний шар; інша частина, притягнута водою, забезпечує зниження її поверхневого натягу. Концентрація ПАР

у поверхневому шарі значно більша, ніж в об'ємі. Парафінова частина молекули змочувача добре контактує з водонерозчинними органічними речовинами. Тому коли водний розчин потрапляє на поверхню важкозмочуваної речовини (наприклад, гуми, кам'яновугільного пилу, вуглецю), гідрофобна частина молекул змочувачів притягується до цієї поверхні. Гідрофільна частина змочувачів спрямована у воду, завдяки чому молекули змочувача стають ніби посередниками контакту між молекулами води та важкозмочуваної речовини.

Кількість змочувача в розчині повинна бути такою, щоб його молекули надійно забезпечували утворення мономолекулярного шару на поверхні води.

Як недолік потрібно зазначити, що введення добавок іоногенних ПАР викликає корозію пожежного обладнання.

### **7.3.3. Підвищення вогнегасної ефективності води шляхом використання загущувачів**

Крім великого поверхневого натягу, вода має незначну в'язкість, що негативно позначається на її вогнегасній здатності. При гасінні лісових пожеж, пожеж у приміщеннях (на вертикальних або горизонтальних поверхнях) вода легко стікає, не затримуючись на поверхні, яка горить, і швидко випаровується, внаслідок чого вогнегасний ефект води буває невисоким.

В'язкість розчинів є характеристикою сил когезії, тобто сил взаємодії макромолекул у рідині. При підвищенні в'язкості підвищуються і сили адгезії – сили взаємодії між двома фазами. Внаслідок зростання сил когезії і адгезії швидкість стікання вогнегасної рідини з об'єкта зменшується, що повинно призвести до збільшення часу контакту її з поверхнею горючої речовини і, отже, до підвищення вогнегасної здатності води.

Втрати води, пов'язані з розтіканням, можна зменшити підвищенням її в'язкості за допомогою введення згущуючих добавок. При розчиненні невеликої кількості полімерів в'язкість розчинів підвищується на 2-3 порядки, при цьому величина в'язкості залежить не тільки від природи полімеру, але й від його молекулярної маси. Встановлено, що підвищення динамічної в'язкості водного розчину до  $1,0 \div 1,5 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2$  скорочує час гасіння приблизно в 5 разів.

Найкращими добавками в якості загущувачів є альгінат натрію, натрій карбоксиметилцелюлоза (Na-КМЦ), поліакрилова кислота (ПАК), поліоксиетилен (поліокс), карбамідоформальдегідна смола

(КФС), метилцелюлоза, полісилікат натрію, поліакриламід (ПАА), полівінілпіролідон (ПВП) і полівініловий спирт (ПВС).

Вогнегасна здатність води при розчиненні загущувачів зростає, причому ефективність гасіння доходить до певного значення, а потім зменшується, – це свідчить про наявність оптимальної в'язкості для підвищення вогнегасної здатності води. Найбільшого вогнегасного ефекту можна досягнути збільшивши в'язкість всього лише до  $(2-3) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . Таке збільшення в'язкості сприяє прилипанню досить тонкого шару води до твердого матеріалу й утриманню цього шару на поверхні. Крім охолоджуючої дії (зниження температури поверхневого шару речовини, що горить), плівка “в'язкої” води чинить додаткову ізолюючу й екрануючу дію. Погіршення вогнегасної ефективності розчину при подальшому підвищенні в'язкості пов'язано з тим, що велика частина розчину залишається у верхніх шарах горючого завантаження, тоді як нижні шари продовжують горіти.

Підвищену вогнегасну ефективність мають розчини таких полімерних добавок, які не тільки згущують, але й здатні при підвищенні температури до гелеутворення або утворення на поверхні горючої речовини негорючого покриття, яке, у свою чергу, виконує ще й вогнезахисну функцію. При змішуванні з водою гелеутворюючі добавки набухають, поглинаючи при цьому значну кількість води, випаровування сповільнюється, в'язкість розчину зростає, що позитивним чином впливає на його вогнегасну здатність. Завдяки введенню подібних добавок, водний розчин добре прилипає до вертикальних поверхонь та утримується у вигляді плівки товщиною не менше за  $10^{-3} \text{ м}$ . Теплова енергія абсорбується водною плівкою, вода переходить у пару, яка виділяється через зовнішню поверхню плівки.

Через 0,5 с після контакту розчину з поверхнею, що горить, відбувається гелеутворення. Однак в'язкість розчину повинна бути такою, щоб забезпечити можливість його транспортування до осередку пожежі по трубопроводах і шлангах.

Вогнегасна ефективність розчинів гелеутворюючих добавок залежить від в'язкості, структури й міцності гелю, що утворюється, які у свою чергу визначаються властивостями гелеутворювача та його концентрацією, характером поверхні горючої речовини й розміром осередку горіння. В середньому застосування розчинів гелеутворюючих добавок підвищує вогнегасну ефективність води в 1,5-2 рази.

Найбільш широко для гасіння в якості гелеутворювачів використовуються полісилікат натрію, поліакриламід і метилцелюлоза.

Для підвищення вогнегасної ефективності до гелеутворюючих складів додають солі, наприклад, хлорид натрію, карбонат амонію, бікарбонат калію. Так товщина гелевого покриття, що утворюється на вертикальній поверхні при гасінні розчином полісилікату натрію та бікарбонату калію, може сягати  $2,5 \cdot 10^{-3}$  м залежно від температури горіння.

Як недолік такого гасіння можна відмітити погану здатність до розпилення вогнегасного засобу.

### **7.3.4. Добавки проти замерзання**

До недоліків води, що обмежують область і умови її застосування як вогнегасного засобу, відноситься порівняно висока температура замерзання. Для пониження температури замерзання застосовують спеціальні добавки – антифризи. Як добавки частіше за все використовуються неорганічні солі (поташ  $K_2CO_3$ , хлористий магній  $MgCl_2$ , хлористий кальцій  $CaCl_2$ ) або органічні речовини, наприклад, спирти, похідні гліцерину  $CH_2OHCH_2OH$ .

Зниження температури замерзання води залежить від кількості введеної речовини. Найнижчу температуру замерзання водно-гліцеринові розчини мають при вмісті 60% спирту. При вищому вмісті спирту температура замерзання знову підвищується.

При додаванні гліколів потрібно враховувати, що через їх горючість неможливо застосовувати розчини з концентрацією понад 30%.

Якщо розчинити 1 моль солі, що не дисоціює, в 1 кг води, температура замерзання води знизиться на  $1,86^\circ C$ . Для зниження температури замерзання на  $30^\circ C$  знадобиться  $30:1,86 = 16$  молів солі, що не дисоціює. Для солей, які дисоціюють (поташ, хлористий магній і т.д.) цей розрахунок непридатний. Необхідна кількість солі в цих випадках визначається емпірично.

Однак мінеральні солі підвищують корозійну здатність води, тому в ручних вогнегасниках хлористий магній і хлористий кальцій як морозостійкі добавки не використовують.

Таким чином, антифризи, що використовуються як добавки у воду проти замерзання, значення впливають великим чином на підвищення ефекту гасіння.



### Контрольні питання

1. Назвіть переваги та недоліки води, як вогнегасного засобу.
2. Горіння яких матеріалів забороняється гасити водою?
3. Назвіть переваги гасіння розпиленням струменем?
4. Розподіл низькомолекулярних добавок.
5. Класифікація ПАР.
6. Від чого залежить зниження температури замерзання води?
7. Характеристики емульсій, виготовлених ультразвуковим методом.

## РОЗДІЛ 8. ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ ІЗОЛЮВАЛЬНИМИ ВОГНЕГАСНИМИ ЗАСОБАМИ

### 8.1. Припинення горіння через ізолювання

Зниження інтенсивності тепловиділення в зоні горіння можна досягти завдяки зменшенню концентрації компонентів горючої суміші.

Одним із способів досягнення цього є повна або часткова ізоляція горючої речовини чи окисника від зони реакції. Для припинення горіння необхідно, щоб концентрація горючої речовини в зоні горіння знизилася нижче НКМПП.

Зменшення концентрації ГР в зоні горіння можна досягти шляхом:

- повної ізоляції поверхні ГР при утворенні твердої корки ізолюючого матеріалу;
- поглинання продуктів газифікації (випаровування чи розкладання) в пористому шарі ізолюючої вогнегасної речовини.

Види ізолюючих вогнегасних речовин:

- рідкі (піна, в деяких випадках вода);
- газоподібні (продукти вибуху при гасінні газонафтових фонтанів);
- тверді листові матеріали (листи або покривала з негорючих тканин);
- тверді сипучі матеріали (пісок, вогнегасні порошки спеціального призначення).

Вогнегасні порошки спеціального призначення застосовують для ізоляції осередків гетерогенного горіння (тління), а також при гасінні горючих металів та металоорганічних речовини.

Порошок плавиться і покриває поверхню горючої речовини плівкою розплаву, яка не пропускає (ізолює) горючу речовину в зоні горіння або у випадку гетерогенного горіння – окиснювач ізолює від зони горіння.

Вогнегасний порошок не повинен взаємодіяти з металом, тонути в розплавленому металі, давати просочуватися йому по капілярах між частками порошку на поверхню.

Піна – дисперсна система, яка складається із газоподібної дисперсної фази і рідкого дисперсійного середовища.

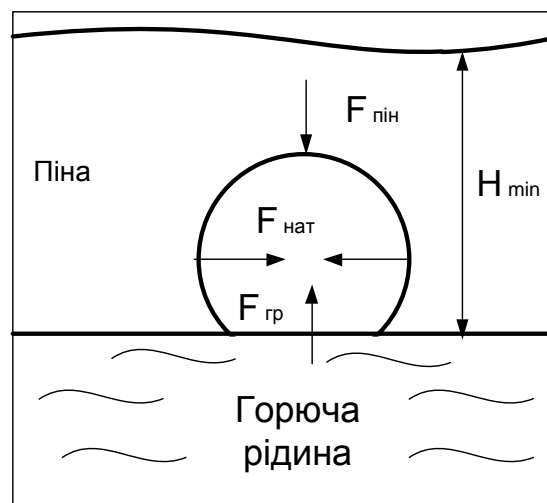
Бульбашки газу пов'язані між собою рідинними плівками в загальний каркас.

Вогнегасна здатність піни обумовлена її здатністю перешкоджати проходженню в зону полум'я горючої пари. Плівки рідини між бульбашками гальмують надходження пари в зону горіння (коефіцієнт дифузії пари через рідинні плівки значно менший, ніж в повітрі).

Бульбашка, наповнена парами горючої рідини, не спливе, якщо будуть дотримані умови:  $H_{\min} > d_b$ ;  $F_{\text{гр}} < F_{\text{нат}} + F_{\text{мін}}$ .

Мінімальна ізолююча товщина шару піни:

$$H_{\min} = \frac{P_{\text{нп.}} - \rho d_b / 3}{\rho + 4\sigma / d_b}$$



**Рисунок 8.1** – Мінімальна ізолююча товщина шару піни

Ізолююча здатність піни залежить від:

- структури піни (розміру бульбашки та товщини рідинної плівки);
- фізико-хімічних властивостей водного розчину;
- товщини шару піни;
- природи горючої рідини;
- температури горючої рідини.

Складні розчини, які містять крім ПАР стабілізатори і згущувачі, називають піноутворювачами (ПУ).

#### Класифікація піноутворювачів

Залежно від умов застосування:

- загального призначення (для гасіння пожеж класів А і В).
- спеціального призначення – піноутворювачі, придатні для гасіння пожеж класів А і В, тобто стійкі до дії спиртів і полярних рідин, або такі, що придатні до застосування з морською водою як розчинником.

Залежно від ступеня біологічного розкладання:

- біологічно м'які (ступінь розкладання мікроорганізмами перевищує 80%),
- біологічно жорсткі (ступінь розкладання менше 80%).

Залежно від початкової сировини:

- синтетичні (S);
- протеїнові (P) або білкові;
- плівкоутворюючі (AFFF);
- піноутворювачі, стійкі до дії спиртів і інших полярних рідин (AR).

Залежно від способу отримання вогнегасні піни поділяють на:

- хімічні;
- повітряно-механічні;
- піни, що швидко тверднуть;
- піни, що піняться під дією тепла.

## **8.2. Механізм припинення горіння піною**

Механізм припинення горіння за принципом ізоляції заснований на створенні ізолюючого шару між зоною горіння та горючим матеріалом. До вогнегасних засобів ізолюючої дії належать піна, вогнегасні порошки, негорючі сипучі речовини (пісок, земля, флюси, графіт) та листові матеріали (азбестові, брезентові покривала, щити та ін.).

Найбільш ефективним вогнегасним засобом ізолюючої дії є піна. Всі інші вважаються первинними та використовуються для гасіння незначних загорянь або у комплексі з основними засобами.

Найбільш надійним і широко застосовуваним засобом гасіння горючих рідин є повітряно-механічна піна, що утворюється з робочих розчинів піноутворювачів для гасіння пожеж у разі використання спеціального обладнання.

Піноутворювачі для гасіння пожеж залежно від їх хімічної природи, а також умов та способів застосування поділяються на дві групи: піноутворювачі загального призначення і піноутворювачі спеціального призначення. За здатністю розкладатись під дією мікрофлори водоймищ і ґрунтів піноутворювачі поділяються на біологічно "м'які" (біологічна здатність до розкладання 80 % і більше) і біологічно "жорсткі" (біологічна здатність до розкладання менше ніж 80 %).

Основою піноутворювачів є ПАР, які забезпечують можливість генерування піни і зниження поверхневого натягу водних розчинів, а також можуть забезпечувати здатність утворювати плівку на поверхні горючої рідини, що зменшує дифузію горючих парів з неї. У біль-

шості випадків в рецептурі піноутворювачів вводять добавки, які надають їм показників якості, регламентованих вимогами нормативних документів.

Піноутворювачі загального призначення виготовляються із синтетичних вуглеводневих ПАР та добавок, до їх складу, як правило, не входять фторвмісні речовини. Вони придатні для генерування піни низької, середньої та високої кратності з робочих розчинів, а також приготування змочувальних розчинів. Такі піноутворювачі призначені для гасіння пожеж класів А та В, тобто твердих горючих речовин і матеріалів (за винятком тих, які вступають у хімічну взаємодію з водою) та водонерозчинних горючих рідин.

#### Механізм припинення горіння пінами

Механізм гасіння піною залежить від агрегатного стану речовини (матеріалу), що горить, складу і властивостей піноутворювача, структури, кратності піни і способу її подавання.

Як відомо, полуменеве горіння відбувається у газовій фазі за наявності окисника (переважно, це кисень повітря). Тому для його придушення необхідно припинити надходження парів горючої речовини або окисника в зону горіння або розділити ці речовини просторово. Нанесення піни на поверхню рідини, що горить, знижує швидкість її випаровування завдяки створенню механічної перешкоди для дифузії та конвективного перенесення парів у зону горіння. Для забезпечення гасіння необхідно здійснювати безперервне подавання піни на поверхню рідини, що горить, оскільки піна руйнується під дією теплового потоку від полум'я та внаслідок контактної взаємодії з горючою речовиною.

У разі застосування пін середньої або низької кратності, що утворюються з розчинів піноутворювачів, які не містять добавок фторвмісних ПАР, гасіння горючих рідин відбувається наступним чином: на поверхні рідини, що горить, формується локальний шар піни. Швидкість його утворення залежить від інтенсивності подавання піни та швидкості її руйнування. В результаті руйнування піни виділяється водний розчин (відсік). Відсік охолоджує поверхню рідини, завдяки чому зменшуються швидкість її випаровування і концентрація горючих парів у зоні горіння, а отже сповільнюється процес горіння.

Шар піни також екранує поверхню горючої (легкозаймистої) рідини від теплового потоку полум'я, внаслідок чого значно зменшується інтенсивність прогрівання верхнього шару рідини. Зі збільшенням товщини шару піни знижується швидкість дифузії парів горючої (легкозаймистої) рідини у зону горіння і зменшується швидкість горіння. Крім того вода з відсіку частково випаровується і водяна пара

розбавляє пари горючої (легкозаймистої) рідини, а також охолоджує речовини в зоні горіння.

Наявність фторвмісних ПАР забезпечує зниження поверхневого натягу робочих розчинів піноутворювачів до (16–18) мН/м, тоді як наявність вуглеводневих ПАР звичайно дає змогу знизити поверхневий натяг лише до (30–35) мН/м. У разі застосування фторвмісних ПАР поверхневий натяг робочих розчинів піноутворювачів і міжфазовий натяг на поверхні розділу “робочий розчин піноутворювача водонерозчинна горюча (легкозаймиста) рідина” можна зменшити настільки, що значення коефіцієнта розтікання буде додатнім, і відсік набуває здатності “плавати” на поверхні горючої (легкозаймистої) рідини.

В результаті на поверхні рідини, що горить, утворюється плівка водного розчину, яка довільно розтікається по цій поверхні. Швидкість дифузії парів горючих (легкозаймистих) рідин крізь цю плівку значно нижча за швидкість їх дифузії крізь повітря, що міститься в бульбашках повітряно-механічної піни, яку отримують з водних розчинів вуглеводневих ПАР, а розчинність вуглеводнів у водному розчині дуже низька. Тому плівка, що формується на поверхні рідини, забезпечує надійне ізолювання парів горючої (легкозаймистої) рідини від зони горіння. Важливою особливістю такої плівки водного розчину є здатність до самовідновлення в разі механічного порушення її цілісності.

### 8.3. Класифікація піноутворювачів

Піноутворювачі для гасіння пожеж можна класифікувати згідно зі схемою, наведеною на таблиці 8.1. за ДСТУ 3789: 2015, де показано їх поділ на піноутворювачі загального та спеціального призначення. Піноутворювачі загального призначення – це здебільшого такі, основою яких є синтетичні аніоноактивні ПАР.

Рецептури піноутворювачів спеціального призначення розробляють з таким розрахунком, щоб надати їм заданих спеціальних властивостей, яких не мають піноутворювачі загального призначення (наприклад, підвищеної стійкості піни до зневоднювання, зниженої швидкості її руйнування під дією горючих рідин чи теплового випромінювання полум'я, підвищеної морозостійкості, придатності до застосування з морською водою, плівкоутворювальної здатності тощо).

Піноутворювачі спеціального призначення для гасіння пожеж здатні утворювати робочі і змочувальні розчини, придатні для гасіння пожеж класів пожеж А і В.

Плівкоутворювальні піноутворювачі (спеціального призначення) для гасіння пожеж виготовлені на основі фторвмісних та інших ПАР і здатні утворювати плівку з робочого розчину на поверхні горючих рідин, що характеризується здатністю до самовідновлення після механічного руйнування, а також зниженням швидкості дифузії парів горючої рідини.

Таблиця 8.1

**Класифікація піноутворювачів для гасіння пожеж**

Піноутворювачі для гасіння пожеж							
Піноутворювачі на основі синтетичної сировини				Піноутворювачі на основі матеріалів природного походження			
Не містять фторПАР		Не містять фторПАР (плівкоутворювальні)		Протеїнові		Фторпротеїнові	
для гасіння неполярних рідин	для гасіння неполярних і полярних рідин	для гасіння неполярних рідин	для гасіння неполярних і полярних рідин	для гасіння неполярних рідин	для гасіння неполярних і полярних рідин	для гасіння неполярних рідин	для гасіння неполярних і полярних рідин

Залежно від хімічної природи і переважної сфери застосування розрізняють різні типи піноутворювачів спеціального призначення для гасіння пожеж. Умовні позначення цих типів такі:

"Р" – протеїнові (білкові) піноутворювачі, тобто піноутворювачі на основі гідролізованих білків (протеїнів);

"ТР" – фторпротеїнові (фторбілкові) піноутворювачі, тобто піноутворювачі на основі гідролізованих білків (протеїнів) з добавками синтетичних фторвмісних ПАР;

"FFFP" – плівкоутворювальні фторпротеїнові (фторбілкові) піноутворювачі, тобто піноутворювачі на основі гідролізованих білків (протеїнів) з добавками синтетичних фторвмісних ПАР, які надають водним розчинам піноутворювачів плівкоутворювальних властивостей;

"А" – піноутворювачі на основі синтетичних вуглеводневих

ПАР;

"АFFF" або "А3F" – фторсинтетичні плівкоутворювальні піноутворювачі, тобто плівкоутворювальні піноутворювачі на основі синтетичних фторвмісних ПАР (до їх складу можуть входити також вуглеводневі ПАР).

Позначення "АК" або "АТС", що додається до позначення будь-якого типу піноутворювача (наприклад, "FFFP АК", "АК", "АFFF/АТС"), означає, що він придатний для гасіння як водонерозчинних, так і водорозчинних горючих рідин.

Для гасіння неполярних (водонерозчинних) горючих рідин (нафти, нафтопродуктів, нафтових розчинників, індивідуальних вуглеводнів) в більшості випадків найбільш ефективні плівкоутворювальні піноутворювачі ("ЛБЕЕ", "ТРБР"), що використовуються для генерування піни низької кратності.

Для гасіння полярних (переважно водорозчинних) горючих рідин, що здатні інтенсивно руйнувати піну (спирти, альдегіди, кетони, карбонові кислоти, окремі сумішеві органічні розчинники) повинні використовуватись "спиртостійкі" піноутворювачі.

Назви піноутворювачів зазвичай містять інформацію щодо рекомендованої концентрації їх робочих розчинів в об'ємних відсотках.

Розрізняють два способи подавання піни низької та середньої кратності на гасіння: "жорстке" подавання та "м'яке" подавання. "Жорстке" подавання піни передбачає її потрапляння безпосередньо на поверхню рідини чи матеріалу, що горить. "М'яке" подавання піни передбачає її плавне стікання на поверхню рідини чи матеріалу, що горить, з іншої поверхні. Піну високої кратності подають безпосередньо у захищений об'єм (приміщення).

Піна широко застосовується для гасіння легкозаймистих рідин, її вогнегасна дія полягає в тому, що покриваючи поверхню речовини, яка горить, вона обмежує доступ горючих газів та парів у зону горіння, ізолює речовину від зони горіння та охолоджує найбільш нагрітий верхній шар речовини. Для неперервного подавання піни при гасінні великих пожеж застосовуються спеціальні піноутворювальні апарати – стволи повітряно-пінні (СПП), піногенератори (ГПС). На практиці застосовують два види піни: хімічну (вогнегасники) та повітряно-механічну.

Хімічну піну отримують при взаємодії лужного та кислотного розчинів за наявності піноутворювача. Така піна складається із 80% вуглекислого газу, 19,7% води та 0,3% піноутворювальної речовини, її густина становить близько  $0,2 \text{ г/см}^3$ , кратність 5 (відношення об'єму



піни до об'єму розчину, з якого вона утворена), стійкість до 40 хвилин. У зв'язку з високою вартістю компонентів, складністю отримання та організації пожежогасіння застосування хімічної піни в теперішній час обмежується.

Повітряно-механічна піна утворюється при механічному змішуванні повітря, води та піноутворювача. Частки цих компонентів становлять відповідно 90%, 9,4–9,8% та 0,2–0,6%. Повітряно-механічна піна буває низької кратності (до 10), середньої (10–200) та високої (понад 200). Її стійкість залежить від піноутворювача й становить до 20 хвилин, але зі збільшенням кратності вона зменшується.

ПАР поділяються на йоногенні та нейоногенні. У свою чергу йоногенні ПАР поділяються на катіоноактивні, які здатні утворювати внаслідок дисоціації поверхневоактивні катіони, аніоноактивні, які здатні утворювати поверхневоактивні аніони, а також амфолітні, які можуть, залежно від умов, утворювати поверхневоактивні катіони або аніони. Нейоногенні ПАР під час розчинення не дисоціюють. У практиці пожежогасіння переважно застосовують аніоноактивні ПАР, для водних розчинів яких властива висока піноутворювальна здатність. Піна, що утворюється з водних розчинів аніоноактивних ПАР, у більшості випадків переважає за стійкістю піну, утворену з водних розчинів катіоноактивних та нейоногенних ПАР.

#### **8.4. Застосування пін для гасіння пожеж**

Піни низької кратності застосовують для гасіння пожеж твердих та рідких горючих речовин і матеріалів поверхневим способом (тобто шляхом подавання піни на поверхню, що горить). Піна низької кратності, що утворюється з робочих розчинів багатьох фторвмісних піноутворювачів, може використовуватись для гасіння пожеж подаванням знизу крізь шар горючої (легкозаймистої) рідини, що зберігається у резервуарі. Піни низької кратності отримують із застосуванням спеціальних стволів – генераторів піни низької кратності, принцип дії яких базується на ежекції повітря струменем розчину, який пропускають крізь ствол. Іноді за допомогою спеціальних пристроїв здійснюють співударяння струменів водних розчинів піноутворювачів, отримуючи в такий спосіб піноемulsion (піни з кратністю меншою ніж 3).

Приклад застосування піни низької кратності для гасіння рідких вуглеводнів показано на рис. 8.2.



**Рисунок 8.2** – Подавання піни низької кратності в модельне вогнище пожежі

Піни середньої кратності застосовують, головним чином, для гасіння пожеж твердих та рідких горючих речовин і матеріалів поверхневим способом, а в деяких випадках і для гасіння пожеж об'ємним способом. Піну середньої кратності отримують за допомогою ежекційних піногенераторів. Бульбашки піни утворюються під час потрапляння повітря та розчину, який розпилюється спеціальною форсункою, на сітку піногенератора (рис. 8.3).



**Рисунок 8.3** – Отримання піни середньої кратності за допомогою ежекційного піногенератора

Піни високої кратності отримують із застосуванням спеціальних піногенераторів подаванням піноутворювального розчину.



**Рисунок 8.4** – Отримання піни високої кратності

Піна, як дисперсна система, характеризується надлишком поверхневої енергії, тому є нестабільною і прагне набути мінімальної енергії, що відповідає повному її розкладу на рідину і газ. Під стійкістю піни розуміють її здатність до збереження своєї структури протягом певного проміжку часу. Показники стійкості піни визначають як проміжок часу, за який з піни витікає певна частина розчину, витраченого на її утворення (половина або чверть об'єму,  $1/2$  і  $1/4$  відповідно), або як проміжок часу, за який руйнується певна частина її об'єму (наприклад, половина).



**Рисунок 8.5** – Заповнення простору приміщення піною високої кратності

Зазвичай стійкіші піни характеризуються вищою вогнегасною ефективністю, тому намагаються так чи інакше збільшити стійкість піни, що застосовується для пожежогасіння.

**Контрольні запитання**

1. Які види ізолюючих вогнегасних речовин ви знаєте?
2. Пояснити механізм гасіння піною для гасіння пожеж?
3. Які класифікації піноутворювачів ви знаєте?
4. Які розрізняють різні типи піноутворювачів спеціального призначення?
5. Пояснити застосування піни низької кратності для гасіння пожеж?
6. Пояснити застосування піни середньої кратності для гасіння пожеж?

## РОЗДІЛ 9. ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ ФЛЕГМАТИЗУВАЛЬНИМИ ВОГНЕГАСНИМИ ЗАСОБАМИ

### 9.1. Механізм припинення горіння нейтральними газами

Механізм припинення горіння нейтральними газами, здебільшого, базується на законі діючих мас. Згідно з цим законом швидкість хімічної реакції залежить від концентрації реагуючих речовин. Чим менша ця концентрація, тим із меншою швидкістю протікає реакція, в тому числі реакція горіння.

Потрапляючи в зону реакції горіння гази-розчинники знижують концентрацію молекул горючого окисника в одиниці об'єму суміші  $\varphi_A$  і  $\varphi_B$  відповідно до зменшення кількості молекул. Зниження концентрації компонентів приводить до зниження швидкості реакції окиснення в зоні реакції горіння:

$$\omega_{XP} = \varphi_G^n \cdot \varphi_{ok}^m \cdot \exp\left(-\frac{E_{акт}}{RT_{кр}}\right)$$

де  $\varphi_{ок}; \varphi_{ze}$  – концентрація горючого і окисника;

$E_{акт}$  – енергія активації реакції;

$T$  – температура, К;

$R$  – універсальна газова стала.

Таким чином, підвищуючи чи знижуючи концентрацію одного із реагуючих компонентів – горючого або окисника, можна швидкість реакції знизити до рівня, коли виникнення горіння чи його розповсюдження стає недоступним. Так при зниженні адіабатної температури горіння органічних з'єднань до 1500 К (діюча температура 900-1000°C), завдяки зниженню концентрації горіння в газоповітряній суміші веде до припинення горіння. Ця суміш не самозаймається навіть від потужного джерела запалювання.

Зниження швидкості хімічної реакції веде, в свою чергу, до зниження швидкості тепловиділення і температури.

$$Q_{ТВ} = Q'_n \cdot V_{Г.С.} \cdot \omega_{XP}$$

де  $Q'_n$  – низька теплота згорання, кДж/кг;

$V_{Г.С.}$  – об'єм горючої системи, м<sup>3</sup>.

Поступове зменшення тепловиділення горючої системи призводить до певного моменту, коли створюється, як мінімум, дві точки

теплого балансу системи, та температури в зоні реакції горіння знижується до температури затухання.

Залежність температура горіння від концентрації реагуючих речовин може бути визначена з рівняння теплового балансу:

$$T = T_0 + \frac{\eta Q_H}{\sum_{i=1}^n V_{np} C_{p_{III}} + V_{\phi} C_{p_{\phi}}}$$

де  $T_0$  – початкова температура;

$Q_H$  – теплота хімічної реакції;

$\eta$  – коефіцієнт недопалу;

$C_{p_i}$  – теплоємність 1-го продукту згорання;

$V_{III_i}$  – об'єм в молях 1-го продукту згорання;

$C_{p_{\phi}}$  – теплоємність ... компонента;

$V_{\phi}$  – об'єм в молях (не вступаючих в реакцію) ... компонента.

Передумова самозаймання і вибуху у виробничому устаткуванні з горючими газами, пилом і горючою рідиною і об'ємне гасіння пожеж у приміщеннях і у виробничому устаткуванні основане на створенні всередині апаратів чи приміщенні, не підтримане горіння. Припинення процесів горіння у цьому випадку досягається відокремленням одного із елементів трикутника пожежі – окиснення.

Об'ємне гасіння являється одним з найбільш ефективних способів пожежного захисту, оскільки завдяки доступу до швидкого гасіння загально-об'ємним методом за допомогою апаратів з інертним газом запобігає вибухам в апаратах і приміщеннях при створенні пожежонебезпечних концентрацій речовин.

Припинення горіння шляхом введення в зону реакції негорючих речовин щоб запобігти створенню вибухонебезпечної концентрації компонентів можна віднести до методу розбавлення чи флегматизації.

## 9.2. Види флегматизувальних вогнегасних засобів та їх характеристика

В розрахунку вогнегасного складу при цьому методі застосовуються інертні компоненти – діоксид вуглецю, азот, аргон водяна пара. А також димові та вихлопні гази. При гасінні водорозчинних рідин – кетонів, спиртів та ефірів часто застосовується їх розчинення водою до негорючих концентрацій.

Метод флегматизації широко використовується для припинення самозаймання в закритих технологічних апаратах – реакторах. Так під

час приготування каталітичного комплексу при синтезі каучуку захист апаратів проводиться заповненням пароповітряного простору азотом.

В автоматичних системах пожежогасіння широко застосовується припинення горіння методом розчинення.

На практиці це має широке застосування для зниження пожежо-небезпечних речовин. Вводячи інертні гази, можна горючі суміші переводити в негорючий стан. При введенні в газоповітряну суміш інертних газів (флегматизаторів) – діоксиду вуглецю, азоту, пари води, гелію, аргону т. ін., область займання звужується – нижня границя зростає, а верхня знижується.

При певних кількостях флегматизаторів, що відповідають мінімальній флегматизаційній концентрації, верхня і нижня межа звужуються, створюючи точку флагметизації.

Мінімальна флегматизувальна концентрація флегматизатора – найменша концентрація флегматизатора в суміші з горючим і окисником, при якій вона нездатна до розповсюдження полум'я при будь-якому складі горючої суміші.

Підвищення концентрації інертного газу рівносильне зниженню концентрації кисню в горючій суміші, а дифузійне горіння більшості горючих речовин зупиняється при концентрації кисню в суміші, меншій за 14-16%. Якщо вогнегасний ефект газів-розчинників звести до механічного застосування закону Арреніуса, то отримаємо, що вогнегасна концентрація не залежить від властивостей інертних газів, однак з практики відомо, що ефективність застосування азоту нижча, ніж у аргону, а у аргону нижча, ніж у діоксиду вуглецю чи водяної пари.

Крім розглянутого механізму припинення горіння, нейтральні гази відзначаються іншою вогнегасною дією, а саме: потрапивши в зону горіння, нейтральні гази нагріваються, забираючи на себе частину виділеної енергії. Кількість енергії, витраченої на нагрівання нейтральних газів, можна визначити як:

$$Q_{н.ф.} = V_{фi} \cdot \rho_{ф} \cdot C_{рф} (t_{Гор} - t_0)$$
$$Q_{н.р.} = m_{ф} \cdot C_{рф} (t_{Гор} - t_0)$$

де  $\rho_{ф}$  – густина газу, кг/м<sup>3</sup>;

$C_{рф}$  – теплоємність газу, кДж/кг К;

$t_0$ ;  $t_{Гор}$  – початкова і кінцева температура газу, К;

$V_{фz}$  – об'єм газу, м<sup>3</sup>.

Звідси можна зробити висновок, що чим вища теплоємність газу, тим вища вогнегасна здатність флегматизатора.

Знижуючи концентрації реагуючих речовин, такі засоби зменшують швидкість реакції горіння і, тим самим, швидкість виділення теплоти. Коли остання стає меншою ніж швидкість тепловідводу, горіння припиняється. Тому чітко потрібно розуміти, що флегматизація базується на зменшенні тепловиділення завдяки розбавленню горючої суміші. При об'ємному гасінні пожеж в огороженні одним із оптимальних методів є застосування вогнегасних засобів, які флегматизують суміш, зменшують концентрацію горючих речовин і окиснювачів і знижують швидкість реакції горіння до такої, коли швидкість тепловиділення стає нижчою від швидкості тепловідведення. Як найдешевший і найзручніший із таких вогнегасних засобів, у більшості випадків використовують вуглекислий газ. У деяких випадках, за неможливості використання вуглекислого газу, і там, де є відповідні умови, застосовують азот, а в окремих випадках – і дорогий аргон. Основна їх перевага – відсутність шкоди, яку вони завдають об'єктам, пожежу на яких треба припинити.

Інертні та негорючі гази, головним чином, вуглекислий газ та азот, знижують концентрацію кисню в осередку пожежі та гальмують інтенсивність горіння. Вогнегасна концентрація цих газів при гасінні пожежі в закритому приміщенні становить 30–35% від об'єму приміщення. Інертні та негорючі гази застосовуються, як правило, для гасіння легкозаймистих та горючих рідин, твердих речовин та матеріалів, устаткування під напругою, а також у випадках, коли застосування води чи піни не дає дієвого ефекту чи воно є небажаним з огляду на значні збитки (в музеях, картинних галереях, архівах, приміщеннях з комп'ютерною технікою тощо).

Найбільший ефект досягається при гасінні інертними та негорючими газами пожеж у замкнутих об'ємах, однак при цьому необхідно враховувати можливість токсичної дії на людей вуглекислого газу.

Механізм припинення горіння нейтральними газами, здебільшого, базується на законі діючих мас. Як стверджує цей закон швидкість хімічної реакції, залежить від концентрацій реагуючих речовин. Чим менша ця концентрація, тим із меншою швидкістю йде реакція. Не становить винятку і реакція горіння. Чим менша концентрація горючої речовини і кисню, тим менша вірогідність виникнення горіння. А якщо горіння вже почалося, то зниження концентрації будь-якого з компонентів знижує швидкість поширення полум'я. Зниження концентрації горючої речовини до значення, нижчого за НКМПП, або концентрації кисню – до значення, нижчого кисневого індексу, зменшує швидкість поширення полум'я до 0, тобто припиняє горіння. Горіння бі-



льшості речовин у повітрі припиняється при зниженні концентрації кисню до значення, меншого за 12-15% (об.); хоча існують речовини, які горять і при меншому вмісті у суміші кисню (5% і менше), наприклад, водень, ацетилен, лужні метали, гідриди металів і деякі металоорганічні сполуки.

Знижує швидкість поширення полум'я нейтральними газами (флегматизацію горючої суміші) і охолодження цими газами. На те, щоб нагріти інертний газ від початкової температури (близько 25 °С) до температури у зоні горіння, треба витратити тепло, кількість якого пропорційна кількості нейтрального газу, теплоємності цього газу і різниці вказаних температур. Але, у цьому випадку, більше значення має ефект розбавлення реагуючих речовин, ефект зниження концентрацій реагуючих речовин.

Найважливішим показником при застосуванні флегматизувальних вогнегасних засобів є вогнегасна концентрація, тобто об'ємна частка у повітрі вогнегасного засобу, яка припиняє горіння. Крім того, важливими є такі показники, як токсичність і хімічна активність, зокрема корозійна здатність, а також, із огляду на охолоджуючу дію, теплоємність та теплопровідність.

Найбільш поширеними речовинами, які флегматизують суміш, є вуглекислий газ (карбон діоксид), азот, водяна пара і тонкорозпилена вода. Дуже рідко, у спеціальних закладах, там, де неможливе використання жодного із згаданих флегматизаторів, використовують аргон. Аргоном можна гасити горіння будь-яких речовин, але цей газ дорогий і не дуже доступний.

### 9.2.1. Флегматизувальна дія вуглекислого газу

Карбон діоксид (CO<sub>2</sub>) – безбарвний газ, який при надлишковому тиску зріджується. Температура кипіння карбон діоксиду 78,5 °С, але із збільшенням тиску, як і у всіх інших випадках, ця температура росте. У заповнених балонах із цим газом для кожного 1 кг карбон діоксиду, передбачено приблизно 1,4 л об'єму. При цьому тиск суміші рідкої і газоподібної речовини у балоні становить:

- при 0°С – 3545 кПа (35 атм.);
- при 20°С – 6080 кПа (60атм.);
- при 40°С – 14200 кПа (140атм.).

Діоксид вуглецю у твердому (снігоподібному) стані. Під час нагрівання тверда вуглекислота переходить у газоподібний стан, минаючи рідку фазу, що дає змогу застосовувати її для гасіння таких ма-

теріалів, що псуються внаслідок змочування.

Основною вогнегасною властивістю твердої вуглекислоти є те, що, знаходячись на поверхні матеріалу, що горить, вона швидко сприймає тепло та переходить у газоподібний стан. Теплота випаровування твердої вуглекислоти за температури мінус 78,5°C менше, ніж води (572,75 Дж/кг). Однак через велику різницю між температурою вуглекислоти та нагрітою поверхнею швидкість охолодження значно вища, ніж під час використання води.

Діоксид вуглецю не проводить струму, що дає змогу використовувати його для гасіння пожеж в приміщеннях з електрообладнанням під напругою, двигунів внутрішнього згорання, архівів, музеїв та ін. Не використовується діоксид вуглецю для гасіння магнію та його сплавів, металевого калію та натрію оскільки відбувається розкладання вуглекислого газу з виділенням атомарного кисню, який посилює горіння.

Діоксид вуглецю у стані аерозолу утворюється під час викиду з ізотермічної ємкості із температурою мінус 79°C.

Під час нагрівання до температури 293 К (20°C) 1 кг аерозолу може поглинути 389,37 кДж теплоти, що еквівалентно охолодженню 5 кг повітря від 100 до 20°C.

Аерозольний діоксид вуглецю легко проникає в дрібні пори та глибокі тріщини. Він може ефективно використовуватись під час гасіння горючих матеріалів (деревини, тканини, бавовни, паперу), полярних рідин (спиртів, ефірів), пожеж у кабельних тунелях, підвальних приміщеннях, електростанціях, музеях, картинних галереях, книгосховищах, магазинах, складах та ін.

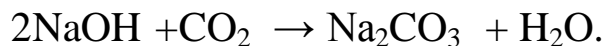
При швидкому збільшенні об'єму частина рідкого вуглекислого газу, випаровується, забираючи від решти рідини значну кількість тепла. Це викликає застигання рідини, із утворенням снігоподібного твердого карбон діоксиду, який має помітний, так би мовити "запас холоду". З цієї причини, деякі автори відносять вуглекислий газ до охолоджуючих засобів гасіння. Забираючи тепло від навколишнього середовища, такий сніг сублімується, тобто безпосередньо з твердого стану переходить у газоподібний, без проміжного переходу у рідину. Однак, швидкість такої сублімації дуже мала і ефектом охолодження у цьому випадку нехтують. Газоподібного карбон діоксиду виділяється багато: з 1 кг твердої речовини за нормальних умов – близько 510 л газу, а при температурі горіння – понад 2000 л, так що, домінуючим як при гасінні газоподібним, так і при гасінні снігоподібним карбон діоксидом є ефект розбавлення. Також має ефект охолодження. Теплоєм-

ність цього газу 0,84 кДж/кг·град. Отже, щоб нагріти 1 кг його з температури 50-60 °С до температури 800-1000 °С треба витратити близько 800 кДж тепла.

Крім всього іншого, вуглекислий газ мабуть, спричиняє і інгібування процесів горіння. Останнє може проходити завдяки вловлюванню вільних радикалів з утворенням менш активних частинок.

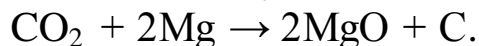
Для припинення вуглекислим газом горіння у повітрі водню або аерозолю бавовни, об'ємну концентрацію кисню треба знизити до 6-7%, тобто вогнегасна об'ємна концентрація карбон діоксиду у цьому випадку має становити 60-70%. Великих кількостей цього флегматизатора, потребує також припинення горіння ацетилену – 55-65%-вої об'ємної концентрації CO<sub>2</sub>. Для більшості ж інших речовин достатнім є його 20-40%-вий вміст у повітрі. Так, горіння метану і бутану припиняється при 25-30%-вій об'ємній концентрації в атмосфері вуглекислого газу (16%-вий залишковій об'ємній концентрації кисню), горіння пропілену – при 32-35%-вому вмісті CO<sub>2</sub>, горіння деревини – при 23-27%-вому, а бензини – при 19-20%-вому.

Із хімічної точки зору, карбон діоксид – сполука малоактивна. Він реагує з невеликою кількістю речовин. За нормальних умов, із малою швидкістю він може взаємодіяти з лугами і їх розчинами:

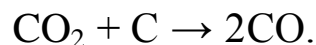


Але при температурах горіння реагує з сильними відновниками.

Так, розпечені метали окиснюються вуглекислим газом до оксидів, з виділенням сажі:



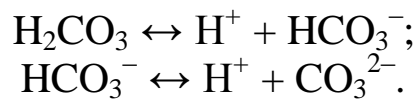
Розпечений кокс окиснюється до чадного газу:



Вуглекислий газ широко застосовується у побуті (сухий лід, газовані напої, вина типу шампанського і т.ін.). Невеликий вміст у повітрі і в напоях не примушують замислюватися над шкідливістю цієї речовини. Між тим, вона – не зовсім безпечна. Крім того, що цей газ не підтримує дихання, він має помітні токсичні властивості. Чутливість окремих осіб до вмісту вуглекислого газу у повітрі різна, але вже при об'ємній його концентрації близько 2%, у більшості людей спостерігається подразнення слизових оболонок дихальних шляхів і очей. Подальше збільшення концентрації веде до почервоніння шкіри і, навіть, до її опіків, а 4% і більше викликають, головний біль, шум у вухах і підсилене серцебиття. Концентрація у 6% є граничною. Якщо людина потрапляє в атмосферу з таким вмістом вуглекислого газу зненацька, це може

призвести до летального наслідку. Якщо ж така концентрація набирається поступово, організм встигає включити захисні механізми; рухи уповільнюються, людина дуже швидко стомлюється, але принаймні 40-60 хвилин перебувати у такій атмосфері можна. При 10-20% -ному вмісті у повітрі вуглекислого газу, перебування без протигазу викликає швидку смерть. Протигаз теж не дає повного захисту. По-перше, у такій атмосфері поглинач фільтруючих протигазів дуже швидко насичується. А по-друге, обличчя протигаз захищає, а інші ділянки шкіри отримують досить відчутні "кислотні" опіки.

Корозійна активність. Розчин карбон діоксиду у воді являє, собою слабку карбонатну кислоту, яка дисоціює за рівняннями:



На вироби з міді, латуні, золота і інших дорогоцінних металів така кислота не діє. Активні ж метали (чисте залізо, цинк), а також лужні в'язучі (бетон, цемент, вапняний розчин) досить помітно кородують або руйнуються. Хоча, слід зауважити, що в умовах пожежі вуглекислий газ швидко вивітрюється і, при охолодженні, коли водяна пара сконденсується, цього газу вже не буде.

До переваг вуглекислого газу, як вогнегасячого засобу відносяться:

- невелика порівняно з азотом та аргоном вартість;
- практично непомітна електропровідність, що дає змогу використовувати вуглекислий газ для гасіння пожеж електроустановки, яке знаходиться під напругою;
- невисока хімічна активність, яка дає змогу застосовувати його майже скрізь, крім випадків гасіння за наявності лужних і лужноземельних металів, розпечених інших металів, розпеченого вугілля;
- практично повна відсутність шкоди, яку ця сполука може заподіяти майну, будівлям і т.ін.;
- швидке і безслідне видалення з місця застосування після припинення горіння.

Недоліки:

- не ефективний при гасінні тліючих речовин;
- потребує зберігання під значним тиском, у товстостінних посудинах, що призводить до не вигідного співвідношення маси вогнегасного засобу до маси тари при зберіганні або транспортуванні;

- має помітну токсичну активність;
- розчини карбон діоксиду у воді – карбонатна кислота – мають деяку активність, яка викликає корозію чорних металів і цинку та роз'їдає лужні солі, вапняки, цемент, бетон; кольорові метали дії карбонатної кислоти не піддаються.

### 9.2.2. Флегматизувальна дія азоту

Азот за ефективністю дії переважає вуглекислий газ. Молекулярна маса його менша (28 атомних одиниць маси, проти 44 атомних одиниць маси) і, значить, 1 кг азоту дає по об'єму більшу кількість газу (за нормальних умов 800 л проти 510 л для вуглекислого газу). Теплоємність теж більша (0,995 кДж/кг.град.). Але і теплопровідність азоту теж більша, крім того, інгібуючих властивостей азот зовсім не має. Тому, при гасінні пожеж азоту треба подавати більше, ніж вуглекислого газу. Для припинення азотом горіння суміші повітря з воднем або аерозолем бавовни об'ємну концентрацію кисню треба знизити до 4-5%, тобто вміст азоту у повітрі треба доводити до 95-96 % об'ємних; при горінні ацетилену – до 90-95%; при горінні метану і бутану – 85-88% (зниження концентрації кисню до 13%); пропілену – 88-90%; деревини – 85-87% (зниження концентрації кисню у повітрі до 12,6%); бензину – 84-87%.

Застосовувати азот можна при гасінні, практично, будь-яких пожеж: його хімічна активність – ще нижча, ніж хімічна активність вуглекислого газу. Єдине, з чим азот може реагувати – це розпечені легкі метали (лужні, лужноземельні, алюміній і ін.), з якими він може утворювати вибухонебезпечні нітриди:  $\text{Na}_3\text{N}$ ,  $\text{Mg}_3\text{N}$ ,  $\text{AlN}$ . Коли горять такі метали, для гасіння використовують аргон.

Як і вуглекислий газ, дихання азот не підтримує. При розведенні повітря азотом, летальні випадки спостерігаються при зниженні вмісту кисню до 14-16% (об.). Але значної токсичної небезпеки він не становить. Розбавлення азотом продуктів горіння навіть знижує токсичність середовища завдяки зниженню концентрації токсичних оксидів карбону. Особливо чадного газу. Корозійних властивостей азот не має.

Переваги його, як вогнегасного засобу: хімічна інертність, абсолютна неелектропровідність, відсутність токсичної дії.

Недолік – вища, порівняно з вуглекислим газом, вартість. Крім того, при однаковому тиску в ємностях однакового об'єму, вуглекислого газу, зберігається більше ніж азоту. У стандартний балон на 40 літрів при тиску 150-200 атм. вміщається  $(150-200) \times 40 = 6000-8000$  л,

або 6-8 м<sup>3</sup> стисненого газоподібного азоту. У такому ж балоні при нормальному коефіцієнті заповнення (1,34 л/кг) міститься  $40/1,34 = 30$  кг, що за нормальних умов дасть до 15 м<sup>3</sup> вуглекислого газу. Треба відмітити, що в останні роки, завдяки роботам українських дослідників із розділення повітря мембранним способом, вартість азоту суттєво знижується. Крім того, розроблено комплексні установки, які дають змогу отримувати азот в умовах окремої пожежної частини.

### 9.2.3. Флегматизувальна дія водяної пари

Водяна пара. При гасінні пожеж водяною парою у більшості випадків, припинення горіння досягається вже при 35%-вій її концентрації у повітрі. В установках гасіння, використовують насичену або відпрацьовану водяну пару. Ефективність застосування цього флегматизатора пояснюється низькою молекулярною масою води, в результаті чого 1 кг її за нормальних умов дає до 1250 л пари. Насичена і відпрацьована пара має температуру близько 100 °С, у зоні горіння температура близька до 1000 °С, тож водяна пара, маючи теплоємність 2,52 кДж/кг град, ще й охолоджує зону горіння.

Приблизно у тих же випадках, що і водяну пару, використовують тонкорозпилену (дрібнодисперговану) воду. У зоні горіння вона миттєво випаровується і перетворюється у пару, яка і розбавляє горючий газ або повітря.

Крім ізолюючої та охолоджуючої дії, можливо має значення і інгібування водяною парою завдяки дезактивації активних частинок.

## 9.3. Механізм припинення горіння за допомогою інертних газів.

### Показник вогнегасної ефективності інертних газів.

Розглянемо механізм зниження швидкості реакції горіння при постійній концентрації компонентів горючої суміші горючої речовини і окисника – const в зоні горіння шляхом введення розріджуючих негорючих (інертних) газів. До інертних газів, як сказано вище відносяться азот, аргон, карбон діоксин, водяна пара. Коли інертний газ потрапляє в зону горіння, тоді буде знижуватися концентрація горючої речовини і окисника в одиниці об'єму що відповідно зменшить число співударів між їх молекулами. Кількісну залежність швидкості реакції від концентрації реагуючих речовин визначає закон діючих мас: при постійній температурі швидкість хімічної реакції прямо пропорційна добутку концентрацій речовин, що реагують взятих в степенях, що відповідають їх стехіометричним коефіцієнтам. Отже

швидкість реакції горіння буде знижуватися. Зниження швидкості реакції горіння веде до зниження швидкості тепловиділення та температури. Температура зони горіння може знизитись до початкової  $T_{п.}$ . Відомо, що дифузійне горіння припиняється при концентрації кисню приблизно близько 14%. Але, якби механізм припинення горіння всіх інертних газів зводився лише до простого розрідження, тоді кількість будь-якого флегматизатора, яка необхідна для гасіння дифузійного полум'я була б однаковою незалежно від виду інертного газу. Із фізики горіння та із практики пожежогасіння відомо, що вогнегасна концентрація інертного газу залежить не тільки від виду розріджувача, а й від горючого, умов його подачі і від багатьох інших факторів. Окрім розглянутого вище механізму припинення горіння шляхом простого розрідження, інертні гази по-різному взаємодіють на зону реакції горіння залежно від їх фізичних властивостей. При надходженні в зону реакції з температурою навколишнього середовища 20-30<sup>0</sup>С, вони прогріваються до температури приблизно 1000<sup>0</sup>С, забираючи деяку кількість тепла. Тому чим вища теплоємність інертного газу, тим ефективніша його вогнегасна дія. Деякі інертні гази, окрім зниження інтенсивності тепловиділення і підвищення тепловідведення із зони реакції, збільшують інтенсивність тепловідведення завдяки різкому підвищенню коефіцієнта теплопровідності газової  $\lambda_{г}^{п} \gg \lambda_{г}$ . За таким механізмом припинення горіння діє, наприклад, гелій ( $\lambda_{He} = 6\lambda_{N_2}$ ). А оскільки при цьому інтенсифікується і тепловідведення у свіжу горючу суміш, то від введення таких нейтральних газів швидкість поширення буде підвищуватися. Але механізм припинення горіння інертними (нейтральними) газами більш складний. Він залежить як від ступеня розрідження, так від параметра  $c_p/\lambda$ , де  $c_p$  – питома теплоємність газу;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності газу.

Чим більша теплоємність інертного газу при одній і тій же теплопровідності, тим вища ефективність його дії, тобто при меншій концентрації припиняється горіння. Наприклад, коефіцієнти теплопровідності аргону і діоксид карбону дуже близькі: для Ar величина  $\lambda = 0,045 \cdot 10^{-3}$  Вт/(см·К); для CO<sub>2</sub>  $\lambda = 0,038 \cdot 10^{-3}$  Вт/(см·К); теплоємність CO<sub>2</sub> майже у два рази більша, ніж у аргону [для Ar  $c_p = 0,53$  кДж/ (кг·К); для CO<sub>2</sub>  $c_p = 0,908$  кДж/ (кг·К)]. Отже дія діоксиду карбону ефективніша дії аргону приблизно удвічі. Підвищення теплопровідності суміші газів після введення розріджувача не підвищує ефективності нейтрального газу, а знижує його. Це пояснюється тим, що при введенні негорючого газу посилюється суттєво інтенсифікація тепловідведення у свіжу горючу суміш.

Інтенсифікація теплопередачі в свіжу горючу суміш, яка поступає у зону горіння, прискорює процес горіння. Тому коефіцієнт  $\lambda$  знаходиться у знаменнику дробового числа, яке визначає вогнегасну ефективність нейтральних (інертних) газів.

#### **9.4. Ефективність і вибір флегматизатора залежно від типу горючого матеріалу та умов пожежі**

Вогнегасні засоби, які флегматизують суміш, застосовуються при об'ємному гасінні, тобто тільки при ліквідації пожеж в огороженні: на складах ЛЗР, у приміщеннях, в окремомих відсіках, в трюмах, в реакторах і т.ін.

Найбільш звичайним вогнегасним засобом, флегматизатором є вуглекислий газ. Для подачі цього газу розроблено ручні вогнегасники (ОУ-2, ОУ-5, ОУ-8 і ін.); установки, що перевозяться (УП-2М), а також стаціонарні установки.

При гасінні газами до деякої міри умовно розрізняють власне об'ємне гасіння і гасіння місцеве. Останнє – це теж об'ємне гасіння, але таке, яке відбувається в окремому апараті порівняно невеликої ємності. Так от, для місцевого гасіння сконструйовано установки, які дають змогу подавати не тільки вуглекислий газ, як такий, а і суспензію у цьому газі снігоподібного твердого карбон діоксиду. Останній має температуру, близьку до  $-78^{\circ}\text{C}$ , що дає змогу підсилювати флегматизуючу дію засобу його охолоджуючою дією і скорочувати час гасіння.

Вуглекислий газ не можна застосовувати для припинення горіння лужних і лужноземельних металів, гідридів металів, металоорганічних сполук, розпеченого коксу і інших розпечених або тліючих речовин.

І, зрозуміло, треба дотримуватися правил особистої безпеки, берегтися від того, щоб вдихати повітря з великим вмістом вуглекислого газу, від контакту сумішей, що мають великий вміст цього газу, зі шкірою, а особливо із слизовими оболонками.

Азот дорожчий ніж вуглекислий газ, тому у загальному випадку його застосовують там, де не можна застосовувати карбон діоксид, наприклад, при гасінні розпечених органічних речовин, таких як кокс, ебоніт і подібні.

На більшості хімічних підприємств, азот використовується для профілактики пожеж як "азотне дихання" або, як "азотні продувки" при пусково-налагоджувальних роботах і перевантаженні технологічних апаратів, тому використання його додаткових ускладнень не викликає. В інших випадках азот зберігають у стисненому вигляді у ба-



лонах або у рідкому стані, в термоізолюваних посудинах, хоча з таких посудин він поступово випаровується.

Дихання цей газ не підтримує. Отже, перебувати в атмосфері чистого азоту без ізолюючого протигазу людина не може. При першому ж повноцінному вдиху різко знижується концентрація кисню у легенях і людина втрачає свідомість.

Водяна пара – не дуже зручний вогнегасний засіб. Застосовують її там, де пара – звичайна технологічна речовина і де є відповідні паропроводи, або принаймні від паропроводів легко відвести пару для гасіння.

При виборі газів-розчинників необхідно враховувати не тільки їх ефективність, але й інші вимоги, що ставляться до вогнегасних засобів. Двоокис вуглецю не можна використовувати для гасіння горючих металів, так як вони можуть горіти в його атмосфері. Також для такого гасіння не бажано застосовувати азот, оскільки при взаємодії з металами, наприклад з магнієм, алюмінієм, літієм та іншими, можуть утворюватися їх нітриди – речовини здатні розкладатися з вибухом.

При проектуванні установок пожежогасіння і безпосередньо при гасінні методом флегматизації, гази-розчинники можуть подаватися в зону реакції горіння різними способами. З залежно від поставлених цілей можна виділити три способи подачі газів:

1. В повітряну зону – застосовується для здійснення вибуху і припинення горіння в закритих технологічних апаратах і закритих приміщеннях.

2. В зону горіння – застосовується для гасіння речовин і матеріалів, горючих у відкритому об'ємі, таких як рідини, що розтікаються, газових і нафтових фонтанів.

3. В горючу рідину – для зниження інтенсивності горіння та температури при підготовці гасіння іншим методом чи для займання речовин.

Концентрація горючого і інертного газу в точці флегматизації може бути розрахована з такими припущеннями:

- адіабатна температура горіння дорівнює 1500 К;
- відношення горіння і окисника – стехіометричне.

Тоді запишемо рівняння:

$$V_{\phi} = \frac{Q_n - (T_{\text{ГОР}} - T_o) \cdot \sum C_{\text{РПГ}} \cdot V_{\text{ПГ}}}{(T_{\text{ГОР}} - T_o) \cdot C_{\text{РФ}}}$$

Як бачимо, у цьому надлишковим компонентом є флегматизатор.

Знаючи склад компонентної суміші (горюче – окисник, азот, повітря – 3,84 ) флегматизатор – можна оцінити їх концентрації:

$$\varphi_{\phi} = \frac{100}{V_{\Gamma} + V_{\phi} + 4,84 \cdot V_{O_2}}$$

Числові значення  $V_{\Gamma}$  і  $V_0$  – встановлюються з рівняння хімічної реакції горіння.

Для встановлення ефективності флегматизаторів визначають їх вогнегасну концентрацію, тобто об'ємну частку вогнегасного засобу в повітрі, за якої припиняється горіння. Крім того, важливими є такі показники, як токсичність, хімічна активність, а з огляду на охолоджуючу дію флегматизаторів – і теплоємність та теплопровідність.

Мінімальну флегматизуючу концентрацію вогнегасного засобу визначають за формулою:

$$\varphi_{\phi} = 100 \frac{h'_{\phi} \Delta H_f^{\circ} + h'_{\phi} + \sum_{j=1}^l h'_j m_j}{h''_{\phi} - 1 + \sum_{j=1}^l h''_j m_j},$$

де  $h'_f$  – коефіцієнт теплоти утворення суміші горючих компонентів в газоподібному стані, моль/кДж;

$h'_{\phi}$ ,  $h''_{\phi}$  – вільні члени;

$h'_j$ ,  $h''_j$  – коефіцієнти атомів і структурних груп горючих компонентів;

$m_j$  – число атомів  $j$ -го виду в суміші горючих компонентів.

Для суміші горючих компонентів величини  $\Delta H_f^{\circ}$  в кДж/моль і  $m_j$  обчислюють за формулами:

$$\Delta H_f^{\circ} = \left( \sum_{k=1}^n \Delta H_{fk}^{\circ} \varphi_k \right) / \sum_{k=1}^n \varphi_k,$$

$$m_j = \left( \sum_{k=1}^n m_{jk} \varphi_k \right) / \sum_{k=1}^n \varphi_k,$$

де  $\Delta H_{fk}^{\circ}$  – стандартна теплота утворення  $k$ -го горючого компонента в газоподібному стані, кДж/моль;

$m_j$  – число  $j$ -х атомів в молекулі  $k$ -го горючого компонента.

Якщо серед горючих компонентів суміші відсутній молекулярний водень, монооксид карбону і оцтова кислота, то значення коефіцієнта флегматизації  $K_{\phi}$  обчислюють за формулою:

$$K_{\phi} = \frac{\sum_{k=1}^n \varphi_k}{\sum_{k=1}^n \frac{\varphi_k}{K_{\phi k}}},$$

де  $K_{\phi k}$  – коефіцієнт флегматизації  $k$ -го горючого компонента даним флегматизатором.

### Контрольні запитання

1. У чому полягає основний принцип припинення горіння флегматизацією?
2. Які речовини використовують як флегматизатори?
3. Дати коротку характеристику вогнегасної здатності, властивостей, хімічної і корозійної активності, а також токсичності аргону і азоту.
4. Розповісти у яких випадках використовується вуглекислий газ, азот аргон, водяна пара і тонкорозпилена вода.
5. Способи подачі газів-розчинників в зони реакції горіння.

## РОЗДІЛ 10. ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ ІНГІБУВАННЯМ

### 10.1. Припинення горіння методом хімічного гальмування реакції

Аналізуючи факти, що впливають на швидкість протікання реакції і розглянувши рівняння Арреніуса:

$$\omega_{XP} = \varphi'' \cdot \varphi''' \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

можна зробити висновок, що швидкість хімічної реакції залежить не тільки від концентрації горючих компонентів, але і від температури в зоні реакції і  $E_a$  – енергії активації горючої речовини. Для зниження швидкості реакції горіння та її температури можна використати як метод фізичного впливу, так і методи хімічного гальмування реакції горіння.

З рівняння Арреніуса можна побачити, що на швидкість реакції горіння можна впливати шляхом зміни сукупної енергії активації горючої суміші. Причому, незначне збільшення енергії активації суміші призводить до непропорційно суттєвого зменшення швидкості реакції горіння у вигляді степеневі залежності.

Реакція горіння протікає як багатостадійний процес, в результаті якого на окремих стадіях утворюються проміжні продукти у вигляді іонів і радикалів. Вони стають активними центрами подальшого процесу.

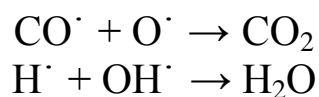
Хімічна реакція протікає врівноважено в тих випадках, коли в реакції при взаємодії активного центра з молекулою горючої речовини чи окисника, в одиницю часу, створюються активні центри в кількості рівній або більшій, ніж на попередньому етапі реакції активації:

$$N_{AKT}^+ - N_{AKT}^- > 1$$

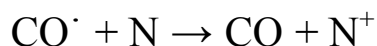
При зниженні швидкості виникнення активних центрів нижче за початковий рівень, швидкість реакції знижується аж до повного її припинення.

$$N_{AKT}^+ - N_{AKT}^- < 1 \quad \frac{dN_{AKT}}{d\tau} > 0$$

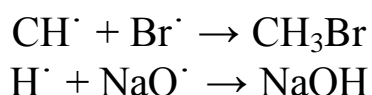
Загибель активних центрів при їх взаємній взаємодії призводить до утворення кінцевого продукту реакції горіння.



Загибель активних центрів відбувається у взаємодії з інертними речовинами чи твердою поверхнею.



Цей процес відбувається і при взаємодії активних центрів реакції горіння з радикалами і молекулами з утворенням речовин з високою енергією активації:



Речовини, які гальмують хімічну реакцію шляхом взаємодії з активним центром, називаються *інгібіторами* процесу горіння.

Одними з найбільш ефективних інгібіторів є галогеновуглеводні – хладони (фреони). Це вуглеводні, в структурі яких один і більше атомів водню заміщені атомом галогену (фтор, хлор, бром, йод), з обов'язковою присутністю фтору. Попадаючи в зону горіння такі речовини під дією температури розкладаються з утворенням радикалів типу:  $\text{CF}^\cdot$ ;  $\text{CHCl}^\cdot$ ;  $\text{Br}^\cdot$ ;  $\text{F}^\cdot$ ;  $\text{CFCl}^\cdot$  та ін. Надалі відбувається їх взаємодія з активними центрами реакції горіння, як описано вище.

## 10.2. Механізм припинення горіння речовинами-інгібіторами

При розгляді механізму горіння мова йшла про те, що проміжною стадією горіння є утворення активних частинок – вільних радикалів. Якщо більшість таких частинок вилучити з процесу, він далі розвиватиметься набагато повільніше. У формулі Арреніуса це відбивається різким зниженням константи швидкості реакції  $k$ , навпаки, збільшенням енергії її активації ( $E_a$ ). Активних частинок, вільних радикалів, у хімічних реакціях, у тому числі у реакціях горіння, виникає небагато. Але вони дуже активні, за короткий проміжок часу (за  $10^{-8}$ - $10^{-9}$  секунди) такі частинки встигають перетворитися у нові сполуки самі і передати імпульс перетворення (вільну валентність) далі. Отже, якщо у цей процес не втручатися, кожна з таких частинок започаткує до мільярда перетворень за одну секунду. Велика активність такої частинки є і її слабким місцем. Вона може зіткнутися з таким партнером взаємодії, прореагувавши з яким, утворить нову частинку, зовсім неактивну або набагато інертнішу за попередньою. Оскільки вільних радикалів виникає відносно мало (в залежності від умов реакції, один-два активних радикали припадає на кілька мільйонів стабільних молекул), то і “мисливців” за такими частинками треба небагато. Xi-

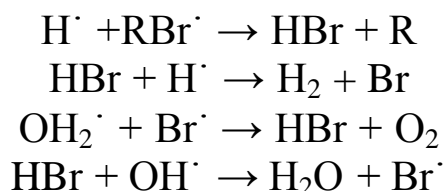
мічно активний інгібітор звичайно вводиться у зону горіння у кількості 2-3% від об'єму цієї зони, тобто у кількості, разів у 20-30 меншій ніж кількість інертного газу потрібного для гасіння такої ж пожежі.

Незначна кількість засобу, потрібна для припинення горіння, доводить, що головним механізмом дії є хімічна. Адже зрозуміло, що 2-3% об'єму зони горіння не можуть значно охолодити її і взагалі помітно вплинути на температуру цієї зони. Не може також така незначна кількість ізолювати зону горіння та прикрити її від доступу повітря і доступу горючого матеріалу. І, зрозуміло, введення додаткових 2-3% об'єму не впливає істотно на концентрацію у цій зоні кисню і концентрацію горючої речовини.

Пояснень конкретної дії інгібуючих вогнегасних засобів дуже багато. Усі автори згодні з тим, що інгібуючі речовини реагують саме з вільними радикалами. Але погляди на детальний механізм розходяться. Скоріше за все, універсального механізму, здатного пояснити дію усіх без винятку інгібуючих засобів, не існує. Тому, про детальний механізм краще говорити у кожному конкретному випадку.

Механізмом дії інгібуючих вогнегасних засобів є хімічна взаємодія молекул цих речовин із активними частинками, які утворюються під час горіння. Наслідком такої взаємодії є перетворення активних частинок у менш активні, або у стабільні сполуки. Чіткої теорії припинення горіння інгібуванням немає, але загальні відомості про припинення горіння, говорять про те, що хімічне гальмування реакції горіння викликають радикали, отримані при термічній деструкції молекул інгібітора. Виходячи з цього положення, можна розглянути інгібуючу дію не тільки хладонів, але і вогнегасних порошків.

Розглянемо дію інгібіторів на прикладі процесів інгібування горіння водню. Потрапляючи в зону горіння молекули інгібітора взаємодіють з активними центрами реакції горіння, утворюючи галогеноводневий та вуглеводневий радикали:



Таким чином інгібування полум'я водню пов'язане з вибірковою взаємодією галогенів чи їх сполук з атомами водню.

З врахуванням цього можна запропонувати такі шляхи підвищення ефективності вогнегасної здатності хладонів:

1. Одночасно з подачею хладону знизити концентрацію окисника шляхом подачі розбавленого вогнегасного складу.

2. При поверхневому гасінні на відкритому повітрі необхідно знизити вміст водню в зоні горіння шляхом комбінованої подачі охолоджуючих і інгібуючих речовин.

3. Збільшити активність інгібітора шляхом додавання речовин, здатних ефективно зв'язувати кисень в зоні реакції горіння. Найбільш ефективними добавками можуть бути диетилферроцен – 0,1% або хлороксид фосфору при додаванні до 1% до хладону.

Гетерогенне інгібування вогнегасними порошками відбувається при взаємодії продуктів термічного розкладу горючої речовини з вогнегасним порошком.

Вогнегасна ефективність хладонів в три і більше разів вища, ніж у газів флегматизаторів. Тим не менше, застосування хладонів в якості засобів гасіння, ускладнено через їх відносну токсичність, високу корозійну здатність, дороговизну. Крім цього, оскільки, фреони активно руйнують озоновий шар атмосфери, та їх випуск і застосування зменшується.

Летальні концентрації для хладонів і галогеновмісних вуглеводнів лежать в межах 12-15%. Але ще більш небезпечними є продукти їх термічного розкладу, оскільки в них можуть бути присутні такі речовини, як галогеновуглеводні, які в присутності пари води стають кислотами типу HCl. При взаємодії з продуктами піролізу горючої речовини можуть виникати і більш небезпечні суміші, такі як синильна кислота, фосген, фторовмісні продукти. Для цих речовин летальні концентрації лежать в межах від 0,15 до 1,5%.

### 10.3. Припинення горіння галогенвуглеводнями

Найбільш типовими інгібуючими засобами є вуглеводні, в яких один або декілька атомів водню заміщено на галогени, тобто галогеновуглеводні. Чим більше атомів галогену у молекулі, тим більша вогнегасна здатність сполуки. Дія галогенів нерівноцінна: чим більша атомна маса цього елемента, тим вища його ефективність, а отже вона підвищується у ряді:  $F < Cl < Br < I$ .

Йод – речовина дуже дорога і дуже дефіцитна, тому на практиці більш поширені бромовмісні сполуки. Йодо-, бромо- і хлоровмісні сполуки настільки активні, що при зберіганні можуть гідролізуватися водою; крім того вони мають підвищену корозійну і токсичну активність. Для зниження такої дії в молекули вводять атом флуору. Флуо-

робромопохідні і флуорохлоробромопохідні в Європейських країнах називають “галони”; в нас вони раніше називалися “фреони”; зараз, усе частіше, – “хладони”. Хладони мають свою класифікацію, свою номенклатуру, яка склалася історично. Вона складна і дуже незручна, але нею користуються і її необхідно вивчати.

Щодо механізму дії галогенвуглеводнів, то єдиної думки теж немає. Деякі автори вважають, що першим актом при введенні цих сполук у зону горіння є піроліз галогенопохідного при високій температурі з відщепленням атома галогену. Далі і атомарний галоген і галогеновмісний радикал, які мають неспарені електрони, реагують з активними частинками процесу горіння. При критичному розгляді, такий процес здається маловірогідним. Активних частинок у загальній масі молекул вихідних речовин не так вже й багато, одна на мільйони. Піроліз галогенопохідного кожної миті проходить у дуже малому ступені, десятки частки відсотку. Зустріч двох частинок із неспареним електроном – одної з горючої речовини, а іншої з інгібітора, – має дуже малу вірогідність. Крім того, лишається незрозумілим, чому нові молекули, що утворилися за реакцією цих двох активних частинок не розкладаються знову із утворенням вільних радикалів.

Більш вірогідним здається інше пояснення. Активні частинки  $\text{CH}_3\cdot$ ,  $\text{H}\cdot$ ,  $\text{OH}\cdot$  та ін., які утворилися у зоні горіння із пероксидних сполук, реагують безпосередньо з молекулами хладону, відриваючи один із атомів галогену.

Таким чином, активна частинка з неспареним електроном ( $\text{CH}_3\cdot$  у даному випадку) загинула. Нова частинка з неспареним електроном має настільки велику електронну густину зовнішніх шарів, що один неспарений електрон тут малопомітний, він, як кажуть, делокалізується. Дійсно, одна справа – неспарений електрон у атомі  $\text{H}\cdot$  на фоні трьох пар); і зовсім інша у бромтетрафторетилі, де на зовнішній орбіталі знаходиться система з 43 електронів. Тим більше, що усі 43 електрони знаходяться на р-орбіталах або на гібридизованих  $sp^3$ -орбіталах. На фоні 42 спарених, один, який тимчасово може підбирати собі пару серед 42, помітний значно менше. Активність такої частинки значно менша, такий вільний радикал, хоч і має неспарений електрон, може існувати значно довший час, вже не мільярдне і не мільйонні частки секунди, а значно більше, навіть цілі секунди. За цей час система встигає охолотитися і нових активних частинок утворює значно менше.

Закінчуючи розгляд механізму дії хладонів, слід зауважити, що деяке значення тут мають і їх теплофізичні характеристики. Теплоємність



пари тетрафтордибромметану ( $114B2$ ) дорівнює  $0,38$  кДж/моль, речовину цю застосовують при горінні у кількостях  $2-3\%$  від об'єму газової фази. Ці  $2-3\%$  треба нагріти до температури кипіння ( $46^\circ\text{C}$ ) і випарувати. Крім того, така інертна речовина знижує концентрацію і горючої речовини і кисню. Отже, в доповнення до інгібуючої дії, хладони до деякої міри, але дуже незначної, діють і як охолоджувачі, і як флегматизатори. Але основний механізм їх дії – пряме хімічне інгібування.

Галогеновуглеводні – леткі сполуки, у воді розчиняються погано, добре змішуються з органічними розчинниками. Хладони і галони з невеликою мольною масою у звичайних умовах перебувають у газоподібному стані; ті ж, що мають більшу кількість атомів карбону і більшу кількість атомів галогену, – рідини. Деякі хладони належать до газів.

Зрозуміло, якщо сполуки мають різний вміст атомів галогенів і різну молекулярну масу, вони відрізняються і за здатністю гасити полум'я. В середньому, як говорилося вище, полум'я згасає при концентрації хладону  $2-3\%$ . Але до значення  $2-3\%$  вогнегасної концентрації хладону слід відноситися обережно. Це середня вогнегасна концентрація. Дійсна, так звана “пікова” залежить від марки хладону і складу горючої суміші.

Має значення і інтенсивність процесу горіння, інтенсивність виділення тепла. За останньою ознакою пожежі поділяють на три категорії: малоенергетичні, коли тепло продукується тільки полум'ям; середньоенергетичні, коли тепло додатково випромінюється розпеченими поверхнями, і високоенергетичні, коли тепло постачається не тільки полум'ям і нагрітими поверхнями, але й додатковими джерелами (джерелом запалювання, хімічною або іншою реакцією).

Залежновід названих трьох факторів (природа горючої речовини, тип хладону та енергетичність пожежі) необхідна пікова вогнегасна концентрація засобу може коливатися у досить широких межах, від  $1,9-2\%$  до  $19\%$ . Найвищу вогнегасну здатність серед тих хладонів, що випускаються промисловістю, володіє  $114B2$ . Малоенергетичні пожежі вуглеводнів, спиртів, ефірів і т.ін. він гасить вже при концентрації близько  $2\%$ . А, наприклад, пікова концентрація карбон тетрахлориду, хладону  $10$  ( $CCl_4$ ), при гасінні тих же пожеж становить  $16-18\%$ .

При гасінні середньоенергетичних пожеж необхідна пікова гасильна концентрація будь-якого хладону буде збільшуватися на  $30-40\%$ . А при гасінні високоенергетичних – ще на  $30-40\%$ .

Залежність від типу горючої речовини чіткої закономірності не має, але чим більше тепла виділяється при горінні речовини, тим більша концентрація хладону потрібна для припинення цього горіння.

Так, для припинення горіння ацетону чи гексану в умовах середньоенергетичних пожеж потрібна приблизно 4,3%-ва концентрація хладону; для припинення горіння у тих же умовах метанолу чи ацетилену – 9%-ва концентрація того ж засобу. Ще разючішою буде різниця в умовах високоенергетичних пожеж: відповідно, 4,5% – для ацетону, 6,9 – для гексану, 14,0 – для метанолу і 19% – для ацетилену.

Застосування галогеновуглеводнів має переваги перед застосуванням водних розчинів, пін або інертних газів, Основне – це відносно незначна кількість інгібіторів, яку треба ввести у зону, щоб загасити полум'я; 2-3% від об'єму. Це в 10 - 12 разів менше ніж, наприклад, кількість вуглекислого газу і в 15-20 разів менша ніж потрібна кількість азоту. Мала кількість речовини, необхідна для гасіння пожежі, швидка дія, яка ефективно знижує тривалість пожежі і помітно зменшує втрати від неї, привели до широкого використання цих засобів, особливо хладону (фреону) 114В2. Основна область їх застосування – пожежі в огороженнях, тобто там, де пожежа має певний об'єм.

Мають галогеновуглеводні і недоліки. Такий показник, як відносно велика ціна, особливого значення не має, оскільки усунення втрат від збільшення часу пожежі значно перевищує втрати на інгібітор.

Більшою увагу привертає проблема отруєння навколишнього середовища. Хладони – токсичні самі по собі і дають токсичні продукти при піролізі і реакціях з продуктами горіння (активними частинками процесу горіння). У рідкому вигляді деякі з них проходять крізь шкіру людини. Ще гірше у газоподібному стані; і самі хладони і продукти, що з них утворюються, попадаючи у дихальні шляхи, викликають подразнення.

Максимально безпечні концентрації самих хладонів, які людина може витримати на протязі 1 хвилини, становлять:

для хладону	13В1 (CF <sub>3</sub> Br)	1,0-1,2%;
для хладону	12В1 (CF <sub>2</sub> ClBr)	4,0-5,0%;
для хладону	114В2 (C <sub>2</sub> F <sub>2</sub> Br <sub>2</sub> )	1,5-2,0%.

В умовах пожежі галогеновуглеводні розкладаються з утворенням вільних галогенів і галогеноводнів. Крім того, у продуктах розкладу з'являється незначна кількість галогенозаміщених кетонів, галогенозаміщених альдегідів і галогенозаміщених кислот, тобто сполук, які володіють лакриматорними (сльозоточивими) властивостями. Ступінь розкладу хладонів і кількість продуктів, що утворюються, залежать від розмірів пожежі і коливаються у межах від 0,2 до 2 %. У цілому, концентрації шкідливих речовин, які створюються при засто-

суванні цих засобів для гасіння пожеж, у 5-10 разів, нижчі від летальних; так що шкоду здоров'ю від них можна вважати навіть менша, ніж та, яку завдають на пожежі чадний газ і карбон діоксид.

В останні роки поширюється думка про те, що хладони, накопичуючись у верхніх шарах атмосфери, несуть відповідальність за зменшення там кількості озону. Згідно із сучасними поглядами, озоновий шар, який оточує стратосферу нашої планети, затримує більшу частину ультрафіолетової частини випромінювання Сонця і захищає планету від надмірного нагрівання, а біологічні об'єкти – від згубних доз ультра-фіолетової радіації. Згідно з теорією, яку було висунуто у 70-ті роки, галогеновуглеводні, які викидаються вулканами і цивілізацією, активно реагують з озоном, зменшують товщину його шару і навіть призводять до утворення в цьому шарі отворів, "озонових дірок".

Це спірне питання оскільки питома маса газоподібних хладонів на порядок перевищує питому масу азоту і кисню – основних складових повітря; більшість хладонів при нормальних умовах має тиск насиченої пари, набагато нижчий від тиску насиченої пари кисню та азоту. Отже, згідно з законами конвекції, ці речовини будуть більше розподілятися у нижчих шарах атмосфери; чим вище, тим їх буде все менше. Крім того, порівняно з розмірами озонового шару, кількість хладонів, що виробляється, прямує до нуля. Таким чином, виникають серйозні сумніви відносно того, що по-перше, у верхніх шарах атмосфери дійсно є практично значимі кількості галогеновуглеводнів; по-друге, якщо вони там і є, то мають земне, а не космічне походження; по-третє, якщо ці галогеновуглеводні потрапили у стратосферу з Землі, то вони техногенні а не викинуті якимись вулканами кілька десятків мільйонів років тому.

Але, як би не було, наприкінці 80-х років нашого століття Монреальським протоколом представників більшості розвинених держав було рекомендовано заборонити виробництво і застосування на нашій планеті будь-яких галогеновуглеводнів взагалі.

Корозійну активність самі по собі ці засоби мають невисоку. Так що при зберіганні сухих хладонів помітної дії на метал вони не чинять. Однак, за наявності вологи, тим більше при підвищеній температурі, іде гідроліз галогенозаміщених вуглеводнів до спиртів з відщепленням галогеноводнів, які утворюють з вологою соляну і до чого кислоти.

Отже, основним механізмом гасіння пожеж при застосуванні галогенопохідних вуглеводнів є пряме хімічне інгібування реакції горіння, де вони виступають як "пастки вільних радикалів". Використовуються галогеновуглеводні при об'ємному гасінні у приміщеннях, де їх застосування має значні переваги перед застосуванням водних розчинів та

інертних газів. З огляду на токсичність хладонів і продуктів їх подальшого перетворення в умовах пожежі, при зберіганні і застосуванні галогеновуглеводнів слід дотримуватися певної обережності.

#### **10.4. Припинення горіння вогнегасними порошками**

Головним компонентом вогнегасних композицій на основі вогнегасних порошоків є солі металів, здебільшого натрій карбонати та натрій бікарбонати, калій фосфати, калій хлориди, квасці, силіцій оксид, амоній фосфат і інші. В країнах СНД найбільш поширеними є композиції на основі натрій бікарбонату та амоній фосфату. Оптимальні розміри частинок вогнегасних порошоків – 20-60 мкм. При виготовленні порошоків, солі розмелюють до такого розміру і сушать на стрічковому конвеєрі або у повітряному киплячому шарі.

Будь-яка сіль комплексом потрібних вогнегасних і експлуатаційних властивостей одночасно не володіє. Наприклад, броміди металів, амоній фосфат і деякі інші – добре гасять полум'я, але гігроскопічні і схильні злежуватися. Інші, такі як фториди металів, амоній сульфат і багато інших – не здатні ефективно гасити полум'я, але при зберіганні довгий час лишаються сипучими. Вогнегасна ж порошкова композиція повинна добре гасити полум'я, не змінювати своїх властивостей при зберіганні протягом декількох років і бути завжди готовою до негайного застосування. Тому вогнегасні порошкові суміші частіше за все містять не одну сіль а більше. До складу цих композицій входять також модифікуючі добавки, які забезпечують гідрофобність і текучість композиції, а також знижують схильність до грудкування.

Вогнегасні порошкові композиції умовно поділяють на дві групи: порошки загального призначення і спеціальні порошки. Перші призначені для гасіння переважно пожеж органічних матеріалів нафти, бензини, гасу, деревини, пластмас і т.ін. Такі склади здатні створювати вогнегасні хмари. Спеціальні порошки призначені для припинення горіння металів, металоорганічних сполук і т.ін. їх особливість – здатність створювати на поверхні металу, що горить, досить щільний шар, який перекриває доступ до цієї поверхні кисню. У нашій країні, з першої групи застосовуються насамперед порошкові вогнегасні склади на основі амоній і діамоній фосфатів (П-2 АП; П-4АП; П-2 АПМ; Пірант-А; ПФ). Застосовують і порошкові суміші ПСБ (на основі бікарбонату натрію). Друга група переважно представлена порошками ПГС та ПХ (на основі хлоридів металів).

Класифікують вогнегасні порошкові склади за призначенням: склад відносять до такого класу, пожежі якого класу він може гасити.

За цим принципом, композиції марки ПСБ відносяться до порошків класу ВСЕ, композиції марки П-2АП та П-2АПМ – до порошків класу АВС, а композиції марки ПГС – до порошків класу ABCDF.

Єдиного погляду на механізм вогнегасної дії цих засобів немає. Кількості порошків, потрібні для гасіння, у декілька разів менші за потрібні кількості води чи флегматизатора. Це означає, що головним механізмом при дії порошків є не охолодження і не зниження концентрацій горючого або окисника.

Більшість авторів вважає, що головний тут – механізм інгібування, механізм дезактивації вільних радикалів ланцюгового горіння. Варіантів впливу, варіантів інгібування може бути два. За першим з них (гомогенному), солі металів під дією високої температури випаровуються і розкладаються, утворюючи вільні атоми металів із неспареними електронами на зовнішніх орбітах. Вільні атоми металів далі реагують із активними частинками, виводячи їх з процесу.

Другий (гетерогенний) механізм інгібування передбачає першочергову адсорбцію на поверхні порошку саме активних вільних радикалів. Сконцентровані на поверхні, ці частинки диспропорціонують, тобто реагують одна з одною. Неактивні молекули горючої речовини і кисню адсорбуються значно менше. Таким чином, із об'єму зони горіння вилучаються саме активні частинки.

Активних частинок (вільних радикалів) сіль кожену мить дає не більше ніж утворюється вільних радикалів із горючої речовини, вільних радикалів, які і забезпечують процес горіння. І тих, і інших утворюється не більше однієї частинки на мільйони відносно стабільних молекул. Зустріч двох активних частинок серед мільйонного "натовпу" пасивних молекул маловірогідна. Більш вірогідним є інший механізм – зіштовхування активних частинок горіння з молекулою нерозкладеної солі. Така "взаємодія" закінчується приєднанням вільного радикала до молекули солі. В результаті утворюються частинки, вільний електрон яких має кращі умови для делокалізації і які можуть залишатися стабільними (псевдостабільними) вже не мільярдні частки секунди, а довше, навіть цілі секунди. Наприклад: гасіння порошками при горінні металів вірогідно іде за іншим механізмом, метали горять на поверхні, або безпосередньо близько неї. Температура горіння металів висока настільки, що розплавляє сіль вогнегасного порошку і розплавлений шар цієї солі створює на поверхні металу захисну плівку.

Механізм інгібування – основний, але не єдиний механізм дії цих вогнегасних засобів. Покриваючи певним шаром поверхню горіння, порошки забезпечують ізолюючий ефект. Маючи велику теплоємність і теплоту плавлення, випаровування і розкладу, солі металів охоло-

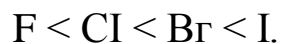
джують зону горіння. Нарешті, велика кількість дрібнодисперсного порошку, введена миттєво, розбавляє, флегматизує горючу суміш. Вважається, що, залежно від типу порошку, дія за одним із "побічних" механізмів може навіть переважати дію за механізмом інгібування. Наприклад, при застосуванні високо-теплоємних оксидів міді, алюмінію і деяких інших металів превалюючим стає механізм охолодження.

До переваг застосування порошків відноситься, перш за все, значно менша кількість, порівняно з іншими вогнегасними засобами, потрібна для гасіння однакових пожеж. Крім того, більшість вогнегасних порошків значно менш токсична ніж хладони, чи піноутворювачі. Солі, які є основою цих засобів, у переважній більшості є тими ж самими, що є основою мінеральних добрив. Отже, їх використання супроводжується мінімальною екологічною шкодою.

Недоліком порошкових засобів гасіння є можливість після затування повторного займання. Тому там, де можливо, загасивши пожежу порошком, додатково охолоджують зону горіння водою або ізолюють її піною.

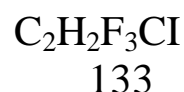
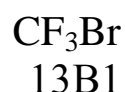
### 10.5. Припинення горіння вогнегасними хладонами

Найбільш типовими інгібуючими засобами є вуглеводні, в яких один або декілька атомів водню замінено на галогени, тобто галогеновуглеводні. Чим більше атомів галогену у молекулі, тим більша вогнегасна здатність сполуки. Дія галогенів різна; чим більша атомна маса цього елемента, тим вища його ефективність; отже вона підвищується у ряді:



Йодо-, бромо- і хлоровмісні сполуки настільки активні, що при зберіганні можуть гідролізуватися водою; крім того вони мають підвищену корозійну і токсичну активність. Для зниження такої дії у молекулу вводять атом флуору. Флуоробромпохідні і флуорохлоробромпохідні у дальньому зарубіжжі мають торгову назву "галони"; в нас вони раніше називалися "фреони"; зараз, усе частіше, – "хладони". Хладони мають свою класифікацію, свою номенклатуру, яка склалася історично. Ця номенклатура складна і дуже незручна, але нею користуються і її необхідно вивчати.

Писати номер хладону за формулою або формулу за номером треба з кінця, справа наліво. Якщо хладон має атоми бром, у назві хладону стоїть буква В, за цією буквою іде цифра, яка позначає кількість атомів бром у молекулі. Наприклад:



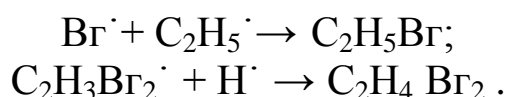
Перед буквою В, або, якщо бром не має, взагалі останньою цифрою (одиниці), стоїть цифра, що позначає кількість у молекулі атомів флуору; перед цією цифрою стоїть цифра (десятки), що вказує кількість атомів гідрогену плюс один; ще лівіше (сотні) - цифра, що вказує кількість атомів карбону мінус 1. Кількість атомів хлору ніяк не позначається, її треба вираховувати по вільних зв'язках атома карбону. Таким чином, хладон  $\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$  буде позначатися 114В2, хладон  $\text{CF}_2\text{ClBr}$  – 12В1, хладон  $\text{C}_2\text{F}_2\text{Br}_2$  – 112В2. Хладон 232В3 буде мати формулу  $\text{C}_3\text{H}_2\text{F}_2\text{Br}_3\text{Cl}$ .

Галони мають більш просту номенклатуру: перша цифра – кількість атомів карбону, друга – атомів флуору, третя – хлору, четверта – бром і п'ята – йоду. Тільки гідроген треба рахувати, застосовуючи загальну формулу насичених вуглеводнів.

Механізм галогеновуглеводнів при припиненні ними горіння. Першим актом при введенні цих сполук у зону горіння є піроліз галогенопохідного при високій температурі з відщепленням атому галогену, наприклад:

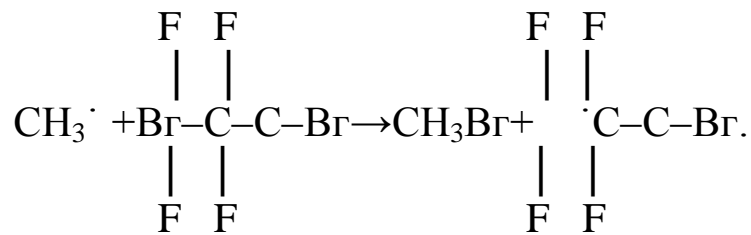


Далі, і атомарний галоген і галогеновмісний радикал, які мають неспарені електрони, які реагують з активними частинками процесу горіння:



При критичному розгляді, такий процес здається маловірогідним. Активних частинок у загальній масі молекул вихідних речовин не так вже й багато, одна на мільйони. Піроліз галогенопохідного кожної миті проходить у дуже малому ступені, десяті частки відсотка. Зустріч двох частинок із неспареним електроном – одної з горючої речовини і іншої з інгібітора, – має дуже малу вірогідність. Крім того, лишається незрозумілим, чому нові молекули, що утворилися по реакції цих двох активних частинок не розкладаються знов із утворенням вільних радикалів.

Більш вірогідним здається інше пояснення. Активні частинки  $\text{CH}_3\cdot$ ,  $\text{H}\cdot$ ,  $\text{OH}\cdot$  і інші, які утворилися у зоні горіння із пероксидних сполук, реагують безпосередньо з молекулами хладону, відриваючи один із атомів галогену, наприклад:



Таким чином, активна частинка з неспареним електроном ( $\text{CH}_3\cdot$  у цьому випадку) загинула. Нова частинка з неспареним електроном має настільки велику електронну густину зовнішніх шарів, що один неспарений електрон тут малопомітний, він, як кажуть, делокалізується.

Активність такої частинки значно менша, такий вільний радикал, хоч і має неспарені електрони, може існувати значно довший час, вже не мільярдні і мільйонні частки секунди, а значно більше, навіть цілі секунди. За цей час система встигає охолودитися і нових активних частин утворює значно менше.

Закінчуючи розгляд механізму дії хладонів, слід зауважити що деяке значення тут мають і їх теплофізичні характеристики. Теплоємність пари тетрафтордіброметану (114В2) дорівнює 0,38 кДж/моль, речовину цю застосовують при горінні у кількостях 2-3% від об'єму газової фази. Ці 2-3% треба нагріти до температури кипіння (46°C) і випарити. Крім того, такий інгібітор знижує концентрацію і горючої речовини, і кисню. Отже, в доповнення до інгібуючої дії, хладони до деякої міри, але дуже незначної, діють і як охолоджувачі і як флегматизатори. Але основний механізм їх дії – пряме хімічне інгібування.

Хладони застосовуються для захисту від пожеж транспортних засобів, машинних відділень суден, моторних відсіків літаків. Взагалі, газові вогнегасні речовини можна використовувати для гасіння пожеж у приміщеннях, що мають достатню герметичність, як правило, після завершення евакуації людей. Крім того, вони можуть застосовуватись як засіб об'ємного, поверхневого, та локального гасіння пожеж за будь-яких мінусових температур, а також для запобігання можливим вибухам газо- і пароповітряних сумішей.



### Контрольні питання

1. У чому полягає основний принцип припинення горіння хладонами?
2. До якого класу речовин відносяться хладони?
3. Скільки атомів водню міститься у молекулі хладону 132, хладону 12В2?
4. Назвіть головну перевагу застосування при гасінні пожеж хладонів перед застосуванням водних розчинів дефлегматизаторів?
5. Яку функцію виконують добавки до порошків у порошкових вогнегасних засобах?
6. Розповісти про механізм припинення порошками горіння металів. Надати приклади.
7. Які фактори треба враховувати, обираючи засіб гасіння конкретної пожежі?

## РОЗДІЛ 11. ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ АЕРОЗОЛЯМИ

### 11.1. Механізм припинення горіння аерозолями

Газодинамічний спосіб охолодження полягає у введенні в потік аерозолію охолоджувача, в якості якого можуть використовуватися повітря,  $N_2$ ,  $CO_2$ , вода, водні розчини солей натрію і калію. Як показали експерименти, застосування води або водних розчинів солей є найкращим, оскільки вони мають високі значення теплоємності і теплоти пароутворення.

Для реалізації цього методу пропонується ежекційний генератор, який включає камеру згорання, де розміщені шашка генератора аерозолів, робоче сопло для формування потоку аерозолію, приймальна камера для формування потоку охолоджувача, камера змішування, пристрій запалювання.

В корпусі генератора процес горіння заряду генератора аерозолів протікає при надлишковому тиску. Випуск аерозолію здійснюється через декілька соплових отворів, швидкість продуктів згорання в яких, залежно від перепаду тиску, може сягати швидкості звуку. Сутність способу полягає в тому, що через прикріплену до корпусу генератора зі сторони соплового блока газодинамічну насадку, завдяки великій швидкості високотемпературного потоку аерозолію, забезпечується підсмоктування повітря для охолодження. Посудина з охолоджувачем розташовується горизонтально у вигляді кожуха камери змішування і має отвір для сполучення з приймальною камерою, забезпечуючи максимальне наближення рівня вільної поверхні охолоджувача до вхідної ділянки камери змішування.

Існують також наукові розробки, в яких пропонується метод охолодження, що полягає у проходженні гарячого аерозолію через охолоджувач (барботування). Метод перспективний для захисту резервуарів з легкозаймистими та горючими рідинами і полягає в тому, що аерозоль, який утворюється, за допомогою приєднаного до резервуара генератора подається в нижню частину резервуара і спливає у верхню частину завдяки різниці густин генератора аерозолів і рідини.

Отже, найбільш ефективними засобами пожежогасіння є інгібуючі вогнегасні речовини. Їх висока вогнегасна здатність приводить до різкого зменшення часу гасіння і витрати самого засобу гасіння.

## 11.2. Переваги та недоліки аерозолів

До переваг вогнегасних аерозолів відносять високу інгібуючу здатність та можливість гасити обладнання під напругою. Недоліки – це непридатність для застосування в приміщеннях, де перебувають люди, можливість гасіння пожеж тільки за низького ступеня негерметичності приміщення, що захищається, та необхідність витримки його закритим після подавання вогнегасної речовини, а також можливість негативного впливу твердих частинок і газоподібних речовин на "чутливе" електронне та інше обладнання. Основною перевагою аерозолів є те, що після гасіння ним, необхідно лише провести вологе прибирання (бажано підкисленою водою з рівнем рН від 4 до 5), при цьому працівники повинні застосовувати гумові рукавиці, захисні окуляри та респіратори.

Заряди, виготовлені за піротехнічною технологією, більш небезпечні, ніж виготовлені за іншими технологіями. Звичайно піротехнічні вироби формуються методом глухого пресування суміші окисника і пального, при цьому коефіцієнт ущільнення складу має сягати 0,97-0,98. Горіння піротехнічних виробів в разі низьких (0,5-0,7) і середніх (0,7-0,9) коефіцієнтів ущільнення переходить у вибух. Крім цього, можливість переходу горіння в аномальний режим може бути викликана конструктивними особливостями генератора вогнегасного аерозолу (ГВА), наприклад, неправильним вибором вільного простору в камері згорання над зарядом, технологічними дефектами зарядів. Однак піротехнічні заряди мають такі переваги: широка сировинна база, низька вартість, мала чутливість до теплових впливів, гарна займистість.

При горінні балістичних зарядів, основою яких є нітроцелюлоза, пластифікована важколетючими розчинниками, неможливо уникнути в газовому середовищі генератора аерозолів таких сполук, як  $N_2O$ ,  $NO$ ,  $NO_2$  та ін. В зв'язку з цим, аерозолеутворюючі балістичні заряди не знайшли широкого застосування для цілей пожежогасіння.

Переваги в порівнянні з піротехнічними і балістичними складами, особливо в частині регулювання фізико-механічних характеристик, мають сумішеві твердопаливні генератори аерозолів. Вони характеризуються низькою чутливістю до удару, тертя, підвищеної температури, низьким вологовбиранням, високою вогнегасною ефективністю тощо.

Сумішеві твердопаливні генератори аерозолів являють собою резиноподібні матеріали через наявність у рецептурі в якості пального пластифікованих синтетичних смол. Як окисник у них виступають К-вмісні неорганічні солі (наприклад, перхлорати, нітрат, біхромати

або азиди), які мають високу швидкість термічного розкладу. Для надання такому складу вогнегасних властивостей в їх рецептуру вводять спеціальні функціональні добавки.

Під час короточасного впливу теплового імпульсу в генераторі аерозолів ініціюється реакція горіння. Зовнішнім високотемпературним джерелом тепла може служити електропірозапалювач, електрична спіраль тощо. Внаслідок взаємодії компонентів твердопаливної композиції генерується і одночасно подається в об'єм, що захищається, вогнегасна суміш газів ( $N_2$ ,  $CO_2$ , водяна пара) і високодисперсних твердих часток солей і оксидів лужних металів ( $K_2CO_3$ ,  $K_2O$ ,  $KCl$ ,  $KOH$ ). Хлорид і карбонати калію, отримані в результаті хімічних реакцій на молекулярному рівні при таких високих температурах, у потоці інших продуктів реакцій знаходяться в газоподібному стані. І тільки на виході з генератора охолоджуючись вони конденсуються в кристалічні структури на субмікронному рівні з наступною коагуляцією частинок. Як показали експериментальні дослідження з визначення гранулометричного складу вогнегасного аерозолу, 80 % конденсованих часток (за масою) становлять менше 1 мкм. Газоподібні продукти згоряння, які становлять приблизно 75 % від загального об'єму аерозолу, створюють потік для транспортування твердих частинок в зону горіння.

У якості каталізатора горіння до складу генератора аерозолів вводять метали (Al, Mg), які призводять до отримання високої температури, за якої відбувається генерація вогнегасного аерозолу. Це сприяє інтенсивному протіканню процесу термічного розкладу та утворенню твердих аерозольних часток мікронних розмірів (характерний розмір часток становить близько 1 мкм), більш повному переходу компонентів у газоподібний стан та їх частковій іонізації. Отримання ж вогнегасного порошку з таким малим розміром часток практично недоступне.

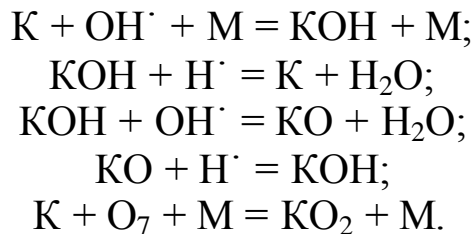
При розробці рецептур генераторів аерозолів і прогнозуванні їх ефективності необхідно знати, які хімічні сполуки варто синтезувати в процесі згоряння рецептур, щоб забезпечити високу вогнегасну ефективність генераторів аерозолів.

В результаті експериментальних досліджень щодо оцінки вогнегасної ефективності аерозолу індивідуальних сполук визначено ряд вогнегасної ефективності високодисперсних твердих частинок (середній розмір частинок не перевищував 1-2 мкм різних хімічних сполук лужних металів. Вогнегасна ефективність змінюється в такій послідовності:

гідроксиди => оксиди => карбонати => бікарбонати => хлориди.

Найбільш ефективними є сполуки калію.

Ефект гасіння під час використання генераторів аерозолів досягається завдяки гомогенному інгібуванню хімічних процесів, що протікають у зоні горіння, високодисперсними твердими частками аерозолі. Відомо, що процес інгібування реакції горіння сполуками калію пояснюється тим, що гідроксид калію виводить із реакційної зони радикали  $\text{OH}\cdot$  і  $\text{H}\cdot$ :



Домінуюче значення гідроксиду металу в механізмі інгібування підтверджується тим, що при додаванні до заряду ТПК усього близько 1 % луку вогнегасна ефективність генератора аерозолів збільшується приблизно на 20 %.

Таким чином, вогнегасний аерозоль за механізмом вогнегасної дії наближається до порошкових засобів пожежогасіння. Однак вогнегасні аерозолі мають відмінності, як від порошків, так і від газових систем пожежогасіння:

- вогнегасна речовина знаходиться не в готовому до використання вигляді, а в хімічно зв'язаному стані;
- генерація (створення) вогнегасного аерозолі відбувається в процесі горіння генератора аерозолів під час виникнення пожежі. Саме отримання аерозолі безпосередньо в момент гасіння пожежі сприяє підвищенню його інгібуючої здатності завдяки ефекту “свіжої”, тобто активної, поверхні часток, що беруть участь в процесі рекомбінації радикалів полум'я.

Генератори аерозолів мають більш високу вогнегасну здатність (в 5-8 раз вищу, ніж хладони і вогнегасні порошки), оскільки завдяки їхній високій дисперсності збільшується частка гомогенного інгібування активних центрів полум'я. Так, вогнегасна концентрація стехіометричної метано-повітряної суміші для аерозольного складу становить 0,04-0,08 кг/м<sup>3</sup>, хладону – 0,22-0,30 кг/м<sup>3</sup>, порошку – 0,25 кг/м<sup>3</sup>, а  $\text{CO}_2$  – 0,7 кг/м<sup>3</sup>. При цьому вартість захисту 1 м<sup>3</sup> становить для генератора аерозолів – 5-7 у.о., хладону – 25-30 у.о., порошку – 20-25 у.о., а для  $\text{CO}_2$  – 25-30 у.о.

Висока дисперсність аерозолі, що утворюється, сприяє також різкому збільшенню часу зависання, а отже, і часу перебування частинок у полум'ї. Час життя аерозолі може становити 40-50 хв. Таким чином, аерозоль, перебуваючи у завислому стані, здатний підт-

римувати вогнегасну концентрацію у всьому захищеному об'ємі тривалий час. За цим параметром аерозольні вогнегасники можна розглядати як різновид газових систем.

Отже, можна відмітити цілий ряд переваг генераторів аерозолів:

- відсутність екологічної і токсичної шкідливості (на відміну від хладонів, генератори аерозолів мають нульовий озоноруйнуючий потенціал, а дим, що утворюється під час термічного розкладання в генераторі аерозолів, має безпечний рівень токсичності і не представляє небезпеки для людей);
- висока вогнегасна ефективність (у 5-8 разів ефективніше за хладонові установки за масою вогнегасного складу, в 8-10 разів – за габаритними показниками);
- відсутність необхідності в посудинах під тиском і системах трубопроводів, що дає змогу максимально наблизити засіб гасіння до осередку пожежі, знижуючи інерційність установки;
- розміщення генератора аерозолів у твердому стані в компактних пристроях дає змогу їх використовувати їх для гасіння у важкодоступних місцях;
- легкість ініціювання (займання) і можливість застосування в автономному режимі (без електроживлення) з використанням термохімічного запуску робить установку незалежною від силових установок;
- надійність (генератори аерозолів стійкі до удару, детонації, тертя, температура самозаймання вища за 550 °С) і постійна готовність до роботи в жорстких кліматичних умовах (вологість до 100 %, робочий інтервал температур від -60 °С до +60 °С);
- довговічність (термін експлуатації перевищує 10 років) і простота експлуатації. Нарівні з перевагами генератори аерозолів мають і недоліки.

Використання генераторів аерозолів є вельми проблематичним для гасіння тліючих пожеж, оскільки відомо, що інгібуючі вогнегасні засоби найбільш ефективні під час гасіння полум'яного горіння, яке має радикально-ланцюговий механізм. Разом з тим відомо, що гасіння тліючих матеріалів може здійснюватися вогнегасними порошками, активною основою яких є фосфорно-амонійна сіль, що при нагріванні утворює воду і фосфорну кислоту, які взаємодіючи між собою сприяють утворенню захисної плівки на поверхні матеріалу. Тому останнім часом запропонований ряд нових рецептів ТПК, до складу яких введений фосфор або фосфат калію.

Найбільш істотним є те, що аерозоль як продукт згоряння ТПК, має високу температуру (близько 1500 К) і його отримання супроводжується інтенсивним форсом полум'я.

Розміри високотемпературної зони, яка виникає при спрацюванні генератора, вказані в технічній документації. Для генераторів типу АПГ-3 високотемпературна зона (температура газу перевищує 300 °С) поширюється на відстань 0,5 м. Безпечна відстань становить 1,0 м. Для генераторів типу АПГ-10 високотемпературна зона з температурою понад 700 °С поширюється на відстань 0,5 м. Безпечна відстань становить 1,5 м.

Нагрітий аерозоль конвекційно спливає під стелю і тільки охолоджуючись поширюється по всьому об'єму захищеного приміщення. Процес природного охолодження є досить повільним, що значно збільшує час гасіння осередків пожежі на нижній відмітці (а саме таке розташування осередків характерне для більшості реальних пожеж), а за наявності нещільності в огорожуючих конструкціях витоки з генератора аерозолів можуть стати такими істотними, що вогнегасна концентрація не буде створюватися (особливо у високих приміщеннях).

Одним з обмежень на застосування газоаерозольних генераторів є те, що при їх спрацюванні у приміщенні підвищується тиск, який за певних умов може зруйнувати скління, що призведе до значного витоку аерозолу через ці отвори. Втрати аерозолу можуть виявитися такими великими, що аерозольна установка не справиться з гасінням пожежі в приміщенні, що захищається.

Однак останнім часом розроблений і перевірений ряд генераторів із застосуванням охолоджуючих пристосувань, які забезпечують ліквідацію форсу полум'я і дають змогу отримати на виході струмів аерозолу з температурою не вище за 120 °С. Охолоджений аерозоль після утворення рівномірно розподіляється по захищуваному приміщенню.

Ліквідувати полум'я і знизити температуру аерозолу можна досягатися:

1. застосуванням генераторів аерозолів, які практично не дають полум'я при горінні (подібний принцип застосовується в таких генераторах, як АПГ, МАГ, ОСА);

2. використанням в генераторах спеціальних насадок-охолоджувачів. Прикладом подібних генераторів служать генератори СОТ, ГОА, АГАТ.

В насадках-охолоджувачах застосовують два способи охолодження високотемпературного потоку аерозолу: термохімічний і газодинамічний.

Термохімічний спосіб заснований на поглинанні тепла порошкоподібним абляційним матеріалом.

Абляція – віднесення речовини з поверхні твердого тіла пото-

ком гарячого газу завдяки оплавленню або сублімації. Саме на абляції заснований захист ракет при вході в атмосферу, а також охолодження камер ракетних двигунів.

ТПК розміщується в камері згоряння, розташованій в центральній частині генератора. Аерозоль, що утворюється, при своєму русі до виходу може охолоджуватися в безконтактному і контактному режимах.

Безконтактний режим охолодження характеризується тим, що високотемпературні продукти горіння АУС проходять через лабіринт каналів, що складаються з подвійних стінок, між якими в якості охолоджувача засипаний звичайний вогнегасний порошок. Завдяки нагріванню стінок каналу порошок частково розкладається і виділяє додаткову кількість інертних газів у потік аерозолу, а частково залишається у вихідному стані. Такий спосіб дає змогу знизити температуру аерозолу до 200 °С без зменшення його вогнегасної ефективності.

Температура аерозолу на виході з генератора залежить від маси охолоджувача, поверхні й часу контакту аерозолу з ним. Найкращі результати виходять з абляційним порошком ПСБ-3, основою якого є бікарбонат натрію.

Контактний режим охолодження полягає в тому, що на шляху розжарених продуктів згоряння генератора аерозолів встановлюється додаткова насадка, заповнена пористим охолоджувачем, частіше за все на основі оксалатів. Відбувається прямий контакт аерозолу та охолоджувача, який розкладається з ендотермічним ефектом, охолоджуючи аерозоль і виділяючи при цьому додаткову кількість інертних газів. Залежновід конструкції насадки і фізико-хімічних властивостей охолоджувача, цей спосіб дає можливість знизити температуру аерозолу до 200-400 °С.

Збільшення опору теплообмінника призводить до збільшення втрат порошинок в аерозолі, що знижує його вогнегасну ефективність. До того ж варто мати на увазі, що при інтенсивному охолодженні аерозолу відбувається конденсація хлориду і карбонату калію, а при різкому зниженні швидкості аерозолів у насадці конденсована фаза встигає коагулювати в більш великі конгломерати. При цьому частина конденсованої фази з генератора аерозолів фільтрується охолоджувачем, а частина – виноситься газовим потоком, у результаті чого вогнегасна ефективність охолодженого аерозолів знижується приблизно в 2-3 рази. Цю обставину необхідно враховувати при визначенні кількості генераторів вогнегасного аерозолу для протипожежного захисту приміщень.



### 11.3. Фактори, що впливають на вогнегасну ефективність аерозолів

Ефективність пожежогасіння аерозолеутворюючими вогнегасними складами залежить від хімічного, кількісного і дисперсного складу їхньої твердої фази. Ці характеристики в реальних умовах пожеж під впливом різних зовнішніх факторів (вологості, рухливості, температури середовища, наявності розвинутої твердої поверхні вбудованих в об'єм конструкцій та ін.) можуть істотно змінюватися, призводячи до помітної зміни вогнегасної здатності і в цілому параметрів процесу пожежогасіння.

Найважливішим показником всіх засобів об'ємного пожежогасіння є вогнегасна здатність, тобто здатність визначеної за величиною масової (об'ємної) концентрації (питомої витрати) вогнегасної речовини ( $\text{г/м}^3$ ) запобігати запалюванню вибухонебезпечної газоповітряної суміші або придушувати дифузійне горіння в одиниці захищеного об'єму. За інших однакових умов ефективність аерозольного пожежогасіння тим вища, чим вища вогнегасна здатність утвореного аерозолу, тобто чим менша питома вогнегасна витрата (масова концентрація) аерозолів.

Вогнегасна ефективність аерозолів за інших однакових умов багато в чому визначається такими показниками: ступенем перетворення вихідної маси заряду в аерозоль; газопродуктивністю; складом газової фази; хімічним і дисперсним складом твердих часток аерозолу і співвідношенням газової і твердої фаз аерозолів. У різних модифікацій аерозолів ці показники можуть істотно відрізнятися, що визначає і розходження ефективності гасіння газового полум'я.

Чим вищі такі показники, як ступінь перетворення в аерозоль, газопродуктивність, вміст  $\text{N}_2$  та  $\text{CO}_2$  в газовій фазі, дисперсність твердих часток, тим вища вогнегасна ефективність. Найбільш ефективними є тверді частинки оксидів, гідроксиду і вуглекислих солей калію. Співвідношення твердої і газової фаз (за маєю), при якому для різних рецептур утворення аерозолів забезпечується висока вогнегасна ефективність, яка становить 0,35-0,55. Зміна величини співвідношення в бік збільшення чи зменшення призводить до зниження вогнегасної ефективності аерозолу. Це зумовлене, з однієї сторони, тим, що утворена велика кількість інертних газових розріджувачів (завдяки зменшенню кількості твердих частинок) має значно більш низьку вогнегасну здатність порівнянно з твердими частками, що і визначає в цьому випадку зниження вогнегасної ефективності. З іншої сторони, збільшення виходу в аерозоль великої кількості части-

нок (через зменшення газопродуктивності) призводить до істотного збільшення їхньої концентрації, що викликає значну коагуляцію, ріст розмірів часток, осідання і в підсумку – зниження вогнегасної здатності аерозолів.

Значний вплив на ефективність гасіння дифузійного полум'я вуглеводнів різними аерозолеутворюючими складами має вміст  $O_2$  в окисному середовищі. Встановлено, що вогнегасна ефективність складів аерозолів із збільшенням вмісту  $O_2$  в захищуваному об'ємі різко знижується. Так, при збільшенні концентрації  $O_2$  з 20 до 30 %, питома вогнегасна витрата аерозолів збільшується більш ніж в 6 разів, а в разі вмісту  $O_2$  70 % ефект гасіння не досягається навіть при питомій витраті вогнегасних складів аерозолів  $2000 \text{ г/м}^3$ . В разі зменшення вмісту  $O_2$  в повітрі захищуваного об'єму відбувається зниження швидкості хімічної реакції і температури полум'я. За цих умов високодисперсні тверді частинки аерозолу більш тривалий час контактують із зоною хімічних реакцій полум'я і більш повно реалізують свої фізико-хімічні властивості (більш ефективним є інгібування ланцюгових реакцій в полум'ї, поглинання тепла із зони горіння при нагріванні, плавленні, випаровуванні і розкладанні твердих частинок та ін.), що в кінцевому рахунку і визначає високу ефективність припинення горіння.

#### 11.4. Застосування аерозолів для гасіння пожеж

Для пожежогасіння найчастіше застосовуються рецептури аерозолів з коефіцієнтом забезпеченості окисником. При цьому догорання недоокислених продуктів реакції відбувається завдяки  $O_2$  повітряного середовища захищуваного об'єму. Під час гасіння пожежі використання таких складів з масовою концентрацією аерозолів  $50+100 \text{ г/м}^3$  (вихід  $N_2$  та  $CO_2$  становить  $0,4+0,7 \text{ л/г}$ ) приводить до зниження вмісту  $O_2$  в об'ємі, що захищається, в середньому на 1-4 %.

Гасіння в умовах підвищеної початкової температури середовища і пожежного навантаження потребує більш високої витрати, тобто вогнегасної здатності засобів об'ємного гасіння з підвищенням початкової температури середовища. Дані закономірності пожежогасіння характерні і для об'ємного гасіння пожеж аерозолями. Так, якщо при нормальній початковій температурі  $0^\circ\text{C}$  питома вогнегасна витрата аерозолів становить  $30-35 \text{ г/м}^3$ , то при температурах 100, 150, 200, 250 і  $270^\circ\text{C}$  значення вогнегасної здатності зменшувалося приблизно в 1,16; 1,26; 1,35; 1,43 і 1,45 рази.

Флегматизування середовища (вентилювання всередині захи-

щуваного захищеного об'єму) при аерозольному пожежогасінні впливає на ефективність і параметри процесу гасіння. Залежність питомої вогнегасної витрати аерозолів і часу гасіння від швидкості перемішування середовища виражається кривою, близькою до параболи. Нижня екстремальна точка відповідає оптимальному режиму перемішування, при якому забезпечується гасіння пожежі мінімальною питомою витратою аерозолу за мінімальний час. З одного боку (ліва гілка параболи), перемішування середовища в об'ємі сприяє більш швидкому і рівномірному розподілу вогнегасної кількості аерозолу з мінімальними втратами його вогнегасної здатності. З іншого боку (права гілка параболи), при досить високих швидкостях перемішування відбувається зниження в часі вогнегасної здатності аерозолу в результаті коагуляції та осадження частинок на твердих поверхнях, що не може компенсуватися швидкою доставкою аерозолу у вогнище пожежі.

Наявність в приміщенні різних вбудованих конструкцій, як правило, ускладнює рівномірний розподіл аерозолу по захищеному об'єму, а отже, і гасіння пожеж (особливо в негерметичних приміщеннях). Ступінь впливу перешкод на вогнегасну здатність аерозолу і час гасіння осередків пожежі багато в чому залежить від форми, розмірів, площі і шорсткості поверхні, кількості, розподілу по перетину та об'єму вбудованих конструкцій-перешкод. Як показник, що характеризує вплив перешкод на зміну вогнегасної здатності аерозолу прийняте відношення площі "робочої" (тобто дотичної з аерозолем) поверхні вбудованих перешкод до захищеного об'єму приміщення.

Одиночні, перфоровані з великим коефіцієнтом проникності (0,6-0,8), суцільні конструкції, що перекривають поперечний переріз не більше ніж на 60 % і не створюють режимів плинину по каналах і лабіринтах, незначно впливають на зниження вогнегасної здатності аерозолу, але в ряді випадків можуть істотно (у 2-3 рази і більше) збільшувати час гасіння. У негерметичних об'ємах (при ступені негерметичності понад 0,5 %) потрібна додаткова кількість генераторів аерозолів та більш висока інтенсивність подачі аерозолу. За наявності конструкцій каналного типу із шорсткуватою поверхнею (стелажне складування, шафова апаратура і т.ін.), відбувається помітне зниження вогнегасної здатності аерозолу і збільшення часу гасіння навіть при надлишковій кількості аерозолів.

Знаведених вище даних випливає, що у реальних умовах гасіння пожежі на вогнегасну здатність аерозолів помітний вплив можуть чинити різні зовнішні фактори (вологість, рухливість, температура

середовища, вбудовані перешкоди та ін.), незнання чи неврахування яких може призвести до істотного зниження ефективності гасіння і до того, що пожежа не буде погашена. При врахуванні можливих зовнішніх впливів і правильному виборі способу і параметрів процесу подачі аерозолю досягається висока ефективність і надійність аерозольного пожежогасіння. При цьому варто враховувати, що збільшення питомих масових вогнегасних витрат аерозолів може сягати 20-40 % і більше від величини мінімальних значень, отриманих в нормальних умовах, і для більшості вуглеводневих палив питомі витрати можуть становити 40-60 г/м<sup>3</sup>.

### **Контрольні питання**

1. У чому полягає основний принцип припинення горіння аерозолями?
2. Які є механізми припинення горіння аерозолями?
3. Назвіть головну перевагу застосування при гасінні аерозолів?
4. Назвіть головні недоліки застосування при гасінні аерозолів?
5. Назвіть фактори, що впливають на вогнегасну ефективність аерозолів?
6. Які є способи застосування аерозолів для гасіння пожеж?

## РОЗДІЛ 12. ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ КОМБІНОВАНИМИ ЗАСОБАМИ

### 12.1. Принцип комбінування вогнегасних засобів

Одним з головних ознак при виборі вогнегасної речовини є оцінка ефективності її використання.

Під ефективністю застосування вогнегасних речовин розуміють їхню здатність забезпечувати ефект гасіння горючого з мінімальною витратою за мінімальний час.

При введенні вогнегасної речовини на гасіння пожежі ще до повного припинення процесу горіння виникає зниження інтенсивності протікання окисно-відновних процесів. При цьому змінюються всі параметри розвитку процесу горіння – тепловиділення хімічних реакцій, температура, теплоємність теплового потоку, швидкість підготовлених процесів термічного розкладу чи випаровування речовин.

Це явище відмічається як зменшення високого полум'я, зміною її кольору від світло-червоного чи жовтого до блідо-жовтого чи голубого. Розповсюдження полум'я продовжується, але швидкість розповсюдження розпилювання полум'я знижується. В розрахунках сил і засобів гасіння пожеж проводиться при застосуванні оперативних планів пожежогасіння, де враховується зменшенням нормативної швидкості розповсюдження полум'я вдвічі.

Ефект гасіння пожежі на практиці може бути досягнений при подачі вогнегасної речовини на гасіння практично з будь-якою, навіть мінімальною інтенсивністю, але при цьому час гасіння пожежі може бути виражений, як обернена величина до інтенсивності пожежі.

Подача вогнегасної речовини і відповідної інтенсивності на початковому етапі гасіння, дає змогу зменшити час гасіння пожежі до мінімуму, при цьому знизити площу і шкоду, завдану пожежею.

Наприклад, залежність часу гасіння деревини від інтенсивності подачі води виражається рівнянням:

$$\tau_T = \frac{Q_{y\partial(oc)}}{I_\phi - I_{опт}}$$

де  $I_{опт}$  – нормальна інтенсивність подачі вогнегасної речовини одиниці вимірювання;

$I_\phi$  – фактична ефективність подачі вогнегасної речовини;

$Q_{y\partial}$  – ділений розхід вогнегасної речовини.

Швидкість розповсюдження при подачі аерозолів змінюється і її залежність можна виразити рівнянням

$$V_e = V_t^0 \sqrt{1 - \frac{I_{\text{фак}}}{I_{\text{опт}}}}$$

де  $V_e$  – значення нормальної швидкості розповсюдження полум'я, м/хв.

З рівняння бачимо, що при зниженні інтенсивності подачі вогнегасної речовини час гасіння пожежі стає безмежно більшим, а практично це означає, що пожежа веде на етапі повного згорання горючої речовини.

Інтенсивність подачі вогнегасної речовини вибирається з малим розрахунком, щоб забезпечити гасіння в відведений нормативний час. Так залежно неправильного вибору інтенсивність подачі піни при гасінні пожеж, пінну активність припинення і повторення гасіння призводить тільки після нарощення сил і засобів, так як поступовий ввід піногенераторів призведе тільки до перерозрахунку піноутворювача.

Таким показником, який дає змогу оцінити ефективність речовини пожежогасіння, є нормативна інтенсивність подачі речовини на гасіння одиниці речовини.

Інтенсивність подачі вогнегасної речовини визначається, як відношення маси речовини до одиниці поверхності за одиницю часу:

$$I = \frac{V_{oc}}{60\tau_T \cdot P_{гас}}; \quad I = \frac{Q_{oc}}{P_{гас}}$$

де  $I$  – інтенсивність подачі вогнегасної речовини;

$P_{гас}$  – параметр гасіння (площа, об'єм, територія);

$V_{oc}$  – фактично віділений розхід вогнегасної речовини;

$\tau_{гас}$  – час гасіння, с;

$Q_{oc}$  – розхід вогнегасної речовини, л/с.

Припинення горіння на пожежі проходить практично швидко, за цим, як правило будуть створені всі умови, при яких тепловивід в навколишнє середовище є більшим за тепловиділення реакції горіння, але для створення таких умов потрібно подавати вогнегасячу суміш з відповідним масовим розходом за проміжок часу.

Подача вогнегасної речовини повинна забезпечити припинення горіння на пожежі, за так зване, розподілення часу його гасіння.

Для різних способів припинення горіння, різних речовин цей час різний. Так, розрахунковий час гасіння за способом охолодження водою і ізоляції повітряно-механічної піни – 10 хв. За способом розбавлення розпиленою водою – 1 хв, а вогнегасними порошками – 30 с.

## 12.2. Комбіновані методи підвищення вогнегасної ефективності води

Найбільшого ефекту при гасінні водою досягають, якщо вся подана вода випарується завдяки відведенню тепла від факела полум'я або від прогрітого шару палаючої горючої речовини.

Кількість тепла, яку поглинає крапля води при контакті з поверхнею матеріалу:

$$Q = \tau S_k \alpha (T_{нов.} - T_k)$$

Отже, збільшення часу і площі контакту, коефіцієнта тепловіддачі призводять до зростання кількості тепла, що відбирається вогнегасною речовиною від поверхні горіння.

Для підвищення вогнегасної ефективності води використовують два основні методи:

- зміна фізичних характеристик водяних струменів;
- хімічна модифікація властивостей водних розчинів.

Способи підвищення вогнегасної ефективності води:

1. Застосовувати розпилені і дрібнорозпилені струмені. При цьому збільшення дисперсності потоку збільшує поверхню контакту води з нагрітими газами і різко збільшує інтенсивність випаровування.

Для того щоб краплі води не відносилися потоками продуктів горіння із зони горіння, ефективний діаметр краплі води повинен бути не меншим за:

$$d_k = \frac{3C_x p_z v_{sum}^2}{4g p_k}$$

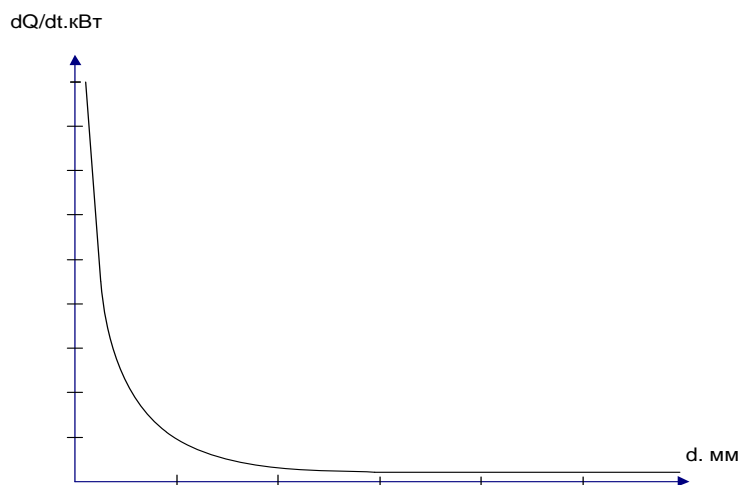
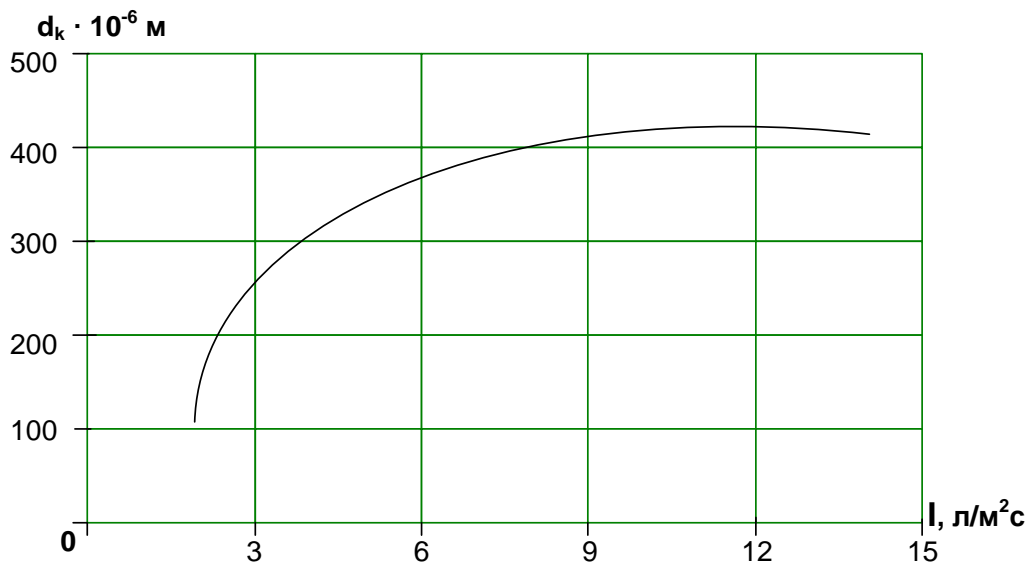


Рисунок 12.1 – Ефективний діаметр крапель води

1. Для збільшення частки води, яка встигає перейти у пару в зоні горіння, застосовують попередній підігрів води. 1 кг води під час підігріву від 20°C до 80°C забирає від зони горіння близько 250 кДж, а в процесі випаровування – 2260 кДж.

Холодна вода, пролітаючи через зону горіння, не встигає достатньо нагрітися, отже швидкість випаровування незначна.

2. Для зниження сил поверхневого натягу і підвищення здатності води проникати в шари матеріалу, що горить, необхідно використати поверхово активні речовини – змочувачі.



**Рисунок 12.2** – Залежність діаметра крапель води від інтенсивності подачі

Застосування змочувачів (2 % піноутворювачів) при гасінні волокнистих матеріалів дає змогу в двічі підвищити ефективність використання води, знизити інтенсивність подачі і кількість підрозділів, задіяних на гасінні пожеж.

Таблиця 12.1

**Параметр пожежогасіння води з добавкою та без**

Параметр пожежогасіння	Вода	
	без добавки	з добавкою
Час гасіння, с	206	90
Загальна витрата води, л	16	3,6
Питома витрата, л/м <sup>2</sup>	25	5,6
Критична інтенсивність подачі, л/м <sup>2</sup> с	0,12	0,06



4. Щоб запобігати стіканню води і збільшити дальність польоту струменів води можна додавати згущувачі, які сприяють прилипанню тонкого шару води до твердого матеріалу й утриманню його на поверхні. Крім охолоджуючої дії плівка «в'язкої» води чинить додаткову ізолюючу й екрануючу дію.

В якості загущувачів застосовують Na-КМЦ, поліакрилово кислоту (ПАК), поліокс, метилцелюлозу, полісилікат натрію, полівініловий спирт (ПВС).

5. Для зниження температури замерзання у воду додають антифризи (деякі мінеральні солі, гліколи).

6. Для досягнення ефекту хімічного гальмування реакції горіння можна використати добавки галоїдвмісних солей, наприклад NaCl. У розпиленому стані краплі води випаровуються, і солі переходять в дрібнодисперсний порошок, який гальмує реакцію горіння.

7. Підвищити вогнегасну ефективність води можна при введенні пропілентів – низькокиплячих органічних рідин. При потраплянні в зону горіння емульсії таких речовин у воді відбувається перегрів добавки, що призводить до миттєвого пароутворення пропіленту та дроблення краплі водної емульсії. Це сприяє інтенсивному випаровуванню «осколків» краплі вогнегасного засобу, а, отже, інтенсивному охолодженню парогазової фази й зриву полум'я.

Для підвищення вогнегасної ефективності води до неї додають різні добавки, найчастіше ті, що поліпшують змочувальну здатність води по відношенню до матеріалів органічного походження. Використання добавок солей до води підвищує її вогнегасну ефективність, що дає можливість досягти зменшення її витрати на гасіння.

### **12.3. Комбінування добавок з метою підвищення вогнегасної ефективності води**

Вогнегасні властивості композицій, які склалися з водних розчинів високомолекулярних речовин (загусників), змочувальника та неорганічних солей. У ролі загусників (натрієва сіль карбоксиметилцелюлози і поліакрилова кислота). Ці композиції відрізняються за своїми властивостями від розчинів індивідуальних речовин. Так, композиція, яка складається з води, загусника і змочувальника, характеризується високою в'язкістю, низьким поверхневим натягом і високою змочувальною здатністю. Вогнегасні властивості розчинів визначали за тривалістю гасіння штабеля деревини компактним струменем із постійною інтенсивністю подавання.

З додаванням 1,5% змочувальника до розчину, який містить 1,0% натрійкарбоксиметилцелюлози (в'язкість  $V = 2,7 \text{ мм}^2/\text{с}$ ) або 2,0% поліакрилової кислоти ( $\mu = 2,0 \text{ мм}^2/\text{с}$ ), вогнегасна ефективність води підвищувалась у 2,4 раза. Вогнезахисна ефективність зростала в 2,2 і 1,83 рази відповідно.

Зазвичай системи, які містять водорозчинний полімер і неорганічну сіль або водорозчинний полімер і змочувальник, мало відрізняються за вогнезахисною ефективністю від розчинів полімерів, а у випадку застосування потрібної композиції зразки деревини майже втрачають здатність до займання. Цей ефект пояснено тим, що неорганічна сіль завдяки високій в'язкості розчину довше контактує з деревиною, а змочувальник сприяє швидшому та більш повному її проникненню в пористий матеріал. Оброблені такими потрійними композиціями зразки деревини (вже у разі застосування розчинів, в'язкість яких становить (2-3)  $\text{мм}^2/\text{с}$ ), стають важкогорючими.

Результати досліджень щодо зменшення витрати води під час гасіння штабелів деревини, предметів облаштування житлової кімнати, садових будинків шляхом додавання до води солей і речовин, які набухають. В разі гасіння 20% розчином діамонійфосфату необхідна кількість вогнегасної речовини зменшується порівнянно з чистою водою до 70%, а тривалість гасіння у приміщенні – з 6,5 хв до 1,7 хв. В разі гасіння 0,5% розчином речовин, які набухають, необхідна кількість вогнегасної речовини зменшується порівнянно з чистою водою від 81 до 35 л, а тривалість гасіння – з 8 хв до 5 хв 20 с. З додаванням газових вогнегасних речовин групи галонів, а також стабілізаторів та емульгаторів до 15% розчину-піноутворювача типу “АРРР” витрата вогнегасної речовини на гасіння дизельного пального зменшується на 90%, а тривалість гасіння – з 6 хв до 32 с.

Для вогнезахисту і гасіння деревини використовують водний розчин, який містить 1-5% гідроксиду калію, 2-7% лимонної кислоти, 4-14% амонійфосфату, 4-8% карбаміду. Деревина та інші волокнисті матеріали вбирають розчин і утримують тверді компоненти після випаровування води. Для гасіння горючих рідин до вказаних компонентів додають ще 1-6% ПАР і 0,25-1% трихлоретилену.

Для вогнезахисту і гасіння пожеж твердих горючих копалин використовують таку суміш: натрієва сіль карбоксиметилцелюлози (5-10%), діамонійфосфат (10-20%), хлорид амонію (5-15%), ПАР (1-2%). Завдяки наявності у складі суміші хлориду амонію відбувається інгібування газофазових ланцюгових реакцій, а під дією ПАР знижується поверхневий натяг і покращується змочування пористих горючих матеріалів.

Використання композицій, яким притаманна висока вогнезахисна ефективність, є особливо актуальним у разі гасіння великих пожеж класу А. Досліджено вогнезахисну ефективність води, 8%-го водного розчину бішофіту і 15%-го водного розчину бентоніту під час зупинення фронту полум'я на складах лісопиломатеріалів.

Бішофіт являє собою мінерал класу галогенідів, основою його є кристалогідрат хлориду магнію  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ . Він містить домішки сполук броду (до 1%). Зовнішній вигляд – білі зернисті або волокнисті агрегати. У природі зустрічається бішофіт хомогенного та осадового походження. Він використовується як сировина для одержання магнію та його сполук.

Бентоніти – це колоїдні глини, які складаються в основному з мінералів групи монтморилоніту (шаруваті силікати  $Na(Mg,Al) \cdot [Si_4O_{10}](OH)_2 \cdot 4H_2O$ ). Вони утворюються в умовах морського дна в результаті змінювання вулканічних туфів і попелів і використовуються як відбілювальні глини, для приготування бурових розчинів та ін.

Застосування розчинів названих речовин для захисту об'єктів визнано доцільним, проте вказується, що їм притаманна висока корозійна активність, тому бажано використовувати ежекційні пристрої для введення концентрованих розчинів у рукавні лінії, минаючи насоси.

Розглянемо комбінований метод, який застосовується при гасінні пожеж нафтопродуктів в резервуарах. Для різкого зниження температури нафтопродукту спочатку в зону горіння подають тонкорозпилену воду, а потім піну.

З достовірних даних видно, що перевага комбінованого методу порівняно з гасінням тільки однією піною, починає проявлятися в тривалості пожежі, що перевищує 30 хв, коли близько поверхні нафтопродукту накопичується прогрітий гомотермічний шар достатньої товщини. Причому охолоджуюча дія піни звела до того, що температура прогрітого шару на початку знизилася з 100 до 90 °С, а потім повільно стала зростати знову. Гасіння пожежі піною в цьому випадку не було досягнуто, хоча піна покрила всю поверхню палаючого бензину.

Коли прогрітий шар бензину попередньо охолоджувався тонкорозпиленою водою до температури нижче 50 °С, то пожежа була погашена піною протягом декількох хвилин. Витрата піноутворювача при цьому скоротилася приблизно в два рази порівняно з витратою при гасінні однієї піною.

Комбіноване застосування різних видів вогнегасних речовин в окремих випадках дає можливість реалізувати переваги, властиві

кожному з них. Як приклади можна призвести одночасне подавання води і вогнегасного порошку одним пожежним стволом, генерування повітряно-механічної піни з використанням газової вогнегасної речовини (наприклад, діоксиду вуглецю) замість повітря, а також об'єднання водного розчину плівкоутворювального піноутворювача і газової вогнегасної речовини, яка в звичайних умовах знаходиться в рідкому стані, в одному складі (такі композиції називають термоспінювальними). Одночасне подавання вогнегасного порошку і води може забезпечити інгібування реакцій горіння та охолодження палаючих речовин і матеріалів, а подавання піни, одержаної з використанням газової вогнегасної речовини – охолодження та ізоляцію палаючої поверхні з одночасним розбавленням газового середовища, в якому і відбуваються реакції горіння.

#### **12.4. Застосування поверхневоактивних речовин з метою підвищення вогнегасної ефективності води**

Найчастіше водою доводиться гасити тверді органічні матеріали, які погано змочуються нею. Під змочуванням розуміють поверхневе явище, яке виникає під час контакту рідини з твердим тілом. Воно проявляється у розтіканні рідини твердою поверхнею, просочуванні пористих тіл та порошоків, утворенні меніску. Характер цього явища визначається перш за все фізико-хімічними процесами на поверхні розділу фаз, які беруть участь у змочуванні.

Вода змочує поверхню більшості твердих органічних матеріалів лише частково, а частково проходить углиб матеріалу завдяки механічній дії струменя. Погане змочування цих матеріалів зумовлене високим значенням поверхневого натягу води. Відомо, що чим більше відрізняються за своєю полярністю дві речовини, тим більший поверхневий натяг на межі між ними, і тим гірше змочування. Натомість, у разі контакту речовин з близькими величинами полярності досягається ефективно змочування (правило вирівнювання полярностей). Згідно з цим правилом, зниження поверхневого натягу рідини приводить до покращення змочування. Знизити поверхневий натяг води можна додаванням до неї невеликих кількостей поверхневоактивних речовин (ПАР). Внаслідок концентрування малополярних молекул таких речовин на межі розділу фаз знижується поверхневий натяг сильнополярної води. Зазвичай введення ПАР приводить не тільки до покращення змочування, а й до збільшення швидкості розтікання рідини твердою поверхнею. Розтіканням називають

довільний процес плинину рідини твердою поверхнею, який відбувається завдяки зменшенню вільної енергії системи.

Усі ПАР поділяють на дві великі нерівноцінні за значенням групи: дійсно розчинні у воді та колоїдні (милоподібні). До першої групи належать речовини, молекули яких містять недостатньо гідрофільні групи (спирти, аміни) або недостатньо розвинені вуглеводневі радикали (нижчі жирні кислоти та їх солі). Практичного значення для гасіння пожеж вони не мають. Молекули колоїдних ПАР містять розвинені вуглеводневі радикали і сильно гідрофільні полярні групи; гідрофільні та гідрофобні властивості їх збалансовані. Поряд з поверхневою активністю вони здатні до утворення колоїдних агрегатів-міцел в об'ємі розчину, а в деяких випадках і міцелоподібних сіткуватих структур в адсорбційних шарах. Поєднання здатності до міцелотворення з високою поверхневою активністю обумовлює цілу низку типових властивостей колоїдних ПАР: здатність до сольобілізації, високу ефективність їх стабілізуючої, емульгуючої, змочувальної та мийної дії. Колоїдні ПАР зазвичай характеризуються високою поверхневою активністю і здатні значно знижувати поверхневий і міжфазовий натяг навіть у дуже розведених розчинах завдяки адсорбції та певній орієнтації

Із молекул (іонів) на поверхні розділу. Вплив поверхневоактивних речовин на змочування підсилюється в гомологічних рядах із збільшенням довжини вуглеводневого ланцюга, а також зі збільшенням асиметрії в будові молекули. Тому здатність покращувати змочування звичайно підсилюється з переходом від мета- до орто- і особливо до парапохідних ароматичних сполук.

Збільшення кількості полярних груп у молекулі ПАР призводить до зменшення її асиметрії і зниження змочувальної здатності. Знаючи ці закономірності, можна цілеспрямовано підбирати потрібні речовини. Додаванням електролітів до розчинів іоногенних змочувальників стимулюється адсорбція ПАР з розчинів і підсилюється змочувальна дія. Цей вплив зумовлений в основному іонами, протилежними за знаком довголанцюговим іонам змочувальника. Тому введення неорганічних солей у розчини іоногенних поверхневоактивних речовин є одним з методів підвищення змочувальної здатності.

Додавання до води невеликих кількостей (0,1-2%) колоїдних ПАР приводить до суттєвих змін деяких її властивостей. Розчини цих речовин характеризуються низьким поверхневим натягом, високою змочувальною здатністю, деякі придатні до утворення повітряно-механічної піни. Завдяки властивостям, яких набуває вода після роз-

чинення колоїдних ПАР, підвищується її вогнегасна ефективність. Якщо поверхня не змочується рідиною, то площа контакту між ними дуже мала. Зниження поверхневого натягу рідини приводить до збільшення площі контакту рідини і твердої поверхні, внаслідок чого покращується змочування.

Зниження поверхневого натягу є необхідною, але не достатньою умовою досягнення ефективного змочування; необхідно підібрати поверхневоактивну речовину, споріднену з поверхнею, яка змочується. Підбір змочувальників здійснюється емпірично, згідно з методикою. Разом з тим необхідно, щоб значення поверхневого натягу розчинів не перевищувало 37 мН/м.

Змочувальна здатність розчину впливає на швидкість його розтікання, від якої у свою чергу залежить ефективність гасіння. Найбільша швидкість розтікання спостерігається за концентрацій змочувальників, які дещо відрізняються від визначених як оптимальні, згідно з методикою. Швидкість розтікання розчинів змочувальників значно перевищує швидкість розтікання чистої води. Внаслідок цього матеріал охолоджується швидше, а завдяки низькому поверхневому натягу відбувається більш інтенсивне проникнення вогнегасної речовини у пори малополярного органічного матеріалу. Як результат вогнегасна ефективність розчину значно підвищується.

Важливою перевагою розчинів ПАР як вогнегасних речовин є надійність гасіння. Досвід гасіння пожеж гідрофобних матеріалів і такими розчинами свідчить, що повторне займання майже ніколи не спостерігається, тоді як гасіння водою без добавок часто супроводжується повторним займанням (особливо чітко це відзначено під і час гасіння пожеж на торфовищах). Гасити розчинами змочувальників ("микрою водою") можна всі матеріали, які гасять звичайною водою. Особливо ефективним є використання розчинів змочувальників для гасіння пожеж целюлозних матеріалів (паперу, тканин, бавовни тощо). Концентрація ПАР у воді може відрізнитися від оптимальної, визначеної в лабораторних умовах, зокрема в разі гасіння волокнистих матеріалів. Вона має бути підвищена в 1,3-2 рази порівняно з останньою (для визначення необхідної концентрації проводять серії вогневих випробувань). Застосування "микрої води" у багатьох випадках дає змогу прискорити гасіння пожеж і значно зменшити збитки від них.

Компанією Ansul Fire Protection (США) виробляється ефективний змочувальник для гасіння лісових пожеж торговельної марки Sikvex. Згідно з наведеними даними, завдяки застосуванню цього

змочувальника ефективність використання води збільшується у 5 разів, він може застосовуватись із солоною водою, не забруднює навколишнє середовище.

Для гасіння твердих і рідких горючих матеріалів (у т. ч. гасу, бензину, органічних розчинників) замість пін і вогнегасних порошків пропонується суміш водного екстракту попелу рослинних матеріалів з поверхневоактивними речовинами.

Розроблено рецептуру змочувальника для гасіння пожеж класів А і В, а також пилу. В концентрованому водному розчині змочувальника міститься не менше 100 г/л карбонату калію і 0,5-2% алкілсульфатів калію фракції С12-С18. Концентрований змочувальник характеризується значеннями поверхневого натягу 25 мН/м, водного показника (рН) – не менше 12<sup>0</sup>С температури замерзання – не вище мінус 20<sup>0</sup>С, а також незначною корозійною дією на звичайну вуглецеву сталь.

Для гасіння лісових пожеж використовують вогнегасну композицію ОС-5, яка містить 62-75% діамонійфосфату, 23-35% карбаміду, 2-3% сульфанола (у перерахунку на суху речовину), з додаванням 0,5-1,5% барвника кислотного червоного. Для гасіння пожеж готують 12,5-15% водні розчини цієї композиції.

### **12.5. Застосування водорозчинних полімерів з метою підвищення вогнегасної ефективності води**

Інша властивість води, яка обумовлює відносно невисоку її вогнегасну ефективність – низька в'язкість. Завдяки цій властивості вода швидко стікає з поверхні матеріалу, на який її нанесено. Послаблення такого ефекту можна досягти шляхом введення невеликих кількостей загусників – водорозчинних полімерів, наприклад, ефірів целюлози. За величиною поверхневого натягу розчини полімерів ("в'язка вода") майже не відрізняються від води без добавок, тому додавання доводи водорозчинних полімерів практично не впливає на її змочувальну здатність. Випробування з гасіння штабелів деревини компактними струменями водних розчинів показали, що найбільше підвищення вогнегасної ефективності спостерігається у випадку, коли в'язкість розчинів становить (2-5) мм<sup>2</sup>/с.

За більших значень в'язкості процес розтікання уповільнюється, відбувається гасіння лише у верхній частині штабеля, на яку подається розчин, тоді як у нижчих частинах горіння триває.

В'язкість є характеристикою сил взаємодії між молекулами рідини: чим вона більша, тим сильніша взаємодія. Підвищення в'язкості приводить також до посилення взаємодії між молекулами рідини і твердої речовини, з якою вона контактує. Це зумовлює зменшення швидкості стікання води і, як наслідок, збільшення її вогнегасної ефективності. Остання залежить не тільки від в'язкості розчину, а й від природи водорозчинного полімеру.

Ефективність дії добавок оцінюють за співвідношенням тривалості гасіння штабелів деревини водою і досліджуваним розчином. В результаті досліджені полімери розділяють на дві групи. До першої віднесено поліакрилову кислоту, поліакриламід і полівіншпіролідон – водорозчинні полімери, додавання яких до води спричинило незначне підвищення її вогнегасної та вогнезахисної ефективності. До другої групи віднесено метилцелюлозу, натрійкарбоксиметилцелюлозу, полісилікат натрію, які підвищували вогнегасну ефективність води у 1,5-2 рази за умов застосування розчинів, в'язкість яких становила (2-5) мм<sup>2</sup>/с. Найбільший ефект спостерігався у випадку використання розчинів полісилікату натрію в'язкістю близько 2 мм<sup>2</sup>/с і розчинів метилцелюлози в'язкістю 3 мм<sup>2</sup>/с. Застосування першого розчину приводило до утворення на поверхні деревини покриття діоксиду кремнію, яке захищало штабель від займання під час спроби повторного запалювання. Високу ефективність розчинів метилцелюлози пояснено тим, що з усіх досліджених полімерів вона за своєю будовою найбільш близька до клітковини, яка є основою деревини. У цьому випадку сили адгезії найбільш близькі за величиною до сил когезії, що сприяє утриманню розчину на поверхні. Крім того, підвищена температура спричиняє гелеутворення метилцелюлози, в результаті якого стікання розчину уповільнюється.

Добавки полімерів другої групи, які чинять значний позитивний вплив на вогнегасну ефективність води, також суттєво покращують її вогнезахисні властивості.

Виходячи з результатів роботи і враховуючи кореляцію між вогнегасною та вогнезахисною ефективністю “в'язкої води”, до полімерів, які доцільно використовувати для гасіння пожеж твердих матеріалів, слід віднести натрійкарбоксиметилцелюлозу, полісилікат натрію та аміфлок (потрійний співполімер акриламід, акрилової кислоти і натрієвої солі акрилової кислоти). Після нанесення на деревину розчинів цих полімерів, в'язкість яких становила (400-500) мм<sup>2</sup>/с, вона ставала важкогорючою. Добавки поліакриламід, поліоксіетилену, полівінілового спирту і полівінілпіролідону підвищували вогнезахис-



ну ефективність води незначно, тому їх використання визнано недоцільним. Крім метилцелюлози, позитивний вплив на вогнегасну ефективність води можуть справляти інші ефіри целюлози: оксипропілцелюлоза, метилоксипропілцелюлоза, оксіетилцелюлоза.

Слід зазначити, що як вогнегасна речовина вода має також властивості, що обмежують область її застосування. Так, водою не можна гасити об'єкти, устаткування під напругою, оскільки вода є електропровідною. Вода вступає в хімічну реакцію з лужними, лужноземельними металами, їх карбідами в результаті чого виділяється значна кількість тепла та горючих газів, що може призвести до вибухів та збільшення пожежі. Не можна гасити водою легкозаймисті рідини, що мають меншу ніж у води густину (бензин, гас, толуол та ін.), оскільки вони спливають та продовжують горіти на поверхні води, збільшуючи тим самим осередок пожежі. По пливці ЛЗР, що розтеклася на поверхні води, пожежа може поширитись на значну відстань. Окрім того, вода може викликати значне псування деяких матеріалів, тому її не можна використовувати для гасіння цінного устаткування, бібліотек, музеїв і т. п.

## **12.6. Застосування неорганічних солей з метою підвищення вогнегасної ефективності води**

Ще один спосіб підвищення вогнегасної ефективності води – додавання до неї неорганічних солей, які можуть використовуватися як антипірени, тобто знижувати здатність до горіння деревини і пластмас, тканин та інших твердих матеріалів органічного походження.

Існує декілька теорій, які пояснюють вогнезахисну дію солей на деревину. Згідно з газовою теорією, вогнезахист матеріалу відбувається в результаті виділення водяної пари, діоксиду вуглецю, галогеноводнів тощо внаслідок термічного розкладу солей. Згадані гази розводять леткі легкозаймисті продукти піролізу, що приводить до зменшення інтенсивності горіння. Інша теорія припускає утворення на поверхні матеріалу склоподібного шару (розплаву), який запобігає доступу кисню до його поверхні. Термічна теорія пояснює вогнезахист здатністю солей відводити тепло, яке виходить із зони горіння, з такою самою швидкістю, з якою воно надходить до горючого матеріалу.

Стосовно целюлозних матеріалів найбільш поширеною є теорія каталітичної дегідратації. В разі нагрівання целюлозних матеріалів вже за температури близько 120 °С починається утворення кислих продуктів розкладу целюлози, які каталізують руйнування. Наявність

такого автокаталізу приводить до того, що вже на початкових стадіях термообробки целюлози відбувається її гідроліз, який веде до зниження ступеня полімеризації. За температур (200-220) °С починаються реакції дегідратації, завдяки яким, з одного боку, підвищується термічна стійкість проміжних продуктів розкладу, а з іншого – пригнічуються реакції деполімеризації.

Введення у целюлозні матеріали деяких солей сприяє дегідратації целюлози з утворенням значної кількості карбонізованого залишку. Підвищення виходу коксу приводить до зменшення кількості теплоти, що виділяється у процесі горіння, а отже до пригнічення процесів займання і поширення полум'я, дегідратація целюлози каталізується деякими речовинами, які виділяються під час термічного розкладу солей.

У ролі таких солей можуть використовуватись солі лужних, лужноземельних металів і амонію. Більшість із них добре розчинні у воді й можуть бути застосовані у вигляді концентрованих розчинів. Це такі солі, як моно-, ди-, та поліфосфати амонію, сульфат, оксалат, хлорид амонію, хлорид, фторид, гідрокарбонат натрію, бромід калію, фторид іхтію, хлорид барію та ін. Всі ці солі характеризуються великими значеннями теплоти утворення і тому внаслідок термічного розкладу поглинають значну кількість тепла, що виділяється у процесі горіння.

Підвищення вогнегасної здатності води досягається також у випадку додавання до неї хлориду магнію 2,5-20%, ортофосфорної кислоти та солей, які виділяють її під час гідролізу. Тривалість гасіння значно зменшується з додаванням у воду 2% бури і 0,32% борної кислоти, вогнезахисна дія яких зумовлена утворенням плівки на поверхні деревини і хімічною взаємодією з компонентами деревини. У випадку гасіння розчинами, які містять 20% фосфату амонію, гідрофосфату амонію або хлориду магнію, коефіцієнт підвищення вогнегасної ефективності дорівнює трьом.

З додаванням хлориду натрію тривалість гасіння полум'я зменшується від 185 с (чиста вода) до 165 с (5% розчин) і 101 с (25% розчин). Тривалість гасіння жарин зменшується в меншій мірі. В разі додавання розчину, який містить 20-25% хлориду натрію, висота полум'я різко зменшувалася за 3-5 с. Цей ефект пояснено інгібуванням горіння сіллю, що виділяється з розчину під час проходження краплин крізь полум'я.

Дослідження ефективності вогнегасних речовин (прісна вода, 20% водний розчин сульфату амонію, 5% та 20% водні розчини діамонійфосфату) у випадку гасіння пресшлаку. Процес гасіння відбувається у дві стадії. На першій стадії з витратою однієї третини необ-

хідної кількості вогнегасної речовини відбувається придушення горіння, а на другій стадії – охолодження, внаслідок чого виключається повторне займання. На першу стадію гасіння речовини витрачаються приблизно в однакових кількостях. На охолодження витрачається більше вогнегасної речовини, ніж на придушення горіння. Кількість витраченої, вогнегасної речовини найменша в разі застосування 5% або 20% водних розчинів діамонійфосфату.

Вогнегасна рідина, яка придатна для гасіння твердих горючих матеріалів. У процесі гасіння здійснюється запобігання розвитку пожежі, оскільки на зрошуваній поверхні поряд з вогнищем утворюється вогнезахисне покриття, Одночасно з гасінням осаджуються легкі продукти згоряння. Рецептатура вогнегасної рідини складається з водних розчинів цитрату лужного металу і гідроксиду калію. Концентрація цитрату у вихідному розчині має становити від 10% до концентрації насичення. За необхідності у вогнегасну рідину додають ПАР та інгібітори корозії.

Запропоновано склад водного розчину для гасіння фосфору і металів. Для приготування 1 л такого розчину необхідно 86 г  $\text{CaCl}_2$ , 50 г  $\text{MgCl}_2$ , 32 г  $\text{K}_2\text{SO}_4$ , 30 г  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , 20 г  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ , а також  $\text{NaOH}$  до рН 7-8. Густина розчину становить  $1,86 \text{ г/см}^3$  за температури  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , морозостійкість – до мінус  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Для гасіння лісових пожеж до води додають добавки – карбоксиметилцелюлозу, фосфати амонію та інші. В цьому випадку виникає проблема зменшення корозійної активності й під тримання вогнегасної ефективності розчинів під час їх зберігання. Для цього до розчинів додають 0,008-0,01% ксантену – натурального полісахариду, який отримують шляхом екстракції з морських водоростей. Він нетоксичний і не справляє подразнювальної дії.

З метою підвищення ефективності гасіння пожеж і придушення вибухів використовують воду з добавками гідрокарбонатів і хлоридів лужних металів – натрію або калію. У разі горіння бензину у макетному вогнищі розміром  $0,6 \text{ м} \times 0,6 \text{ м}$  за допомогою стандартного водяного вогнегасника, робочий тиск у якому становить 400 кПа, гасіння завершується протягом 7,4 с, а за умови додавання до води хлориду калію або гідрокарбонату калію цей проміжок часу зменшується в середньому на 2 с і 3 с відповідно. Для придушення вибухів газоповітряних сумішей тиск, під яким подаються розчини вказаних речовин, може бути збільшений до 10 МПа. Концентрація добавок має бути близькою до концентрації насичення.

**Контрольні питання**

1. У чому полягає основний принцип комбінування вогнегасних засобів для припинення горіння?
2. Які є методи підвищення вогнегасної ефективності води?
3. Назвіть головні переваги застосування комбінацій добавок з метою підвищення вогнегасної ефективності води.
4. Назвіть головні недоліки поверхневоактивних речовин з метою підвищення вогнегасної ефективності води.
5. Назвіть головні переваги застосування неорганічних сполук з метою підвищення вогнегасної ефективності води.
6. Назвіть головні переваги застосування водорозчинних полімерів з метою підвищення вогнегасної ефективності води.

**Література:**

1. ДСТУ 2272:2006. Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять.
2. Кодекс цивільного захисту України
3. Лавренюк О.І., Баланюк В.М., Михалічко Б.М. Теорія горіння та вибуху. – Львів, ВОНДРВР ЛДУ БЖД, 2014. – 130 с.
4. Єлагін Г.І., Шкарабура М.Г., Кришталь М.А., Тищенко О.М. Основи теорії розвитку і припинення горіння. – Черкаси: ЧШБ, 2001. – 448 с.
5. Лавренюк О.І., Баланюк В.М. Теорія розвитку та припинення горіння. – Львів: ВОНДРВР ЛДУ БЖД, 2013. – 132 с.
6. Демидов П.Г. Основы горения веществ. – М: И-во МКХоз РСФСР, 1951. С. 175-195, 213-215.
7. Демидов П.Г., Саушев В.С. Горение и свойства горючих веществ. – М: Высшая инженерная пожарно-техническая школа МВД СССР, 1975. С. 5-18.
8. Абдурагимов И.М., Андросов А.С., Исаева Л.К., Крылов Е. В. Процессы горения. - М: Высшая инженерная пожарнотехническая школа МВД СССР, 1984. С. 14-17, 58-61.
9. Баланюк В.М. Вдосконалення аерозольної вогнегасної речовини на основі солей Калію. канд. дис. Львів, 2007 р.

*Навчальне видання*

**Ємельяненко С.О., Лавренюк О.І., Михалічко Б.М.**

## **ТЕОРІЯ ГОРІННЯ ТА ВИБУХУ**

**Пожежі та їх ліквідація**

**Навчальний посібник**

Літературний редактор **Галина Падик**  
Друк на різнографі **Маріанна Климус**

Підписано до друку 25.02.2019 р.  
Формат 60×84/16. Гарнітура Times New Roman.  
Друк на різнографі. Папір офсетний. Наклад: 100.  
Ум. друк. арк. 10.

Друк ЛДУ БЖД  
79007, Україна, м. Львів, вул. Клепарівська, 35  
тел./факс: (032) 233-32-40, 233-24-79  
e-mail: mail@ubgd.lviv.ua, ubgd@i.ua