

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ**

**ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ РОЗВИТКУ  
ТА ГАСІННЯ ПОЖЕЖ ГОРЮЧИХ РІДИН**

**Навчальний посібник**

Рекомендовано до друку і використання в освітньому процесі  
вченою радою НУЦЗ України

**Харків 2023**

Авторський колектив:

Д.Г. Трегубов, кандидат технічних наук, доцент – глави 1, 5;  
І.Ф. Дадашов, доктор технічних наук, професор – глави 4, 7;  
Н.В. Мінська, доктор технічних наук, доцент – глава 2;  
Ю.К. Гапон, кандидат технічних наук – глава 6;  
М.А. Чиркіна-Харламова, кандидат технічних наук, доцент – глава 3

**Рецензенти:** доктор технічних наук Литвиненко В. В., директор Інституту електрофізики і радіаційних технологій Національної академії наук України;  
доктор технічних наук, доцент Кустов М. В., начальник наукового відділу з проблем цивільного захисту та техногенно-екологічної безпеки Національного університету цивільного захисту України.

Рекомендовано до друку і використання в освітньому процесі  
вченою радою НУЦЗ України  
(протокол від 17.05.2023 № 10)

**Трегубов Д.Г.**

Фізико-хімічні основи розвитку та гасіння пожеж горючих рідин:  
навч. посіб. / Д. Г. Трегубов, І. Ф. Дадашов, Н. В. Мінська, Ю. К. Гапон,  
М. А. Чиркіна-Харламова. – Х.: НУЦЗУ, 2023. – 229 с.

У навчальному посібнику докладно розглянуто особливості процесів виникнення, розвитку та припинення горіння рідин. Різноманітність процесів, які супроводжують розвиток горіння рідин, дозволила залучити до розгляду більшість питань, що входять до складу навчальних програм з вивчення дисциплін «Теорія розвитку та припинення горіння» і «Теорія горіння та вибуху» у в галузях знань 26 «Цивільна безпека» та 16 «Хімічна та біоінженерія». У навчальному посібнику узагальнено відомості щодо умов виникнення пожежної небезпеки рідин, умов та режимів виникнення горіння рідин, особливостей розвитку пожеж рідин, у тому числі масштабних, можливостей сучасних та перспективних методів гасіння пожеж рідин, а також методики розрахунку відповідних параметрів.

Рівень викладення матеріалу навчального посібника дозволяє використовувати його у навчальному процесі для здобувачів вищої освіти, для здобувачів наукового ступеня доктора філософії, а також для практичних фахівців, які працюють у сферах пожежної безпеки та цивільного захисту.

УДК 614.841

© Трегубов Д. Г., Дадашов І. Ф.,  
Мінська Н. В., Гапон Ю. К.,  
Чиркіна-Харламова М. А., 2023  
© НУЦЗУ, 2023

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	6
<b>РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ РІДИН</b> .....	7
1.1 Особливості та режими горіння рідин.....	9
Розрахунок адіабатичної температури горіння .....	18
Розрахунок температури та максимального тиску вибуху .....	19
1.2 Утворення вибухонебезпечного пароповітряного середовища за умов зберігання рідин на відкритому та у закритому просторі .....	20
1.3 Розрахунок тиску насиченої пари.....	24
Визначення пожежної небезпеки умов зберігання горючих рідин за тиском насиченої пари.....	27
1.4 Розрахунок температурних меж поширення полум'я (ТМПП).....	27
Визначення пожежної небезпеки умов зберігання горючих рідин з використанням параметру «ТМПП» .....	31
1.5 Розрахунок температури спалаху .....	33
Визначення пожежної небезпеки рідини за її температурою спалаху .....	35
1.6 Види виникнення горіння рідин.....	36
Визначення схильності жиру до хімічного самозаймання на повітрі за йодним числом .....	46
Розрахунок стандартної температури самоспалахування речовини за середньою довжиною молекули.....	47
Розрахунок можливості вимушеного запалювання .....	49
<b>РОЗДІЛ 2. РОЗВИТОК ПОЖЕЖ ГОРЮЧИХ РІДИН</b> .....	51
2.1 Загальні поняття про розвиток пожеж.....	51
Розрахунок температури пожежі в огороженні та висоти нейтральної зони пожежі класу «В» з використанням номограм .....	61
2.2 Загальні поняття розвитку пожеж горючих рідин .....	65
2.3 Горіння пароповітряної суміші на відкритому просторі .....	68
2.4 Вигорання рідин під час пожежі. Явища скипання та викиду .....	74
2.5 Горіння рідини, що фонтанує .....	77
Розрахунок безпечної відстані від факелу фонтану .....	80
<b>РОЗДІЛ 3. ОСОБЛИВОСТІ РОЗВИТКУ ТА ЗАПОБІГАННЯ МАСШТАБНИМ ПОЖЕЖАМ НА ПІДПРИЄМСТВАХ</b> .....	83
3.1 Розвиток масштабних пожеж на підприємствах.....	83
3.2 Методи визначення характеристик каскадного розвитку пожежі .....	90
3.3 Захист від каскадного розвитку пожежі .....	92
<b>РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНКИ ЛОКАЛЬНИХ СЦЕНАРІЇВ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖІ НА ПІДПРИЄМСТВІ</b> .....	97
4.1 Основні способи зберігання горючих рідин.....	97
4.2 Основні пожежовибухонебезпечні об'єкти підприємств .....	97
4.3 Математичний опис локальних процесів під час пожеж класу «В» .....	99
4.3.1 Витікання горючої рідини з резервуара в обвалування.....	99
4.3.2 Розтікання горючої рідини за повного руйнування резервуара .....	99
4.3.3 Випаровування горючої рідини з вільної поверхні .....	100
4.3.4 Випромінювання під час полум'яного горіння на поверхні рідини.....	102

4.3.5 Факельне горіння рідини, що фонтанує .....	102
4.3.6 Утворення пароповітряної хмари .....	102
4.3.7 Вибух ємності з легкозаймистою або горючою рідиною .....	103
4.3.8 Згоряння пароповітряної хмари у режимі спалаху .....	104
4.3.9 Згоряння пароповітряної хмари у режимі вогненної сфери .....	104
4.4 Алгоритм визначення основних характеристик пожежі або вибуху .....	105
4.5 Порядок визначення основних характеристик каскадної пожежі .....	107
4.6 Приклад захисту підприємства від каскадного розвитку пожежі .....	108
4.6.1 Характеристика небезпечних об'єктів хімічного підприємства .....	108
4.6.2 Розташування та визначення розмірів захисного екрана .....	110
4.7 Раціональне розташування засобів обмеження каскадної пожежі .....	112
4.8 Рекомендації керівнику гасіння пожежі щодо використання сил та засобів за наявності захисних екранів для обмеження каскадної пожежі .....	114
4.9 Оцінка ефективності прогнозування заходів з обмеження каскадного розвитку пожежі на прикладі пожежі на типовому підприємстві .....	115
<b>РОЗДІЛ 5. ОСНОВИ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ ГОРЮЧИХ РІДИН.....</b>	<b>119</b>
5.1 Загальні поняття про гасіння пожеж .....	119
5.2 Гасіння пожеж рідин розбавляючими вогнегасними засобами .....	126
Розрахунок параметрів флегматизації негорючим газом .....	130
5.3 Гасіння пожеж рідин охолоджуючими вогнегасними засобами .....	131
5.3.1 Гасіння полум'я шляхом охолодження зони горіння .....	132
5.3.2 Гасіння шляхом охолодження поверхні конденсованої горючої речовини ...	134
Розрахунок припинення горіння охолоджуючими вогнегасними засобами ..	137
5.4 Гасіння пожеж рідин ізолюючими вогнегасними засобами .....	138
5.5 Моделювання ізолюючих властивостей шарів речовини для обмеження випаровування горючих рідин у навколишній простір .....	144
Розрахунки параметрів гасіння пожеж рідин за допомогою пін .....	148
5.6 Гасіння пожеж рідин інгібуючими вогнегасними засобами .....	150
5.7 Можливість потрапляння частинки вогнегасної речовини у полум'я .....	152
<b>РОЗДІЛ 6. РОЗВИТОК СИСТЕМ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ РІДИН У РЕЗЕРВУАРАХ.....</b>	<b>154</b>
6.1 Гасіння пожеж рідин вогнегасними пінами .....	156
6.1.1 Практичні аспекти гасіння пожеж рідин пінами .....	156
6.1.2 Екологічні особливості пінного пожежогасіння .....	159
6.1.3 Стаціонарні установки пожежогасіння резервуарів із горючими рідинами ..	161
6.1.4 Мобільні засоби пожежогасіння резервуарів .....	163
6.2 Гасіння пожеж класу «В» водою, водними розчинами та іншими засобами пожежогасіння охолоджуючої дії .....	164
6.3 Гасіння пожеж горючих рідин вогнегасними порошками та газовими складами інгібуючої дії .....	166
6.4 Комбіновані методи гасіння горючих рідин .....	167
6.5 Порівняльна характеристика різних видів вогнегасних засобів гасіння пожеж класу «В» .....	170
6.6 Вимоги до вогнегасних систем для гасіння пожеж класу «В» .....	173

<b>РОЗДІЛ 7. ГАСІННЯ ПОЖЕЖ КЛАСУ «В» ПЛАВУЧИМИ ВОГНЕГАСНИМИ СИСТЕМАМИ ПОДОВЖЕНОЇ ДІЇ</b> .....	176
7.1 Достатність плавучості ізолюючих вогнегасних засобів .....	176
7.2 Ізолюючі властивості гелів під час гасіння пожеж класу «В» .....	178
7.3 Ізолюючі властивості зернистих негорючих плавучих матеріалів за умов гасіння пожеж класу «В» .....	182
7.4 Внесок охолоджуючої дії піноскла у гасіння пожеж класу «В» .....	191
7.5 Рекомендації з гасіння пожеж рідин бінарною системою «піноскло+гель» .....	192
<b>ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ</b> .....	195
<b>ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК</b> .....	201
<b>ЛІТЕРАТУРА</b> .....	204
<b>ДОДАТКИ</b> .....	208

## ВСТУП

Пожежі здавна завдають значних матеріальних та моральних збитків як людству, так і природі взагалі. З розвитком технічної оснащеності людства, незважаючи на вдосконалення протипожежних заходів, кількість пожеж та збитки від них лише зростають. Горіння рідин серед існуючих класів пожеж відрізняється можливістю виникнення відразу масштабної пожежі, стрибкоподібного розвитку подій та вибухів, характеризується тривалістю та складністю гасіння, причому як сама пожежа, так й застосовані засоби пожежогасіння завдають значної шкоди довкіллю.

У навчальному посібнику викладено сучасні погляди на процеси виникнення, розвитку процесів горіння та гасіння пожеж рідин. Основним джерелом виникнення небезпечних факторів під час пожежі є процес горіння. Тому знання фізичних і хімічних закономірностей виникнення і припинення горіння є визначальними для вирішення завдань запобігання й ліквідації надзвичайних ситуацій, пов'язаних із поширенням пожеж. Особливо небезпечними є пожежі горючих рідин, оскільки вони пов'язані з небезпекою аварійного розливу та одночасного стрибкоподібного збільшення площі пожежі.

Розглянуто питання основ та виникнення горіння, параметрів пожежної безпеки, особливостей поширення горіння та вигорання рідин, сценаріїв розвитку пожеж, а також теоретичних, практичних та перспективних методів гасіння. Знання закономірностей горіння рідин пов'язане з дослідженням виникнення та розвитку їх горіння, умов вибухонебезпечності та розвитку полум'яного горіння по поверхні, припинення горіння з використанням різних механізмів пожежогасіння та вогнегасних засобів.

Вивчення процесів горіння, і для рідин у тому числі, передбачає використання наукових відомостей та закономірностей з різних областей фізики, хімії, термодинаміки та теплопередачі, а також – практичного досвіду працівників Державної служби з надзвичайних ситуацій.

Знання, що стосуються процесів розвитку горіння та їх припинення, будуть корисними під час засвоєння таких дисциплін як «Пожежна тактика», «Пожежна профілактика в населених пунктах», «Пожежна автоматика» тощо.

Дослідження фізико-хімічних основ розвитку та припинення горіння рідин дозволяє усвідомити взаємозв'язок між показниками їх пожежної безпеки, процесами горіння та гасіння. Це дозволяє оцінювати можливість виникнення пожежі, характеризувати параметри розвитку пожежі, керувати процесами горіння та гасіння.

У навчальному посібнику узагальнено матеріали сучасної методичної та наукової літератури у сфері пожежної безпеки, а також викладено результати власних наукових досліджень авторів даного навчального посібника.

## РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ РІДИН

Речовини та матеріали, властивості яких сприяють виникненню та розвитку пожежі, відносять до *пожежонебезпечних*. Ступінь та характеристики пожежної небезпеки залежать від агрегатного стану речовини. Під час класифікації речовин до газів відносять ті, тиск насиченої пари яких за 50 °С перевищує 300 кПа, до рідин – речовини з температурою плавлення (краплепадіння) менше за 50 °С, до твердих – речовини з температурою плавлення або розкладання – більше за 50 °С та ті, які не мають цих температур (деревина, коксові залишки). Тому якщо речовина стала рідкою після нагріву більше, ніж до 50 °С, то вона є не рідиною, а лише знаходиться у рідкому стані. Тобто найменшою температурою існування рідини (або речовини у рідкому стані) є *температура плавлення*  $t_{пл}$ ; найбільшою – *температура кипіння*  $t_{кип}$ , див. рис. 1.1 та 1.2. За  $t_{кип}$  тиск пари зрівнюється з атмосферним і пароутворення відбувається легше. В деякому сенсі – це працює як клапан, який спрацював: якщо збільшити інтенсивність надходження енергії до речовини, яка закипіла, то *інтенсивність випаровування* збільшиться, але температура залишиться тією самою, за якої створюється тиск, рівний зовнішньому. Відповідно якщо зміниться зовнішній тиск – зміняться усі характерні температури фазових перетворень речовини, а також температури, які характеризують пожежну небезпеку рідини або рідкого стану речовини.

Велика кількість речовин за температур доквілля перебуває у рідкому стані. Багато з них здатні займатися і горіти; в першу чергу – це більшість органічних речовин. Найбільш поширеними є вуглеводневі палива, світовий оборот яких становить мільярди тонн на рік. Будь-які речовини можна віднести до одного з трьох класів: *горючі, важкогорючі та негорючі*.

*До негорючих матеріалів* відносять ті, які не здатні до горіння на повітрі за температур, більших за 900 °С, та якщо їх адіабатична температура горіння менша за 1100 °С. Поміж них є й пожежонебезпечні, які можуть підтримувати горіння – окисники, матеріали, що виділяють горючі продукти під час реакцій, розкладаються з вибухом за удару, тертя, дії температури та ті, які під час нагрівання в закритих посудинах створюють значне підвищення тиску.

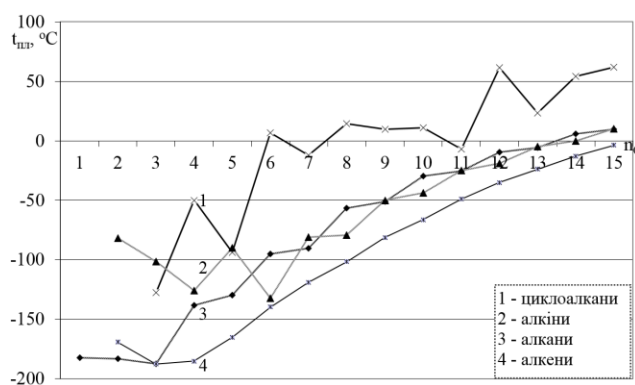


Рис. 1.1 – Зміна температур плавлення вуглеводнів

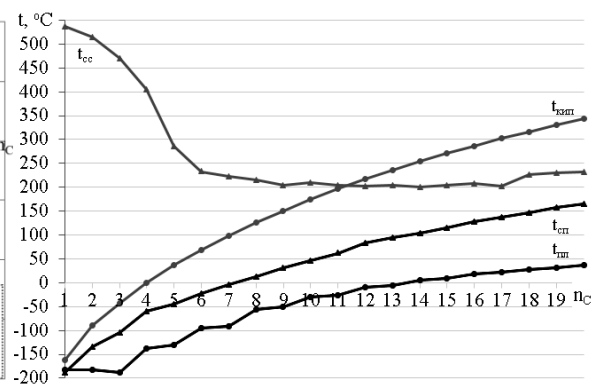


Рис. 1.2 – Зміна характерних температур n-алканів

До негорючих матеріалів відносять такі, які не здатні до горіння на повітрі за температур більших за 900 °С, та якщо їх розрахункова адіабатична температура горіння не перевищує 1373 К. Поміж них є і пожежонебезпечні, які можуть підтримувати горіння – окисники, матеріали, що виділяють горючі продукти під час реакцій; що розкладаються з вибухом за умови ударів, тертя, дії температури, а також ті, які при нагріванні в закритих посудинах характеризуються значним підвищенням тиску.

До важкогорючих матеріалів відносять ті, які можуть спалахувати в результаті впливу джерела запалювання, але самостійно не здатні горіти після його усунення. На пожежі, за наявності горючої пожежної навантаги, такі речовини горять, додають теплоту згоряння до теплоти пожежі та враховуються у складі пожежної навантаги.

До горючих матеріалів відносять такі, які можуть самоспалахувати, самозайматися, займатися від джерел запалювання і самостійно підтримувати горіння. Так, горючі рідини поділяють на *горючі* (які можна запалити лише після попереднього нагрівання) і *легкозаймисті* (які у разі зберігання за нормальних або стандартних умов можуть самі утворити вибухонебезпечну пароповітряну суміш). *Горючими*, як правило, є речовини з теплотою згоряння більше за 1830 кДж·м<sup>-3</sup> і адіабатичною температурою горіння більше за 2000 К.

Горіння рідин відбувається лише у газовій фазі, тому воно схоже на горіння горючих газів. Однак процесу займання та полум'яного горіння рідин передують процес випаровування, що створює додаткові вимоги та параметри для виникнення пожежної небезпеки. У закритому просторі за даної температури зберігання тиск парів рідини через певний час досягає деякого значення, яке відповідає даній температурі, не змінюється в часі та не співпадає для різних рідин; такий тиск називають *тиском насиченої пари*. На відкритому просторі рідина закипає за такої температури, коли тиск її насиченої пари досягає атмосферного. Яким би великим не був тепловий потік до індивідуальної рідини, яка має *температуру кипіння*, протягом процесу википання ця температура не зміниться (така закономірність властива будь-якому фазовому переходу). Рідини, які за стандартних умов зберігання мають високі значення тиску парів, називають *леткими*, або *низькокиплячими* ( $t_{\text{кип}} < 100 \text{ } ^\circ\text{C}$ ), а які мають низькі тиски – *малолеткими*, або *висококиплячими* ( $t_{\text{кип}} > 100 \text{ } ^\circ\text{C}$ ).

*Пожежну небезпеку газів та рідин у пароподібному стані* визначають за показниками: концентраційні межі поширення полум'я, максимальний тиск вибуху, температура самоспалахування, мінімальна енергія запалювання, нормальна швидкість поширення полум'я по газоповітряній суміші, мінімальний вибухонебезпечний вміст кисню тощо.

*Пожежну небезпеку рідин у конденсованому стані* можна визначати за такими самими показниками, як і для газів, оскільки рідини здатні горіти лише після сумішоутворення з повітрям. Але для рідкого стану можна виділити й особливі показники, які пов'язані з необхідністю випаровування: температурні



межі поширення полум'я, температура спалаху, температура займання, масова швидкість вигорання, лінійна швидкість вигорання, клас горючості, лінійна швидкість поширення полум'я по поверхні тощо.

Для багатьох фізико-хімічних параметрів, які характеризують властивості рідин, спостерігається періодична коливальність за принципом «парних» або «непарних» молекул за кількістю атомів карбону, що можна пояснити різницею у надмолекулярній будові. Найбільше це характерно для температур плавлення, що для деяких вуглеводнів показано на рис. 1.1. Але коливальності, ступінчастості та інші аномалії спостерігаються і для інших властивостей речовини, в тому числі і для параметрів пожежної небезпеки. На рис. 1.2 порівняно характерні температури n-алканів: плавлення, спалаху, кипіння та самоспалахування.

Для температури спалаху так само спостерігаються незначні коливальності, але загальний характер цієї залежності збігається з температурою кипіння, що дозволяє використовувати її для прогнозування температури спалаху. Для температури самоспалахування спостерігається декілька змін характеру залежності, що ускладнює її прогнозування.

### 1.1 Особливості та режими горіння рідин

Горіння – це складний фізико-хімічний процес на основі швидкої окисно-відновної реакції, що протікає з великою швидкістю, інтенсивним виділенням енергії у вигляді тепла та світлового випромінювання. Для виникнення горіння необхідна наявність горючої речовини та кисню в достатніх концентраціях, а також джерела запалювання з достатньою енергією й температурою. При виконанні цих умов тепловиділення в зоні реакції буде більше втрат тепла в навколишній простір, що призведе до підвищення температури системи.

Стаціонарне горіння рідин по вільній поверхні частіше протікає в гомогенному, ламінарному, дифузійному, дефлаграційному режимі. Це означає, що рідини горять у процесі відносно повільного підйому пари та її змішування із зовнішнім повітрям (тобто – в однаковому агрегатному стані) за дозвукових швидкостей поширення фронту полум'я.

Поширення полум'я відбувається за рахунок таких механізмів передачі тепла, як конвекція, теплопровідність, теплове випромінювання, а також під час детонаційного горіння – шляхом швидкого адіабатичного стиснення. У разі поширення полум'я по пароповітряній суміші основним механізмом передачі тепла є теплопровідність за контакту гарячого фронту полум'я з холодною горючою сумішшю; в разі поширення полум'я по поверхні рідини або твердого матеріалу – випромінювання; за наявності вітру гарячі продукти горіння притискаються до поверхні рідини, тоді додається конвекція.

Процеси запалювання вибухонебезпечної пароповітряної хмари та готової газоповітряної суміші відбуваються за однаковими механізмами і можуть протікати в гомогенному, ламінарному (або турбулентному),

кінетичному, дефлаграційному (іноді у детонаційному) режимі. Це означає, що компоненти готової суміші взаємодіють в однаковому агрегатному стані, а процес згоряння може характеризуватися дозвуковими або надзвуковими швидкостями поширення фронту полум'я.

Основною властивістю процесу горіння є здатність поширюватись на весь об'єм горючої системи. Критичні умови, пов'язані з появою і поширенням полум'я, залежать від співвідношення між тепловиділенням за рахунок реакції окиснення у системі й тепловіддачею в навколишній простір. Кількість тепла та швидкість тепловиділення залежать від концентрації реагуючих компонентів, початкової температури системи та інших факторів.

У багатьох технологічних процесах використовують горючі речовини та матеріали, які за певних умов утворюють суміші з окисником, наприклад, із повітрям. Концентрація горючого компонента в цих сумішах може бути в межах від частки відсотка до 100 %. Однак не всі ці концентрації створюють небезпеку виникнення горіння. Важливим принципом кардинального вирішення завдання забезпечення вибухобезпеки технологічного процесу є можливість контролю утворення горючого середовища та підтримання безпечних концентрацій за рахунок регулювання складу газо-, паро- або пилоповітряної суміші.

Повітряні суміші бувають багаті та бідні, тобто – з нестачею або надлишком повітря. Надлишок повітря – це та його частина у складі даної повітряної суміші, яка не може прореагувати внаслідок нестачі горючої речовини. Цей надлишок характеризують коефіцієнтом надлишку повітря  $\alpha$ , який показує – у скільки разів повітря присутньо більше, ніж може вступити у реакцію з даною кількістю горючої речовини. Якщо  $\alpha > 1$  – суміш бідна, буде неповне згоряння горючої речовини, надлишок повітря не прореагує, або горіння взагалі не зможе виникнути. Якщо  $\alpha < 1$  – суміш багата, буде неповне згоряння горючої речовини, або горіння взагалі не зможе виникнути. Можливість виникнення горіння у даній суміші горючої речовини з повітрям визначають за концентрацією горючої речовини по відношенню до концентраційних меж поширення полум'я.

Залежно від співвідношення у суміші горючої речовини та окисника розрізняють нижню та верхню концентраційні межі поширення полум'я (КМПП), які є межами, що розділяють різні області пожежної небезпеки повітряних сумішей. Нижня КМПП ( $\phi_n$ ) – це найменша концентрація горючої речовини у суміші з повітрям, за якої вже можливе виникнення і поширення горіння (вже достатньо горючої речовини за наявності надлишку повітря). Верхня КМПП ( $\phi_v$ ) – це найбільша концентрація горючої речовини у суміші з повітрям, за якої ще можливе виникнення і поширення горіння (ще достатньо повітря за наявності надлишку горючої речовини).

Горючим є середовище, яке продовжує самостійно горіти після усунення джерела запалювання. Якщо концентрація пари горючої рідини у повітрі виявляється між нижньою та верхньою КМПП, то середовище є горючим, а

горіння буде *кінетичним*, якщо більше верхньої межі – середовище є не горючим, але у разі доступу повітря – на межі сумішеутворення можливе *дифузійне горіння*.

Між нижньою та верхньою КМПП існує особлива концентрація, яка відповідає суміші стехіометричного складу. Такі суміші є найбільш реакційноздатними та пожежонебезпечними, вони легше запалюються, по них швидше поширюється горіння; при цьому виділяється максимальна кількість тепла, досягаються максимальні температура горіння та тиск вибуху. Концентрацію горючої речовини, взятої у стехіометричному співвідношенні (відповідно до стехіометричного коефіцієнта  $\beta$  реакції горіння), називають *стехіометричною*:

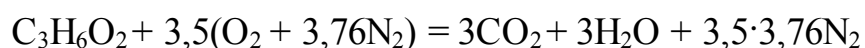
у суміші з повітрям: 
$$\Phi_{\text{СТМ}} = \frac{100}{1 + 4,76 \cdot \beta}, \%$$
 (1.1)

у суміші з киснем: 
$$\Phi_{\text{СТМ}} = \frac{100}{1 + \beta}, \%$$
 (1.2)

перерахунок у масову концентрацію: 
$$\Phi'_{\text{СТМ}} = \frac{10 \cdot \Phi_{\text{СТМ}} \cdot \mu}{V_{\mu}}, \text{Г} \cdot \text{М}^{-3},$$
 (1.3)

де  $\beta$  – *стехіометричний коефіцієнт реакції горіння*, показує кількість молів кисню, необхідних для згоряння 1 молю горючої речовини;  $\mu$  – *молярна маса горючої речовини* (маса 1 молю речовини),  $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ;  $V_{\mu}$  – *молярний об'єм газу* за даної температури та тиску (об'єм 1 молю речовини),  $\text{м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$ .

*Реакцію горіння* у повітрі складають на 1 моль горючої речовини, а склад повітря приводять до 1 молю кисню: ( $\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2$ ), це враховує той факт, що азоту у повітрі у 3,76 рази більше, ніж кисню:



$$\beta = (2n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} - n_{\text{O}_{\text{гр}}})/2 = (2 \cdot 3 + 3 - 2)/2 = 3,5.$$

За стехіометричної концентрації досягаються найбільш пожежо-вибухонебезпечні умови, є більшою ймовірність запалювання, спостерігаються найменші мінімальна енергія запалювання та температура самоспалахування.

*Температура самоспалахування*  $t_{\text{cc}}$  є важливим параметром безпеки запалювання горючих рідин. Під нею розуміють найменшу температуру горючої повітряної суміші стехіометричного складу, за якої відбувається різке збільшення швидкості екзотермічних реакцій, які закінчуються виникненням полум'яного горіння. За такої найменшої температури самоспалахування відбудеться – якщо до цієї температури прогріється вся суміш одночасно. У досліді за таку температуру приймають найменшу температуру гарячої стінки, яка ініціює горіння повітряної суміші. Чим нижчою є  $t_{\text{cc}}$ , тим більшою виявляється пожежна небезпека речовини.

Нижню та верхню КМПП можна оцінити за емпіричною формулою:

$$\varphi = \frac{100}{a \cdot \beta + b}, \quad (1.4)$$

де  $a, b$  – для нижньої КМПП:  $a = 8,684, b = 4,769$ ;

$a, b$  – для верхньої КМПП, якщо  $\beta \leq 7,5$ :  $a = 1,55, b = 0,56$ ;

$a, b$  – для верхньої КМПП, якщо  $\beta > 7,5$ :  $a = 0,768, b = 6,554$ .

Більш точний розрахунок передбачає врахування атомарного складу, будови молекули та теплоти її утворення, див. додатки 1 та 2.

Безпека застосування горючих речовин досягається, якщо їх концентрації підтримувати *безпечними*, тобто такими, за яких для даних умов використання речовин ініціювання їх горіння будь-яким джерелом запалювання є неможливим. Для цього від нижньої КМПП створюють *запас на безпеку* в бік менших концентрацій:  $\varphi_{\text{нб}} = 0,9(\varphi_{\text{н}} - 0,21)$ , %; а від верхньої – у бік більших:  $\varphi_{\text{вб}} = 1,1(\varphi_{\text{в}} + 0,42)$ , %. Поза цими межами горюча суміш буде безпечною:  $\varphi_{\text{факт}} \leq \varphi_{\text{нб}}$  та  $\varphi_{\text{факт}} \geq \varphi_{\text{вб}}$ . Але область концентрацій, більших за верхню КМПП, буде безпечною лише за умови герметичності відповідного простору. Необхідність створення запасу на безпеку визначається тим, що за зміни багатьох зовнішніх умов стандартні значення КМПП будуть змінюватися. При цьому область вибухонебезпечних концентрацій може як звужуватися, так і розширюватися. Наприклад, *зміну КМПП від температури середовища* можна розрахувати за наступними формулами:  $\varphi_{\text{н}}(t) = (-0,9 \cdot 10^{-3}t + 1,025)\varphi_{\text{н}}$ ,  $\varphi_{\text{в}}(t) = (1,2 \cdot 10^{-3}t + 0,97)\varphi_{\text{в}}$ , %. Тобто, за підвищених температур, а також атмосферних тисків, добавок каталізатора або окисника ширина КМПП буде зростати, а область вибухонебезпечних концентрацій – розширюватися.

Найбільша кількість тепла виділяється за стехіометричної концентрації, оскільки відбувається повне згоряння з повним виділенням тепла. *Теплоту згоряння* розраховують за законом Гесса або за формулою Менделєєва. Температуру горіння визначає *нижча теплота згоряння*, яка враховує, що пірогенетична вода у продуктах горіння ще не сконденсувалася. Наприклад, для етилформіату  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$  за стандартних умов, з урахуванням його стандартної теплоти утворення  $\Delta H_{\text{f}}^{\circ} = -371,2$  кДж·моль<sup>-1</sup> (додаток 5), а також теплот утворення продуктів горіння – вуглекислого газу та води, *за законом Гесса* нижча молярна теплота згоряння буде становити:



$$Q_{\text{гор}} = \left| \sum \Delta H_{\text{фін}}^{\circ} n_{\text{фін}} - \sum \Delta H_{\text{ін}}^{\circ} n_{\text{ін}} \right| = \left| 3(-393,8) + 3(-241,8) - (-371,2) \right| = 1536 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

Або у вигляді *масової теплоти згоряння*:

$$\mu = 3 \cdot 12 + 6 \cdot 1 + 2 \cdot 16 = 74 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1};$$

$$Q'_n = \frac{Q_n \cdot 1000}{\mu} = \frac{1535,7 \cdot 1000}{74} = 20752,6 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

Значення *нижчої масової теплоти згоряння* можна відразу отримати за формулою Менделєєва:

$$Q'_n = 339,4C + 1257H + 108,9(S - O - N) - 25,1(9H + W) = \\ = 339,4 \cdot 48,6 + 1257 \cdot 8,1 + 108,9(0 - 43,2) - 25,1(9 \cdot 8,1 + 0) = 23801,9 \text{ кДж/кг},$$

де C, H, O, S, N, W – масовий вміст хімічних елементів у молекулі та вологи у речовині, %; для етилформиату:

$$C = \frac{3 \cdot 12}{74} 100 = 48,6 \%, \quad H = \frac{6 \cdot 1}{74} 100 = 8,1 \%, \quad O = \frac{2 \cdot 16}{74} 100 = 43,2 \%.$$

*Дифузійне горіння* характеризується нестачею кисню, який у зоні горіння поповнюється за рахунок дифузії з навколишнього простору. Якщо область із великими (пожежонебезпечними) концентраціями горючої речовини не має сполучення з навколишнім повітрям, то дія джерела запалювання на таке середовище не ініціює виникнення горіння.

Для горіння рідин є характерним встановлення після первинного спалаху *дифузійного полум'я* на поверхні рідини. Над самою поверхнею рідини не вистачає кисню і середовище виявляється збагаченим паром. Під час горіння ця область виконує роль підготовчої зони, де відбувається розігрів горючої пари та розкладання її молекул на атоми. За наявності в органічній молекулі, що потрапила у підготовчу зону, атомів кисню, відбувається попереднє окиснення з виділенням незначної частини теплоти згоряння. У наступному шарі – у зоні горіння – відбувається утворення суміші продуктів розкладання та попереднє окиснення з повітрям та температурне ініціювання швидкої реакції горіння. При цьому виділяються продукти горіння, які за рахунок теплоти згоряння розігріваються до температури горіння, що створює світіння в інфрачервоному, видимому та ближньому ультрафіолетовому діапазонах.

Над зоною горіння формується висхідний конвекційний потік продуктів повного і неповного згоряння, а також продуктів розкладання, які разом утворюють зону продуктів горіння. Якщо в цю зону потрапляє продукт розкладання – карбон, то ця зона набуває кіптявого характеру. Зона продуктів горіння змішується з навколишнім повітрям, тому в дифузійному полум'ї тут починається доокиснення продуктів неповного згоряння з виділенням тепла, що гальмує охолодження цієї зони, на відміну від *кінетичного полум'я*.

За наявності кисню в молекулі горючої речовини процес згоряння полегшується, тому полум'я може отримати різного характеру. У разі *дифузійного горіння* горюча суміш утворюється безпосередньо в зоні горіння

за рахунок дифузії горючої речовини з підготовчої зони, а окисника – з навколишнього простору. *Колір та температура дифузійного полум'я*, рис.1.3, залежить від атомарного складу горючої речовини.

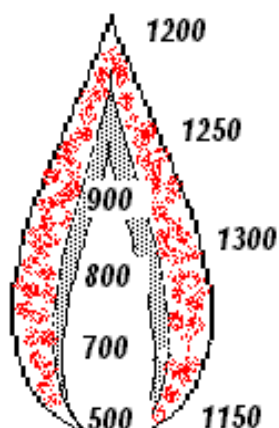


Рис. 1.3 – Розподіл температур у дифузійному полум'ї

Якщо у складі горючої суміші достатньо кисню, то карбон, який виділяється під час її термічного розкладання в підготовчій зоні полум'я, встигає окислитися до монооксиду (CO), який згоряє у зоні горіння з утворенням діоксиду карбону (CO<sub>2</sub>). Світіння монооксиду карбону людське око не бачить, тому відповідні речовини горять безбарвним або блакитним полум'ям. Розкладання мурашиної кислоти дає наступні продукти:  $\text{CH}_2\text{O}_2 = \text{CO} + \text{OH}^* + \text{H}^*$ . Саме відсутність у підготовчій зоні вільного карбону визначає світіння такого полум'я як безбарвне.

А ось за термодеструкції ацетону, крім CO та гідрогену, буде виділятися й атомарний карбон:  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O} = \text{CO} + 2\text{C} + 6\text{H}^*$ . Частинки карбону у вигляді сажі будуть потрапляти у зону горіння, розжарюватися та світитися. Якщо під час розкладання молекули утворюється багато карбону, то для його окиснення до CO оксигену, який надходить шляхом дифузії у зону горіння, не вистачає, тому карбон виділяється у вигляді сажі, що робить полум'я не лише яскравим, а й кіптявим. Тобто, характер світіння дифузійного полум'я визначається вмістом оксигену і карбону в горючій речовині, див. табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Залежність кольору полум'я від вмісту хімічних елементів

Характер світіння полум'я	Вміст хімічного елемента у горючій речовині, %	
	оксиген	карбон
безбарвне	більше 50	до 50
яскраве, без кіптяви	від 25 до 50	від 50 до 75
яскраве, з кіптявою	менше 25	більше 75

Для оцінки очікуваного кольору дифузійного полум'я визначають масову частку атомів оксигену в молярній масі речовини. Так, молярна маса пропіонового ангідриду C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>3</sub> становить:  $\mu = 6 \cdot 12 + 10 + 16 \cdot 3 = 130 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ . Тоді вміст атомів O становить:  $\text{O}(\%) = 3 \cdot 16 \cdot 100 / 130 = 36,9 \%$ ; згідно з табл. 1.1 це число потрапляє до діапазону від 25 до 50 %, тому дифузійне полум'я пропіонового ангідриду буде яскравим та некіптявим.

На практиці цей ефект можна використовувати у зворотному напрямку: якщо полум'я аварійного розливу горючої рідини має безбарвний або некіптявий характер, то можна говорити про те, що у будові її молекул багато атомів кисню. Це означає, що зазначена рідина швидше за все відноситься до полярних, а тому її гасіння піною на основі стандартного

піноутворювача є неможливим. Гасіння таких рідин зазвичай проводять із використанням «полярних» піноутворювачів, які мають у своєму складі полісахариди, які осаджуються з піни та формують додаткову ізолюючу плівку між рідиною та піною, що надає піні більшої стійкості.

*Температура горіння* визначається теплотою згоряння горючої речовини та теплоємністю компонентів продуктів горіння. Енергія, яка виділяється в зоні горіння, витрачається на попереднє нагрівання горючої речовини та продуктів горіння, а також на теплові втрати із зони горіння в навколишній простір за рахунок теплового випромінювання.

Тому *температура горіння*  $T_{гор}$  – це та температура, до якої нагріваються продукти горіння за рахунок передачі їм теплоти згоряння. На розігрів продуктів горіння витрачається тепло  $Q_{пр}$ , яке можна представити як:

$$Q_{пр} = v_{пр} \cdot c_p (T_{гор} - T_0), \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (1.5)$$

де  $v_{пр}$  – об'єм продуктів горіння,  $\text{м}^3$ ;  $c_p$  – питома об'ємна теплоємність продуктів горіння,  $\text{кДж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}$ ;  $T_0$  – початкова температура системи,  $\text{К}$ .

Звідки температуру горіння можна визначити як:

$$T_{гор} = \frac{Q_{пр}}{c_p \cdot v_{пр}} + T_0, \text{ К}. \quad (1.6)$$

Залежно від умов, у яких протікає процес горіння (або від спрощень, прийнятих для розрахунку), розрізняють *калориметричну, теоретичну, адіабатичну та дійсну* температури горіння.

Під *калориметричною температурою горіння* розуміють температуру, до якої нагріваються продукти горіння з урахуванням припущень: вся теплота згоряння без втрат передається продуктам горіння ( $Q_{пр} = Q_{н}$ ); горить стехіометрична горюча суміш без нестачі або надлишку повітря ( $\alpha = 1$ ) з утворенням лише продуктів повного згоряння; продукти горіння не дисоціюють; згоряння протікає за *нормальних умов* (273 К, 101,3 кПа).

*Теоретична температура горіння*, на відміну від калориметричної, додатково враховує дисоціацію продуктів горіння за температур, більших за 1700 °С:  $2\text{CO}_2 = 2\text{CO} + \text{O}_2 - 566 \text{ кДж}$ ,  $2\text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_2 + \text{O}_2 - 478 \text{ кДж}$ .

*Адіабатична температура горіння*, на відміну від калориметричної, додатково враховує у складі горючої суміші надлишок повітря.

*Дійсна температура горіння* – це температура, до якої нагріваються продукти горіння в реальних умовах. Приймають, що горіння може проходити з надлишком або нестачею повітря й тепловтратами у навколишній простір. Початкові умови, в яких знаходиться горюча суміш, можуть відрізнитися від нормальних. Дійсна температура горіння завжди є меншою за адіабатичну та визначається калориметричною температурою горіння.

*Кінетичне горіння* пароповітряної суміші можливе для концентрацій пари від нижньої до верхньої КМПП, протікає з великою швидкістю, тому

горюча суміш встигає згоріти ще до теплового розширення продуктів реакції. Тобто об'єм газової системи у зоні горіння залишається постійним, а оскільки продукти горіння акумулюють теплоту згоряння – підвищується їх температура та виникає тиск вибуху. Продукти горіння нагріваються у дві стадії: внаслідок хімічної реакції та подальшого адіабатичного стиснення. Швидкість такого згоряння залежить від кінетики реакції горіння – визначається швидкістю самої хімічної реакції  $\omega_{\text{гор}} \approx \omega_{\text{хр}}$ , тому швидкість кінетичного горіння сильно залежить від температури (дифузія для таких сумішей не потрібна  $\omega_{\text{д}} \approx 0$ , але чим більший стехіометричний коефіцієнт реакції горіння, тим менша ймовірність одномоментної зустрічі однієї молекули горючої речовини з багатьма молекулами кисню повітря поміж у 3,76 рази більшої кількості молекул азоту; тоді виникають дифузійні ускладнення, які у двигунах ліквідують турбулізацією зони горіння). На пожежах відбувається під час виникнення та на деяких етапах її поширення.

*Максимальний тиск вибуху*, який створюють гарячі продукти горіння, утворюється за стехіометричної концентрації горючого у повітрі; його можна визначити виходячи з універсального газового закону:

$$P_{\text{виб}} = \frac{P_0 n_{\text{пр}}^0 T_{\text{виб}}}{n_{\text{гс}}^0 T_0}, \text{ кПа}, \quad (1.7)$$

де  $P_{\text{виб}}$  – максимальний тиск вибуху, кПа;  $P_0$  – початковий тиск у горючій суміші, кПа;  $T_{\text{виб}}$  – максимальна температура продуктів вибуху, К;  $T_0$  – початкова температура горючої суміші, К;  $n_{\text{пр}}^0$  – питома теоретична кількість молей продуктів горіння, моль·моль<sup>-1</sup>;  $n_{\text{гс}}^0$  – питома теоретична кількість молей горючої суміші (1 моль горючої речовини і теоретична питома кількість молей повітря для її повного згоряння  $n_{\text{п}}^0$ ), моль·моль<sup>-1</sup>.

Під час розрахунку максимального тиску вибуху приймають, що горіння відбувається за  $\alpha = 1$  (немає надлишку або нестачі повітря); відбувається адіабатичне горіння суміші за сталого об'єму з повним згорянням горючої речовини без температурної дисоціації продуктів горіння. За концентрацій, відмінних від стехіометричної, тиск вибуху буде меншим. За силою тиску у разі кінетичного горіння розрізняють: 1) «спалах» – збільшення тиску продуктів горіння не відбувається; 2) «хлопок» – незначне підвищення тиску зі звуковим ефектом без руйнувань; 3) «вибух» – швидке згоряння з різким виділенням енергії та стислих газів, великою швидкістю поширення фронту полум'я та різкою зміною тиску, що спричиняє руйнування обладнання і будівель. Тиск утворюється, коли гарячі продукти горіння намагаються розширитися. Тиск вибуху та швидкість зростання тиску вибуху є важливими параметрами, які визначають пожежну небезпеку речовин.

Початок згоряння вибухонебезпечних концентрацій починається в дефлаграційному режимі, але за певних умов може розігнатися до детонації. В обох випадках поширення горіння супроводжується виникненням фронту



полум'я з індивідуальними особливостями будови. *Фронт полум'я* – це об'єм горючої системи, де відбуваються підготовчі процеси та сам процес горіння, утворюються продукти горіння, виділяється теплота згорання, а температура зростає до температури горіння. Фронт полум'я може бути нерухомим (стаціонарне полум'я) або рухомим (нестаціонарне полум'я).

*Стаціонарне полум'я* виникає, якщо швидкості руху горючої суміші та фронту полум'я назустріч рівні  $U_{\text{фп}} = U_{\text{гс}}$ . При цьому кількість газу, що згоряє, компенсується кількістю газу, що поступає. Полум'я виглядає нерухомим у навколишньому просторі.

*Нестаціонарне полум'я* виникає, якщо швидкості руху горючої суміші та фронту полум'я назустріч не рівні: можливі *зрив полум'я*  $U_{\text{фп}} < U_{\text{гс}}$  та *проскок полум'я*  $U_{\text{фп}} > U_{\text{гс}}$  з поширенням горіння в напрямку, протилежному руху суміші, що може призвести до вибуху технологічного обладнання.

На початковому етапі згорання готової горючої суміші утворюється плоский фронт полум'я, який відразу починає рухатися з деякою найменшою можливою швидкістю, яку називають нормальною. *Нормальна швидкість поширення горіння*  $U_{\text{н}}$  – найменша швидкість, з якою рухається фронт полум'я відносно нерухомого горючого газового середовища за рахунок передачі тепла теплопровідністю; визначається як відстань  $x$ , яку проходить фронт полум'я по нормалі до його поверхні за час  $\tau$ :  $U_{\text{н}} = dx/d\tau$ . На значення  $U_{\text{н}}$  значний вплив надає теплоємність горючої системи, енергія активації та швидкість реакції горіння, температура самоспалахування горючої речовини.

Під час поширення фронт полум'я прискорюється. На першому етапі – внаслідок розширення гарячих продуктів горіння в  $\epsilon$  разів:  $\epsilon = T_{\text{пр}}/T_0$ ,  $U_{\text{фп}} = U_{\text{н}}\epsilon$ . На другому – плоский фронт полум'я вигинається, що збільшує інтенсивність згорання суміші пропорційно збільшенню поверхні фронту полум'я. На третьому – швидкий фронт полум'я турбулізується, що прискорює згорання. На четвертому – виникає резонанс ударних хвиль перед фронтом полум'я, що збільшує у цій області тиск до можливості самоспалахування, виникає детонаційний фронт полум'я.

#### *Структура плоского дефлаграційного фронту полум'я*

В межах фронту полум'я горюча система повністю перетворюється на систему продуктів горіння. Перед фронтом полум'я знаходиться холодна горюча суміш, позаду нього – гарячі продукти горіння (рис. 1.4). В межах фронту полум'я змінюються концентрації, температури та тиски. У вихідній суміші ці параметри мають початкові значення. У фронті полум'я концентрація реагентів знижується внаслідок розбавлення продуктами горіння й витрачання у хімічній реакції. Температура у *підготовчій зоні* плавно зростає від початкової  $T_0$  до температури самоспалахування  $T_{\text{сс}}$  за рахунок передачі тепла теплопровідністю. Це різко прискорює реакцію окиснення. У наступній – *вужкій зоні реакції* ініціюється та протікає реакція горіння, наприкінці зони досягається температура горіння  $T_{\text{гор}}$ , повністю витрачається горюча речовина, утворюється суміш гарячих продуктів горіння.

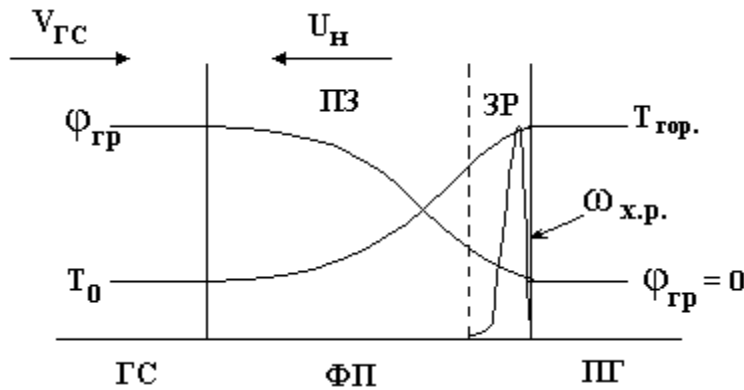


Рис. 1.4 – Структурні елементи, зміна концентрацій, температур та швидкості хімічної реакції у плоскому дефлаграційному фронті полум'я

Таким чином, ширина фронту полум'я складається з підготовчої зони та зони реакції  $\delta_{\text{фп}} = \delta_{\text{пз}} + \delta_{\text{зр}}$ ; в цілому вона пов'язана з температуропровідністю та нормальною швидкістю полум'я  $\delta_{\text{фп}} \sim a_t/U_n$ . Типові значення для зон фронту полум'я:  $\delta_{\text{зр}} = 10^{-4} - 10^{-3}$  см;  $\delta_{\text{пз}} = 10^{-3} - 10^{-2}$  см;  $T_{\text{фп max}} = 1700 - 3000$  К

*Детонаційний фронт полум'я* складається з зони стиснення та зони реакції. Також особливостями детонаційного горіння є наступне: детонаційне горіння повітряних сумішей виникає на відразу, а після *переддетонаційного розгону* від точки запалювання; ця відстань коротша, а детонація виникає легше, якщо стінки труби пошерхлі, що прискорює турбулізацію; запалювання холодної горючої суміші здійснюється стисненням, а не теплопровідністю, як за дефлаграції; продукти горіння рухаються в одному напрямі із фронтом полум'я (при дефлаграції – у різні); тиск в детонаційній хвилі в декілька разів перевищує тиск адіабатичного згорання в замкненій посудині, що зумовлює її велику руйнівну силу; руйнівна дія детонації не залежить від того, виникає вона у відкритому або закритому просторі.

#### *Розрахунок адіабатичної температури горіння*

1. Скласти рівняння реакції горіння.
2. Визначити питому дійсну кількість молей продуктів горіння  $n_{\text{пр}}$  з урахуванням надлишку повітря.
3. Визначити нижчу молярну теплоту згорання речовини  $Q_n$  за законом Гесса або довідником.
4. Визначити середню ентальпію продуктів згорання  $\Delta H_{\text{сер}}$ :

$$\Delta H_{\text{сер}} = \frac{Q_n}{n_{\text{пр}}}, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (1.8)$$

5. Орієнтуючись на ентальпію азоту, визначити температуру горіння у першому наближенні  $T_1$  (табл. 3 додатків).

6. Визначити ентальпію продуктів горіння  $Q_{\text{пр}}^{T_1}$  за температури  $T_1$  з використанням значень ентальпії кожного продукту горіння:

$$Q_{\text{пр}}^{T_1} = \Sigma(\Delta H_{\text{пр}i}^{T_1} n_{\text{пр}i}), \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}. \quad (1.9)$$

7. Визначити температуру горіння у другому наближенні (шаг 200 К), виходячи з того, що  $T_2 > T_1$ , якщо  $Q_{\text{пр}}^{T_1} < Q_{\text{н}}$ , або  $T_2 < T_1$ , якщо  $Q_{\text{пр}}^{T_1} > Q_{\text{н}}$ .
8. Визначити ентальпію продуктів горіння  $Q_{\text{пр}}^{T_2}$  за температури  $T_2$  аналогічно до формули (1.9).
9. Визначити температуру горіння *методом лінійної інтерполяції*:

$$T_{\text{гор}} = T_1 + \frac{(T_2 - T_1)(Q_{\text{н}} - Q_{\text{пр}}^{T_1})}{(Q_{\text{пр}}^{T_2} - Q_{\text{пр}}^{T_1})}, \text{ К}. \quad (1.10)$$

*Розрахунок температури та максимального тиску вибуху*

1. Скласти рівняння реакції горіння.
2. Визначити теоретичну кількість молей продуктів горіння  $n_{\text{пр}}^{\circ}$ .
3. Визначити теоретичну кількість молей горючої суміші  $n_{\text{гс}}^{\circ}$  і  $\Delta n^{\circ}$  – різницю між кількістю молей продуктів горіння та горючої суміші.
4. Визначити нижчу теплоту згоряння речовини згідно із законом Гесса або за довідковими даними.
5. Визначити енергію вибуху суміші:

$$Q_{\text{виб}} = Q_{\text{н}} + RT_0 \Delta n^{\circ}, \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}, \quad (1.11)$$

де  $T_0$  – початкова температура горючої суміші, К;  $R$  – універсальна газова стала,  $R = 8,314 \cdot 10^{-3}$  кДж·моль<sup>-1</sup>К<sup>-1</sup>.

6. Визначити середню енергію продуктів вибуху:

$$Q_{\text{сер}} = \frac{Q_{\text{виб}}}{n_{\text{пр}}^{\circ}}, \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}. \quad (1.12)$$

7. Орієнтуючись на внутрішню енергію азоту, визначити температуру вибуху  $T_1$  у першому наближенні (табл. 4 додатків).
8. Визначити енергію продуктів вибуху  $Q_{\text{пр}}^{T_1}$  за температури  $T_1$ :

$$Q_{\text{пр}}^{T_1} = \Sigma(Q_{\text{пр}i}^{T_1} \cdot n_{\text{пр}i}), \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}. \quad (1.13)$$

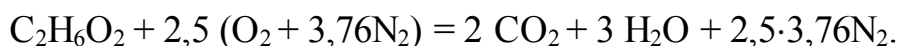
9. Визначити температуру вибуху у другому наближенні  $T_2$  (крок 400 К), виходячи з того, що  $T_2 < T_1$ , якщо  $Q_{\text{пр}}^{T_1} > Q_{\text{виб}}$  або  $T_2 > T_1$ , якщо  $Q_{\text{пр}}^{T_1} < Q_{\text{виб}}$ .
10. Визначити енергію продуктів вибуху  $Q_{\text{пр}}^{T_2}$  за температури  $T_2$ : аналогічно до формули (1.13).
11. Визначити температуру вибуху методом лінійної інтерполяції аналогічно до формули (1.10).
12. Визначити максимальний тиск вибуху за формулою (1.7).

### Приклад розв'язання задачі

Визначити адіабатичну температуру горіння етиленгліколю  $C_2H_6O_2$  (теплота утворення  $\Delta H_f^\circ = -453,8$  кДж·моль<sup>-1</sup>) за умови надлишку повітря  $\alpha = 1,8$ .

#### Розв'язання

1. Складаємо рівняння реакції горіння:



2. Визначаємо *питому дійсну кількість молей продуктів горіння*:

$$n_{пр} = n^\circ_{пр} + (\alpha - 1)n^\circ_n = 2 + 3 + 2,5 \cdot 3,76 + (1,8 - 1) \cdot 4,76 \cdot 2,5 = 23,9 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. Визначаємо нижчу молярну теплоту згоряння горючої речовини за *законом Гесса*:

$$Q_H = |2 \cdot (-393,79) + 3 \cdot (-241,84) - (-453,8)| = 1059,3 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

4. Визначаємо середню ентальпію продуктів горіння за формулою (1.8):

$$H_{сер} = \frac{1059,3}{23,9} = 44,3 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

5. Орієнтуючись на ентальпію азоту, визначаємо температуру горіння у першому наближенні:  $T_1 = 1400$  К.

6. Визначаємо ентальпію продуктів горіння за температури горіння  $T_1$  за формулою (1.9):

$$Q_{пр}^{T_1} = 2 \cdot 65,19 + 3 \cdot 53,8 + 2,5 \cdot 3,76 \cdot 43,6 + (1,8 - 1) \cdot 2,5 \cdot 4,76 \cdot 44,00 = 858,7 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

7. Визначаємо температуру горіння у другому наближенні. Виходячи з того, що ентальпія продуктів горіння за температури  $T_1 = 1400$  К виявилася меншою за нижчу теплоту згоряння, приймаємо  $T_2 = 1600$  К.

8. Визначаємо ентальпію продуктів горіння за температури горіння  $T_2$  аналогічно до формули (1.9):

$$Q_{пр}^{T_2} = 2 \cdot 76,9 + 3 \cdot 62,97 + 2,5 \cdot 3,76 \cdot 50,6 + (1,8 - 1) \cdot 2,5 \cdot 4,76 \cdot 51,1 = 1000,4 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

9. Визначаємо температуру горіння за формулою (1.10):

$$T_{ад} = 1400 + \frac{(1600 - 1400) (1059,3 - 858,7)}{1000,35 - 858,7} = 1683,3 \text{ К}.$$

Висновок: адіабатична температура горіння етиленгліколю за даних умов становить 1683,3 К.

## 1.2 Утворення вибухонебезпечного пароповітряного середовища за умов зберігання рідин на відкритому та у закритому просторі

Для механізму горіння рідин важливим фактором є те, що у більшості випадків температура їх кипіння є нижчою за температуру самоспалахування. Тому, перш ніж виникне швидка реакція окиснення, речовина перейде з рідкого стану в газоподібний, горіння буде гомогенним. Залежність рівноважного тиску пари над поверхнею рідин ( $p$ ) від температури ( $T$ ) описує рівняння Клаузіуса–Клапейрона:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta H_{\text{вип}}}{T(V_{\text{пар}} - V_{\text{рід}})}, \quad (1.14)$$

де  $\Delta H_{\text{вип}}$  – теплота випаровування рідини, кДж/моль;  $V_{\text{пар}}$  та  $V_{\text{рід}}$  – молярний об'єм пари та рідини.

Концентрація парів та їх тиск пов'язані співвідношенням:  $p=1000c \cdot RT$ , де  $p$  – тиск, Па;  $c$  – молярна концентрація, моль/л;  $R$  – газова стала.

Для оцінки теплоти випаровування рідини  $\Delta H_{\text{вип}}$  можна скористатися універсальною формулою прогнозування для різних гомологічних класів полярних та неполярних рідин на підставі значень температури кипіння та молярної маси рідини:

$$H_{\text{вип}} = 5 \cdot 10^{-4} T_{\text{кип}}^{1,9} + 0,025k \cdot T_{\text{кип}} / \mu^{0,05}, \quad \text{кДж/моль}, \quad (1.15)$$

де  $T_{\text{кип}}$  – температура кипіння, К;  $\mu$  – молярна маса, г/моль;  $k$  – коефіцієнт гомологічного ряду: 1 – для  $n$ -спиртів, 0,5 – для спиртів ізомерної будови, 0 – для алканів, фенолів.

Концентраційні межі (КМПП), тиски пари та відповідні їм температури можна знайти в довідковій літературі та, частково, у додатках.

Рідина може випаровуватися у відкритий або закритий простір. У процесі випаровування у закритий простір через певний час встановлюється *динамічна рівновага* – стан системи, за якого кількість рідини, що випаровується, дорівнює кількості сконденсованої пари. Відбувається насичення газової фази паром до незмінної в часі концентрації, а сама пара, що утворюється за такої динамічної рівноваги у системі, називається *насиченою*.

Якщо рідина знаходиться на відкритому просторі, то частина пари весь час дифундує у навколишній простір і втрачається з області над поверхнею рідини. При цьому кількість рідини, що випаровується, буде більше, ніж кількість сконденсованої пари. Динамічна рівновага не встановлюється, пара є *ненасиченою*, а випаровування триватиме, поки вся рідина не випарується.

Концентрація пари над поверхнею рідини залежить від її температури: чим ця температура є більшою, тим більшою є інтенсивність випаровування, тиск і концентрація пари. І хоча безпеку становить саме концентрація пари, відповідну пожежну безпеку горючої рідини можна оцінювати не за цією концентрацією, а за температурою самої рідини. Тоді для визначення

пожежної небезпеки насиченої пари рідини (пара у закритому просторі), замість концентраційних меж, можна визначати температури рідини, за яких ці концентрації утворюються. *Температурними межами поширення полум'я (ТМПП, нижня та верхня)* називають такі температури рідини, за яких над її поверхнею утворюється насичена пара в концентрації, що відповідає нижній або верхній концентраційній межі поширення полум'я, відповідно.

За температур, менших за нижню ТМПП, концентрація насиченої пари буде меншою за нижню концентраційну межу, а тому буде безпечною, рис. 1.5. За температур, більших за верхню ТМПП, концентрація насиченої пари буде більшою за верхню концентраційну межу, запалювання та горіння такої пари всередині технологічного обладнання є неможливим через нестачу окисника, тому кінетичного горіння (вибух або спалах) не буде. Однак таку пару можна запалити за її виходу з ємності у повітря, тоді можливе горіння в *дифузійному режимі*. Тобто, насичена пара в цій області температур є вибухобезпечною, але пожежонебезпечною.



Рис. 1.5 – Температурно-концентраційна шкала пожежовибухонебезпеки горючих рідин:

- БК – область безпечних температур та концентрацій насиченої пари;
- НК – область небезпечних температур та концентрацій насиченої пари;
- ВНК – область вибухонебезпечних температур та концентрацій насиченої пари;
- ВБК, ПНК – область вибухобезпечних, але пожежонебезпечних температур і концентрацій насиченої пари

ТМПП, так само, як і КМПП, не є постійними величинами і залежать від ряду *факторів*, основними з яких є:

- вміст кисню в окисному середовищі ( $\phi_{O_2} \uparrow$ ,  $t_n \downarrow$ ,  $t_v \uparrow$ );
- домішки негорючих газів у пароповітряному середовищі ( $\phi_{нр}$ ,  $\phi_{нг} \uparrow$ ,  $t_n \uparrow$ ,  $t_v \downarrow$ );
- загальний тиск системи ( $P_{заг} \uparrow$ ,  $t_n \uparrow$ ,  $t_v \uparrow$ );
- потужність джерела запалювання ( $E_{дз} \uparrow$ ,  $t_n \downarrow$ ,  $t_v \uparrow$ ).

Через те, що за зміни зовнішніх умов ТМПП можуть змінюватися, для забезпечення пожежної безпеки, у разі експлуатації горючих рідин, визначають не лише температурні межі, а й *безпечні температурні межі*, нижче або вище яких пароповітряна суміш, що утворюється над поверхнею рідини у закритому просторі, гарантовано не може зайнятися за дії джерела запалювання. Тобто необхідно створити запас на безпеку від нижньої межі в область менших температур, а від верхньої – в область більших:  $t_{нб} = 0,9(t_n - K_б)$ ,  $t_{вб} = 1,1(t_v + K_б)$ , де  $K_б$  – коефіцієнт безпеки, для індивідуальних рідин та нафтопродуктів –  $10,5^\circ\text{C}$ , для сумішей –  $14^\circ\text{C}$ .

### *Практичне значення температурних меж поширення полум'я*

Використання встановлених значень ТМПП значно спрощує роботу з визначення ступеня пожежної небезпеки горючих рідин, оскільки, на відміну від концентраційних меж, не вимагає застосування газоаналізаторів, хроматографів та інших складних приладів. За допомогою ТМПП можна:

- 1) проводити порівняльну оцінку пожежної небезпеки двох рідин;
- 2) визначати ступінь пожежної небезпеки насиченої пари рідини в закритих технологічних апаратах за фактичної температури зберігання;
- 3) визначати найбільш пожежовибухонебезпечний час року для використання даної горючої речовини у закритому просторі;
- 4) визначати область безпечних температур для роботи технологічного обладнання.

Для визначення області безпечних температур і забезпечення пожежної безпеки технологічних процесів потрібно обрати температурний режим роботи апаратів так, щоб робочі концентрації знаходилися поза зоною небезпечних концентрацій (відсутність можливості виникнення горіння при дії джерела запалювання). Тому безпечні робочі температури знаходяться нижче нижньої безпечної або вище верхньої безпечної температурної межі поширення полум'я:  $t_{роб\ без} < t_{нб}$  або  $t_{роб\ без} > t_{вб}$ .

За однакових температур концентрація пари над рідиною у відкритому просторі завжди менше, ніж у закритому, внаслідок втрат пари шляхом дифузії в навколишній простір. Тоді для досягнення концентрації пари, яка дорівнює нижній КМПП, необхідна температура рідини на декілька градусів більше, ніж нижня ТМПП. Таку температуру рідини називають «*температура спалаху*»; вона є важливим параметром для визначення ступеня пожежонебезпеки рідин на відкритому просторі та для категорювання приміщень, де ці рідини зберігаються.

*Температура спалаху* ( $t_{en}$ ) – це найменша температура рідини, за якої в умовах спеціальних випробувань над її поверхнею накопичується пара, здатна спалахувати під впливом короткочасної дії джерела запалювання середньої потужності, але без встановлення стійкого горіння. Стійке горіння над поверхнею рідини за такої температури не встановлюється через те, що інтенсивність випаровування рідини є меншою за інтенсивність вигорання пароповітряної суміші. За збільшення температури рідини інтенсивність її випаровування збільшується і за певної температури стає рівною інтенсивності вигорання пароповітряної суміші. Починаючи з такої найменшої температури (і за більших температур) після дії джерела запалювання та первинного спалаху, встановлюється вже стійке горіння.

*Температура займання* ( $t_3$ ) – це найменша температура рідини, за якої після короткочасної дії джерела запалювання встановлюється стійке горіння. За цієї температури інтенсивність випаровування рідини стає рівною інтенсивності вигорання пароповітряної суміші. Для легкозаймистих рідин дана температура на 1–5 °С є більшою за температуру спалаху, а для горючих рідин – на 30–35 °С.

Температура спалаху також може змінюватися за зміни умов, в яких знаходиться рідина, основними з яких є:

- вміст кисню в окисному середовищі ( $\phi_{O_2} \uparrow t_{сп} \downarrow$ );
- домішки негорючих рідин або негорючих газів у пароповітряному середовищі ( $\phi_{нр}, \phi_{нг} \uparrow t_{сп} \uparrow$ );
- загальний тиск системи ( $P_{заг} \uparrow t_{сп} \uparrow$ );
- потужність джерела запалювання ( $E_{дз} \uparrow t_{сп} \downarrow$ );
- наявність вітрових навантажень. ( $v_{віт} \uparrow t_{сп} \downarrow$ ).

З урахуванням впливу цих факторів, повністю безпечна температура для зберігання рідин на відкритому просторі буде нижчою за температуру спалаху:  $t_{без} = t_{сп} - 35, \text{ } ^\circ\text{C}$ .

#### *Практичне значення температури спалаху*

1. За значенням температури спалаху визначають ступінь пожежної небезпеки рідин. Розрізняють *горючі* та *легкозайmistі рідини*. До класу *горючих* (ГР) відносять рідини з температурою спалаху в закритому тиглі більше за  $61 \text{ } ^\circ\text{C}$ ; вони спалахують за дії на пару джерела запалювання тільки за підвищених температур рідини. Якщо рідина має температурою спалаху в закритому тиглі  $61 \text{ } ^\circ\text{C}$  і нижче, її відносять до класу *легкозайmistих рідин* (ЛЗР). Легкозайmistі рідини з температурою спалаху  $28 \text{ } ^\circ\text{C}$  і нижче відносять до *особливо небезпечних рідин*.

2. Температуру спалаху використовують для категорювання приміщень за пожежною небезпекою, встановлення умов безпечного транспортування, зберігання, застосування рідин, вибору рівня захисту обладнання та інтенсивності подавання водопінних засобів гасіння під час пожежі.

### **1.3 Розрахунок тиску насиченої пари**

Збільшення температури рідини спричиняє посилення випаровування, підвищення тиску насиченої пари та її концентрації. Для тиску та концентрації насиченої пари існує пропорційність: 100 % пари рідини – утворюється, коли її тиск дорівнює атмосферному  $P_{заг}$ ; фактична концентрація пари рідини  $\phi_{нп}$  % – відповідає певному тиску насиченої пари  $P_{нп}$ . Тоді взаємозв'язок між концентрацією та тиском пари можна виразити формулою:

$$P_{нп} = P_{заг} \frac{\phi_{нп}}{100}, \text{ кПа} \quad (1.16)$$

або

$$\phi_{нп} = 100 \frac{P_{нп}}{P_{заг}}, \text{ \%}, \quad (1.17)$$

де  $\phi_{нп}$  – об'ємна концентрація насиченої пари у повітрі над поверхнею рідини, %;  $P_{нп}$  – тиск насиченої пари, кПа;  $P_{заг}$  – тиск пароповітряної суміші над поверхнею рідини, кПа.



Якщо за тиском насиченої пари розрахувати її фактичну концентрацію, то ступінь її пожежної небезпеки можна визначити за схемою на рис. 1.5.

Більш точно випаровування рідин описує *рівняння Клаузіуса–Клапейрона* як залежність тиску насиченої пари від температури рідини  $T_{\text{рід}}$  з урахуванням теплоти випаровування  $\Delta H_{\text{вип}}$  (варіанти рівняння (1.14)):  $\frac{d \ln P_{\text{нп}}}{dT} = \frac{\Delta H_{\text{вип}}}{RT_{\text{рід}}^2}$  або у

проінтегрованої формі: 
$$\ln \frac{P_{\text{нп}T_2}}{P_{\text{нп}T_1}} = \frac{\Delta H_{\text{вип}}}{R} \left( \frac{1}{T_{\text{рід}1}} + \frac{1}{T_{\text{рід}2}} \right).$$

У практичних розрахунках зміну тиску насиченої пари рідин та розчинів залежно від температури можна визначити за *рівнянням Антуана*:

$$\lg P_{\text{нп}} = A - \frac{B}{t_{\text{рід}} + C_a} \quad \text{або} \quad P_{\text{нп}} = 10^{A - \frac{B}{t_{\text{рід}} + C_a}}, \quad (1.18)$$

де  $t_{\text{рід}}$  – температура рідини, °C; A, B,  $C_a$  – константи Антуана, які визначають для рідини за довідниками (табл. 5 додатків).

Для багатьох поширених горючих рідин залежності зміни тиску насиченої пари від температури вже визначені та зведені у довідниках у вигляді таблиць (табл. 6 додатків). У цьому випадку розрахувати тиск насиченої пари рідини за певної температури можна методом *лінійної інтерполяції* відповідно до схеми:

$$t_{\phi} \begin{cases} \rightarrow t_1 \rightarrow P_{\text{нп}(t_1)} \\ \rightarrow t_2 \rightarrow P_{\text{нп}(t_2)} \end{cases} \rightarrow P_{\text{нп}(t_{\phi})}, \quad (1.19)$$

де  $t_{\phi}$  – фактична температура рідини для якої визначається тиск насиченої пари  $P_{\text{нп}(t_{\phi})}$ ;  $t_1, t_2$  – значення температур рідини, найближче менше та більше значення за таблицею до заданої  $t_{\phi}$ , °C;  $P_{\text{нп}(t_1)}, P_{\text{нп}(t_2)}$  – тиски насиченої пари, які відповідають прийнятим температурам рідини (табл. 6 додатків).

Тоді розрахунок тиску насиченої пари за даної температури виконують за *інтерполяційною* формулою:

$$P_{\text{нп}(t_{\phi})} = P_{\text{нп}(t_1)} + \frac{(t_{\phi} - t_1)(P_{\text{нп}(t_2)} - P_{\text{нп}(t_1)})}{(t_2 - t_1)}. \quad (1.20)$$

Для визначення ступеня пожежної небезпеки суміші рідин слід мати на увазі, що взаємна розчинність двох рідин змінюється в широких межах: від практично повної нерозчинності до можливості змішування в будь-яких співвідношеннях з утворенням однорідного розчину. Таким чином, суміші двох рідин можна поділити на три основні групи: взаєморозчинні; частково взаєморозчинні; та ті, що практично не розчиняються одна в одній. Органічні рідини, близькі за своєю хімічною будовою та властивостями, зазвичай

змішуються у всіх співвідношеннях, утворюючи однорідні розчини, наприклад, суміші бензолу й толуолу, етилового та бутилового спиртів тощо. Прикладом суміші рідин, частково розчинних одна в одній, є суміші ацетону і води, ефіру та води, ізобутилового спирту і води та багатьох інших. До третьої групи сумішей можна віднести суміші бензину та води, толуолу й води тощо.

Пожежну небезпеку становить пара, яка утворюється над поверхнею суміші рідини, якщо фактична концентрація пари перевищує нижню концентраційну межу поширення полум'я цієї пароповітряної суміші. Фактичну концентрацію пари суміші рідин можна визначити за величиною тиску насиченої пари, використовуючи певні закономірності для сумішей.

Так, тиск насиченої пари частково розчинних та нерозчинних одна в одній рідин визначають як суму тисків парів компонентів суміші (незалежно від їх вмісту в суміші):

$$P_{\text{нп}_{\text{сум}}} = \sum P_{\text{нп}_i}, \quad (1.21)$$

де  $P_{\text{нп}_i}$  – величина тиску насиченої пари  $i$ -го компонента суміші.

Тиск насиченої пари сумішей розчинних одна в одній рідин визначають, як суму тисків насиченої пари компонентів суміші відповідно до їх молярного вмісту за формулою:

$$P_{\text{нп}_{\text{сум}}} = \sum P_{\text{нп}_i} r_{\mu_i}, \quad (1.22)$$

де  $r_{\mu_i}$  – мольна частка  $i$ -го компонента суміші:

$$r_{\mu_i} = \frac{\frac{c_i}{\mu_i}}{\sum_{i=1}^k \frac{c_i}{\mu_i}} \quad \text{або} \quad r_{\mu_i} = \frac{\frac{\varphi_i \rho_i}{\mu_i}}{\sum_{i=1}^k \frac{\varphi_i \rho_i}{\mu_i}}, \quad (1.23)$$

де  $c_i$  – масова концентрація  $i$ -го компонента у складі суміші, мас. %;  $\varphi_i$  – об'ємна концентрація  $i$ -го компонента у складі суміші, %;  $\rho_i$  – густина  $i$ -го компонента у складі суміші,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $\mu_i$  – молярна маса  $i$ -го компонента суміші,  $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ;  $k$  – кількість компонентів суміші.

Фактичну концентрацію пари суміші рідин визначають за формулою (1.17) та враховують тиск насиченої пари саме для суміші. Ступінь пожежної небезпеки за фактичного атмосферного тиску та температури визначають шляхом порівняння фактичної концентрації пароповітряної суміші з КМПП. КМПП суміші газів або парів визначають за формулою *Ле-Шательє*, виходячи зі значень нижньої та верхньої КМПП для компонентів суміші:

$$\varphi_{\text{н(в)сум}} = \frac{\sum \varphi_i}{\sum \frac{\varphi_i}{\varphi_{\text{н(в)}i}}}, \quad \%$$

*Визначення пожежної небезпеки умов зберігання горючих рідин за тиском насиченої пари*

1. Визначити КМПП горючої рідини за довідником або за розрахунком.
2. Розрахувати *безпечні КМПП*:  $\varphi_{нб} = 0,9(\varphi_n - 0,21)$ , %;  $\varphi_{вб} = 1,1(\varphi_n + 0,42)$ , %.
3. Розрахувати тиск насиченої пари рідини за даної температури за формулами (1.16) або (1.18). Залежно від обраного методу розрахунку спочатку для даної горючої речовини визначити:
  - а) константи Антуана за довідником або табл. 5 додатків;
  - б) два значення температури  $t_1$  і  $t_2$  – найближчі до заданої  $t_\phi$ , і відповідні цим температурам значення тиску насиченої пари  $P_{нп(t_1)}$ ,  $P_{нп(t_2)}$  за довідником або табл. 6 додатків.
4. Розрахувати фактичну концентрацію насиченої пари рідини за формулою (1.8).
5. Порівняти фактичну концентрацію насиченої пари рідини з КМПП та встановити ступінь пожежної небезпеки за даних умов з використанням температурно-концентраційної шкали (рис.1.5).

#### **1.4 Розрахунок температурних меж поширення полум'я (ТМПП)**

За певних температур рідини концентрація її насиченої пари співпадає з нижньою або верхньою концентраційною межею поширення полум'я. Такі температури називають *температурними межами поширення полум'я* (ТМПП). Як і для концентраційних меж, розрізняють нижню і верхню температурні межі поширення полум'я рідини, які можна визначити за допомогою розрахункових методів.

Для розрахункового визначення *ТМПП індивідуальної горючої рідини* можна використовувати залежність тиску насиченої пари від температури, яка виражається *рівнянням Антуана* (1.18), звідки можна отримати вираз для будь-якої температури рідини, за якої над її поверхнею утворюється певне значення концентрації насиченої пари  $\varphi_{нп}$ :

$$t_{рід} = \frac{B}{A - \lg(0,01P_{заг}\varphi_{нп})} - C_a, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1.24)$$

Якщо врахувати, що ТМПП відповідають певним КМПП, то нижню або верхню ТМПП можна розрахувати за наступною формулою:

$$t_{н(в)} = \frac{B}{A - \lg(0,01P_{заг}\varphi_{н(в)})} - C_a, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1.25)$$

де  $t_{н(в)}$  – нижня або верхня ТМПП,  $^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_{н(в)}$  – нижня або верхня КМПП, %.

Якщо для рідини відома залежність тиску насиченої пари від температури, то ТМПП можна визначити *методом лінійної інтерполяції*:

$$t_{н(в)} = t_1 + \frac{(t_2 - t_1)(P_{нпн(в)} - P_{нпн(t_1)})}{(P_{нпн(t_2)} - P_{нпн(t_1)})}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1.26)$$

де  $P_{нпн(в)}$  – тиски насиченої пари горючої рідини, що відповідають нижній або верхній КМПП, кПа (розраховують за формулою (1.7), в яку підставляють концентрацію насиченої пари, рівну нижній або верхній КМПП відповідно);  $P_{нпн(t_1)}$ ,  $P_{нпн(t_2)}$  – найближчі менше та більше значення тиску насиченої пари до  $P_{нпн}$  або  $P_{нпв}$  (за температур рідини, що забезпечують нижню або верхню КМПП), кПа;  $t_1$ ,  $t_2$  – значення температур рідини, що відповідають тиску насиченої пари  $P_{нпн(t_1)}$ ,  $P_{нпн(t_2)}$ ,  $^\circ\text{C}$ , див. довідник або табл. 6 додатків.

За формулою (1.26) можна також уточнити зменшення *температури кипіння* за зменшення атмосферного тиску (або тиску в системі) від стандартного значення 101,3 кПа.

Якщо залежність тиску насиченої пари від температури не відома, для речовин, що містять хімічні елементи С, Н, О, N, значення нижньої та верхньої ТМПП можна визначити з урахуванням хімічної *структури молекули горючої речовини* за формулою:

$$t_{н(в)} = a_0 + a_1 t_{\text{кип}} + \sum a_j l_j, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1.27)$$

де  $a_0$  – для нижньої ТМПП:  $a_0 = -62,46 \text{ } ^\circ\text{C}$ , для верхньої ТМПП:  $a_0 = -41,43 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $a_1$  – для нижньої ТМПП:  $a_1 = 0,655$ , для верхньої ТМПП:  $a_1 = 0,723$ ;  $t_{\text{кип}}$  – температура кипіння горючої рідини,  $^\circ\text{C}$ ;  $l_j$  – кількість структурних груп  $j$ -го типу;  $a_j$  – коефіцієнт внеску  $j$ -ї структурної групи (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Коефіцієнти для розрахунку ТМПП за структурою речовини

Вид зв'язку	$a_j$ для $t_n$	$a_j$ для $t_v$	Вид зв'язку	$a_j$ для $t_n$	$a_j$ для $t_v$
C – C	-0,909	-1,158	C – N	-2,14	0,0967
C = C	-2,66	-4,64	N – H	6,53	6,152
C – H	-0,009	0,57	O – H	19,75	17,80
C – O	0,11	1,267	C = O	5,57	5,86
C...C (аром)	-0,733	-0,767			

Для деяких класів рідин встановлено прямий зв'язок ТМПП із температурою кипіння. Тоді ТМПП можна розрахувати з використанням констант гомологічного ряду за емпіричною формулою:

$$t_{н(в)} = k t_{\text{кип}} - l, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1.28)$$

де  $k$  та  $l$  – константи гомологічних рядів горючих рідин, див. табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Константи  $k$  та  $l$  гомологічних рядів для розрахунку ТМПП

Гомологічний ряд	Формула	Нижня ТМПП		Верхня ТМПП	
		$k$	$l$	$k$	$l$
нормальні алкани	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{CH}_3$	0,6957	73,8	0,7874	50,3
2-метилалкани	$(\text{CH}_3)_2\text{CH}(\text{CH}_2)_n\text{CH}_3$	0,6885	74,9	0,7900	52,2
нормальні алкени	$\text{CH}_2=\text{CH}(\text{CH}_2)_n\text{CH}_3$	0,6867	74,5	0,7976	49,5
1-фенилалкани	$\text{C}_6\text{H}_5(\text{CH}_2)_n\text{CH}_3$	0,6751	70,2	-	-
нормальні спирти	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{OH}$	0,5746	33,7	0,6928	15,0
ізоалкілкарбіноли	$(\text{CH}_3)_2\text{CH}(\text{CH}_2)_n\text{OH}$	0,6582	44,1	0,7278	21,5
складні ефіри – формиати	$\text{HCOO}(\text{CH}_2)_n\text{CH}_3$	0,5359	47,6	0,6050	25,0
складні ефіри – ацетати	$\text{CH}_3\text{COO}(\text{CH}_2)_n\text{CH}_3$	0,5940	50,9	0,7761	40,8
первинні нормальні алкіламіни	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{NH}_2$	0,5004	54,6	-	-

Як було відмічено, ТМПП можуть змінюватися у разі зміни зовнішніх умов, тому для гарантованого забезпечення пожежної безпеки експлуатації горючих рідин визначають *безпечні температурні межі* за формулами:

$$t_{\text{нб}} = 0,9(t_{\text{н}} - K_6) \quad \text{та} \quad t_{\text{вб}} = 1,1(t_{\text{в}} + K_6), \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (1.29)$$

де  $t_{\text{нб}}$ ,  $t_{\text{вб}}$  – нижня та верхня безпечні ТМПП,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{н}}$ ,  $t_{\text{в}}$  – нижня та верхня ТМПП,  $^\circ\text{C}$ ;  $K_6$  – коефіцієнт безпеки: для індивідуальних рідин та нафтопродуктів  $K_6 = 10,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ , для сумішей горючих рідин  $K_6 = 14,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ ; *зауваження*: якщо у дужках виходить від’ємне число, то для нижньої ТМПП замість коефіцієнта «0,9» необхідно брати «1,1», а для верхньої межі замість «1,1» необхідно брати «0,9».

Застосування ТМПП значно спрощує *визначення ступеня пожежної небезпеки горючих рідин*. Для цього необхідно порівняти фактичну температуру рідини з ТМПП та зробити висновок про ступінь пожежної небезпеки насиченої пари горючої рідини, яка утворюється за даної температури, відповідно до схеми, представленої на рис. 1.5. Якщо температура рідини є меншою за нижню безпечну ТМПП, то пара у закритому просторі є безпечною; якщо є більшою за верхню безпечну ТМПП – вибухобезпечною але пожежонебезпечною за розгерметизації ємності; якщо між нижньою та верхньою ТМПП – вибухонебезпечною; якщо потрапила у додаткові діапазони – небезпечною за зміни зовнішніх умов.

Оцінку нижньої та верхньої ТМПП бінарної неазеотропної *суміші взаєморозчинних рідин* можна провести за апроксимаційною формулою:

$$t_{\text{мсум}} = t_{\text{мА}} \frac{\varphi_{\text{А}}}{100} + t_{\text{мВ}} \frac{\varphi_{\text{В}}}{100} - f(t_{\text{мА}} - t_{\text{мВ}}), \quad (1.30)$$

де А, В – компоненти горючої суміші (компонент А – рідина з більшим значенням ТМПП або температури спалаху  $t_{\text{сп}}$ );  $\varphi_{\text{А}}$ ,  $\varphi_{\text{В}}$  – концентрація компонентів у рідкій фазі суміші, мас.%;  $t_{\text{мА}}$ ,  $t_{\text{мВ}}$  – нижня, верхня ТМПП або  $t_{\text{сп}}$  компонентів суміші,  $^\circ\text{C}$ ;  $f$  – коефіцієнт нелінійності внеску в значення  $t_{\text{мсум}}$  вмісту висококиплячого компонента, який визначають за таблицею 1.4.

Таблиця 1.4 – Коефіцієнт  $f$  для визначення ТМПП суміші взаєморозчинних рідин залежно від вмісту висококиплячого компонента «А»

$\varphi_A$ , мас. %	$f$	$\varphi_A$ , мас. %	$f$	$\varphi_A$ , мас. %	$f$
100	0	70	0,303	35	0,194
95	0,12	65	0,30	30	0,17
90	0,20	60	0,29	25	0,145
85	0,26	50	0,26	20	0,119
80	0,292	45	0,239	15	0,092
75	0,304	40	0,217	10	0,065

Для визначення ТМПП бінарних сумішей розроблено більш просту апроксимаційну формулу:

$$t_m = t_{mA} - (t_{mA} - t_{mB}) \sqrt[3]{\frac{\varphi_B}{100}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1.31)$$

де  $\varphi_B$  – вміст у суміші рідини з меншим значенням ТМПП, %;  $t_{mA}$ ,  $t_{mB}$  – нижня або верхня ТМПП компонентів суміші,  $^\circ\text{C}$ .

Для суміші взаєморозчинних горючих і негорючих рідин розрахунок нижньої ТМПП за методом сум виконують шляхом введення для негорючого компонента умовної нижньої ТМПП у вигляді скорегованого рівняння Антуана (1.24):

$$T_n = \frac{B}{A - \lg \frac{P_{\text{заг}}}{\gamma - 1}} - C_a, \text{ } \text{K},$$

де  $A$ ,  $B$ ,  $C_a$  – константи Антуана для негорючого компонента;  $P_{\text{заг}}$  – загальний тиск у пароповітряній суміші, кПа;  $\gamma$  – параметр флегматизуючої або інгібуючої дії негорючого компонента у паровій фазі (табл. 1.5).

Таблиця 1.5 – Значення параметра  $\gamma$ , констант Антуана, теплот випаровування деяких негорючих рідин

Речовина	$\gamma$	$A$	$B$	$C_a$	$\Delta H_{\text{вип.}}$ , кДж·моль <sup>-1</sup>
вода	1,13	3,901	422,95	100,9	44,0
тетрахлорметан*	4,80	7,665	1910,8	0	1,27

*Практичне значення ТМПП.* За допомогою ТМПП можна: 1) провести порівняння пожежної небезпеки рідин; 2) визначити область робочих температур технологічного обладнання; 3) визначити ступінь небезпеки пари за фактичних умов зберігання рідини; 4) визначити час року, коли пара даної рідини у закритому просторі – вибухонебезпечна. Робочі температури герметичного обладнання повинні бути нижче нижньої безпечної або вище верхньої безпечної ТМПП:  $t_{\text{роб.}} < t_{\text{нб}}$ ;  $t_{\text{роб.}} > t_{\text{вб}}$ .

*Визначення пожежної небезпеки умов зберігання горючих рідин з використанням параметра «ТМПП»*

1. Розрахувати нижню та верхню ТМПП рідини за стандартних умов за одним із наведених способів за формулами (1.25)–(1.28). Якщо параметри навколишнього середовища відрізняються від стандартних, краще використовувати формулу (1.25), яка враховує зміни КМПП та загального тиску пароповітряної суміші.

а) Розрахунок ТМПП за константами Антуана:

- визначити нижню та верхню КМПП горючої речовини за довідником або розрахувати;
- визначити константи Антуана за довідником або табл. 1 додатків;
- розрахувати ТМПП за формулою (1.25).

б) Розрахунок ТМПП методом лінійної інтерполяції:

- визначити нижню та верхню КМПП горючої речовини за довідником або розрахувати;
- визначити значення тиску насиченої пари, що відповідають нижній та верхній КМПП за формулою (1.16);
- для значень тиску насиченої пари, які відповідають нижній та верхній КМПП для даної горючої рідини, за табл. 6 додатків знайти найближче менше та найближче більше значення тиску та відповідні їм температури;
- розрахувати ТМПП за формулою (1.26).

в) Розрахунок ТМПП з використанням хімічної будови молекули:

- визначити температуру кипіння рідини за довідником або табл. 6 додатків (температура кипіння рідини за стандартних умов відповідає тиску її насиченої пари, що дорівнює зовнішньому тиску 101,3 кПа);
- записати структурну формулу молекули горючої рідини та визначити кількість структурних груп даного типу  $l_j$  та відповідний даній структурній групі коефіцієнт  $a_j$  за табл. 1.2;
- розрахувати ТМПП за формулою (1.27).

г) Розрахунок ТМПП за константами гомологічного ряду:

- визначити температуру кипіння рідини за довідником або табл. 6 додатків;
- визначити згідно з гомологічним рядом даної горючої рідини константи  $k$  і  $l$  для нижньої та верхньої ТМПП за таблицею 1.3;
- розрахувати ТМПП за формулою (1.28).

2. Розрахувати безпечні ТМПП горючої рідини за формулами (1.29).

3. Порівняти фактичну температуру рідини з ТМПП і зробити висновок про ступінь пожежної небезпеки насиченої пари, що утворюється за даної температури над поверхнею рідини.

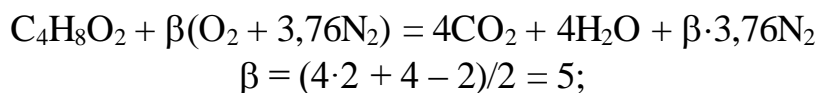
4. Зробити висновок про час року, коли утворюються вибухонебезпечні концентрації насиченої пари над поверхнею рідини за умов зберігання у закритому просторі. Зробити висновок про безпечні температури зберігання та використання рідини у закритому просторі.

### Приклад розв'язання задачі

Визначити ТМПП етилацетату  $C_4H_8O_2$ , та небезпеку умов зберігання, якщо тиск пароповітряної суміші над поверхнею рідини у закритому апараті становить 95 кПа, а температура рідини становить 20 °С.

#### Розв'язання

1. Розраховуємо нижню та верхню КМПП етилацетату за апроксимаційною формулою з використанням рівняння реакції горіння:



$$\varphi_H = \frac{100}{8,684 \cdot 5 + 4,769} = 2,08 \text{ \%};$$

$$\varphi_B = \frac{100}{1,55 \cdot 5 + 0,65} = 12,0 \text{ \%}.$$

2. Визначаємо константи Антуана етилацетату за табл. 5 додатків:

$$A = 6,2267; B = 1244,95; C_a = 217,88.$$

3. Визначаємо ТМПП етилацетату з урахуванням загального тиску пароповітряної суміші за формулою (1.25):

$$t_H = \frac{1244,95}{6,2267 - \lg(0,01 \cdot 95 \cdot 2,08)} - 217,88 = -7,97 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_B = \frac{1244,95}{6,2267 - \lg(0,01 \cdot 95 \cdot 12,0)} - 217,88 = 22,93 \text{ }^\circ\text{C}.$$

4. Визначаємо безпечні ТМПП етилацетату за формулою (1.29) з урахуванням коефіцієнта безпеки для індивідуальних рідин (також корегуємо формулу для нижньої безпечної ТМПП; оскільки вона виявилася від'ємною, тоді замість «0,9» беремо «1,1»):

$$t_{H6} = 1,1(-7,97 - 10,5) = -20,3 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_{B6} = 1,1(22,93 + 10,5) = 36,8 \text{ }^\circ\text{C};$$

Висновок: ТМПП етилацетату  $C_4H_8O_2$  за атмосферного тиску 95 кПа дорівнюють  $t_H = -7,97 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_B = 22,93 \text{ }^\circ\text{C}$ ; тоді найбільш небезпечні періоди року для зберігання даної рідини – весна та осінь, а за температури 20 °С насичена пара є вибухонебезпечною, оскільки потрапляє у розрахований діапазон вибухонебезпеки  $-7,97 - 22,93 \text{ }^\circ\text{C}$ . Безпечні температури використання етилацетату в закритому просторі становлять менше, ніж  $-20,3 \text{ }^\circ\text{C}$ , та більше, ніж  $36,8 \text{ }^\circ\text{C}$ .



## 1.5 Розрахунок температури спалаху

Виникнення горіння пари рідини від джерела запалювання може статися лише за умови, що концентрація пари у суміші з повітрям досягне значення нижньої КМПП. Якщо рідина знаходиться у відкритій ємності, частина пари весь час дифундує в навколишній простір, і для досягнення концентрації пари, що дорівнює нижній КМПП, рідину необхідно нагріти до температури, яка на декілька градусів більше, ніж нижня ТМПП. Таку температуру називають температурою спалаху.

Як було сказано раніше, значення температури спалаху лежить в основі класифікації рідин за ступенем їх пожежної небезпеки (розрізняють горючі, легкозаймисті та особливо небезпечні рідини); цей параметр використовується для визначення категорії пожежної небезпеки приміщень, а також умов безпечного транспортування, зберігання та застосування горючих рідин. Вважається, що *безпечною температурою експлуатації рідини*, що знаходиться на відкритому просторі, є температура на 35 °С менша за температуру спалаху, яку визначено експериментально у закритому тиглі:

$$t_{\text{безпід}} = t_{\text{сп}} - 35 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (1.32)$$

Експериментальне значення температури спалаху залежить від умов проведення випробування: її визначають у відкритому (в.т.) або у закритому тиглі (з.т.) як найменшу температуру рідини, за якої можна запалити пару над її поверхнею джерелом запалювання короточасної дії.

Найпростіший, але найменш точний розрахунок температури спалаху індивідуальної рідини можна провести за *формулою Еллея*:

$$t_{\text{сп}} = t_{\text{кип}} - 18\sqrt{K_{\text{Г}}} \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1.33)$$

$$K_{\text{Г}} = 4n_{\text{C}} + 4n_{\text{S}} + n_{\text{H}} + n_{\text{N}} - 2n_{\text{O}} - 2n_{\text{Cl}} - 3n_{\text{F}} - 5n_{\text{Br}}, \quad (1.34)$$

де  $K_{\text{Г}}$  – коефіцієнт горючості;  $n_{\text{C}}$ ,  $n_{\text{S}}$ ,  $n_{\text{H}}$ ,  $n_{\text{N}}$ ,  $n_{\text{O}}$ ,  $n_{\text{Cl}}$ ,  $n_{\text{F}}$ ,  $n_{\text{Br}}$  – кількість атомів даного типу у складі молекули.

Більш точно температуру спалаху, яка відповідає випробуванням в умовах закритого або відкритого тиглю, а також температуру займання можна визначити з урахуванням *структури горючої речовини* за формулою:

$$t_{\text{сп}} = a_0 + a_1 t_{\text{кип}} + \sum a_j l_j, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1.35)$$

де  $a_0$  – для  $t_{\text{сп}}$   $a_0 = -73,14 \text{ } ^\circ\text{C}$ , для  $t_{\text{займ}}$   $a_0 = -47,8 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $a_1$  – для  $t_{\text{сп}}$   $a_1 = 0,659$ , для  $t_{\text{займ}}$   $a_1 = 0,882 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{кип}}$  – температура кипіння горючої рідини, °С;  $a_j$  – коефіцієнт внеску  $j$ -ї структурної групи (табл. 1.6);  $l_j$  – кількість структурних груп  $j$ -го типу в молекулі.

Таблиця 1.6 – Константи  $a_j$  структурних груп для визначення температури спалаху та температури займання

Структурна група	$a_j, ^\circ\text{C}$			Структурна група	$a_j, ^\circ\text{C}$	
	$t_{\text{сп}} (\text{з.т.})$	$t_{\text{сп}} (\text{в.т.})$	$t_{\text{займ}}$		$t_{\text{сп}} (\text{з.т.})$	$t_{\text{сп}} (\text{в.т.})$
C – C	-2,03	3,63	0,027	C – S	2,09	14,86
C <sup>≡</sup> C (аром)	-0,28	6,48	-2,069	Si – Cl	10,07	50,49
				Si – H	11,00	-4,58
C = C	1,72	-4,18	-8,98	C = S	-11,91	
C – H	1,105	0,35	-2,12	S – H	5,64	10,75
C – O	2,47	4,62	-0,11	P – O	3,27	22,23
C = O	11,66	25,36	-0,826	P = O	9,64	-9,86
C – N	14,15	-7,03	-5,876	C – Si	-4,84	
C ≡ N	12,13			C – F	3,33	
O – H	23,90	44,29	8,22	C – Cl	15,11	
N – H	5,83	18,15	-0,261	C – Br	19,40	

У межах гомологічного ряду значення температури спалаху рідин монотонно зростають зі збільшенням молярної маси та пропорційно до температури кипіння. Існує формула, яка враховує лінійну залежність зростання температури спалаху від температури кипіння для певних гомологічних класів хімічних сполук:

$$t_{\text{сп}} = bt_{\text{кип}} + a, ^\circ\text{C}, \quad (1.36)$$

де  $a, b$  – константи гомологічних рядів горючих рідин (табл. 1.7).

Таблиця 1.7 – Константи  $a$  та  $b$  для визначення температури спалаху

Клас речовин	Коефіцієнти		Клас речовин	Коефіцієнти	
	$a, ^\circ\text{C}$	$b$		$a, ^\circ\text{C}$	$b$
алкани	-73,22	0,693	спирти	-41,69	0,652
ароматичні вуглеводні	-67,83	0,665	карбонові кислоти	-43,57	0,708
алкілфеноли	-38,42	0,623	кетони	-52,69	0,643
алкіланіліни	-21,94	0,553	бромалкани	-49,56	0,665
альдегіди	-74,76	0,813	хлоралкани	-55,70	0,631

Температуру спалаху з низькою похибкою можна оцінити за універсальною формулою, спираючись на значення теплоти випаровування  $\Delta H_{\text{вип}}$ , температури кипіння  $t_{\text{кип}}$  та нижньої КМПП  $\varphi_{\text{н}}$  рідини:

$$t_{\text{сп}} = 1,75 \cdot \Delta H_{\text{вип}}^{0,4} \cdot t_{\text{кип}}^{0,6} \cdot \left( \frac{\varphi_{\text{н}}}{7} \right)^{0,07} - 86,8, ^\circ\text{C}, \quad (1.37)$$

де «7» – нижня КМПП метанолу як рідини з найбільшим значенням  $\varphi_{\text{н}}$ .

Між  $t_{\text{сп}}$  речовини в закритому тиглі та нижньою ТМПП для діапазону  $0 \leq t_{\text{сп}} \leq 160 ^\circ\text{C}$  існує взаємозв'язок:  $t_{\text{сп}} = 1,14(t_{\text{н}} + 2), ^\circ\text{C}$ , де  $t_{\text{н}}$  – нижня ТМПП рідини,  $^\circ\text{C}$ .

Орієнтовну оцінку температури спалаху бінарної суміші взаєморозчинних

рідин, які не утворюють азеотропних сумішей, можна провести за формулою (1.30) або (1.31).

Суміш горючої рідини з негорючою за певного розбавлення перетворюється на негорючу суміш. Це відбувається тому, що, по-перше, зменшується концентрація горючого компонента у паровій фазі, а по-друге збільшується концентрація негорючого компонента, що створює ефект *флегматизації* – перетворення газової суміші на негорючу за рахунок додавання негорючого компонента. Оскільки концентрація пари залежить від температури, то існує температурний критерій флегматизації пароповітряного простору над розведеними водяними розчинами  $K_{фл}$ . Він враховує той факт, що температура спалаху з розведенням збільшується інтенсивніше, ніж верхня температурна межа. Тоді за певного вмісту негорючої складової у рідкій фазі досягається умова, коли нижня та верхня КМПП стають рівними. Спалах пари за такого співвідношення горючої та негорючої складових суміші стає неможливим. При цьому прийнято, що в цей момент відхилення розрахованої температури спалаху суміші від її верхньої ТМПП не перевищує 5 %:  $K_{фл} = \frac{t_v - t_{сп}}{t_{сп}} < 0,05$ .

*Визначення пожежної небезпеки рідини за її температурою спалаху*

1. Визначити температуру кипіння рідини за довідником або табл. 6 додатків (останній стовпчик – для тиску 101,3 кПа).
2. Визначити температуру спалаху рідини за однією з наведених вище методик за формулами (1.33)–(1.37).
3. Визначити *клас пожежної небезпеки* рідини (стор. 24), порівнюючи температуру спалаху із граничними температурами 61 °С та 28 °С.
4. Розрахувати безпечну температуру експлуатації рідини за формулою (1.32).

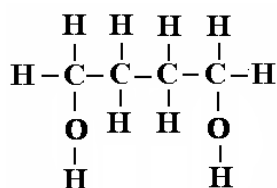
*Приклад розв'язання задачі*

Розрахувати температуру спалаху в закритому та відкритому тиглі, температуру займання бутандіолу-1,4  $C_4H_{10}O_2$  з урахуванням структури горючої рідини; визначити клас та ступінь пожежної небезпеки за температури зберігання 5 °С.

*Розв'язання*

1. Визначаємо температуру кипіння бутандіолу-1,4 за довідником:  $t_{кип} = 228$  °С.

2. Записуємо структурну формулу бутандіолу-1,4:



3. Визначаємо кількість структурних груп  $j$ -го типу та відповідні коефіцієнти  $a_j$  кожної структурної групи за табл. 1.6.

Тип структурної групи	Кількість груп, $\ell_j$	$a_j, ^\circ\text{C}$		
		$t_{\text{сп(з.т.)}}$	$t_{\text{сп(в.т.)}}$	$t_{\text{займ}}$
C – C	3	-2,03	3,63	0,027
C – H	8	1,105	0,35	-2,12
C – O	2	2,47	4,62	0,11
O – H	2	23,90	44,29	8,22

4. Розраховуємо температуру спалаху бутандіолу-1,4 у закритому та відкритому тиглі та температуру займання за формулою (1.35):

$$t_{\text{сп(з.т.)}} = -73,14 + 0,659 \cdot 228 + (-2,03) \cdot 3 + (1,105) \cdot 8 + 2,47 \cdot 2 + 23,9 \cdot 2 = 132,6 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{сп(в.т.)}} = -73,14 + 0,659 \cdot 228 + 3,63 \cdot 3 + 0,35 \cdot 8 + 4,62 \cdot 2 + 44,29 \cdot 2 = 188,6 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{займ}} = -47,8 + 0,882 \cdot 228 + 0,027 \cdot 3 + (-2,12) \cdot 8 + (-0,11) \cdot 2 + 8,22 \cdot 2 = 152,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Висновок: бутандіол-1,4 відноситься до горючих рідин, оскільки має температуру спалаху в закритому тиглі більше  $61 \text{ } ^\circ\text{C}$ ; температура зберігання є меншою, ніж максимальна безпечна, згідно з формулою (1.32), тому умови зберігання є безпечними.

## 1.6 Види виникнення горіння рідин

*Виникнення горіння* – це швидкий перехід від повільної реакції до миттєвої вибухоподібної шляхом самоприскорення.

Горіння виникає за наявності *горючої суміші* (й горючої речовини, й окисника у достатніх концентраціях) після дії теплового імпульсу достатньої потужності (іскра, розжарені поверхні, адіабатичне стиснення або внутрішні екзотермічні процеси). Оскільки потрібно сумішеутворення у достатніх концентраціях, то *виникнення горіння рідин* є можливим лише у разі їх переходу в пароподібний стан з утворенням вибухонебезпечної повітряної суміші з концентраціями пари в межах КМПП (існує лише один варіант горіння речовини у рідкому стані – це горіння розжарених нелетких металів). Це означає, що у разі, якщо температура рідини є меншою за її температуру спалаху (або безпечної температури з урахуванням наявності вітру, формула (1.32)), то над поверхнею рідини утворюється безпечна пароповітряна суміш, яка містить недостатню кількість парів горючої рідини, тому є негорючою.

Відповідно до *теплової теорії виникнення горіння* у зоні горіння виділяється енергія реакції, тому зростають швидкість руху молекул, та швидкість хімічної реакції. Якщо інтенсивність тепловиділення перевищує тепловіддачу в навколишній простір, то температура системи зростає і може досягти значення температури горіння. Водночас, як тільки виникає різниця температур із навколишнім середовищем, виникає й тепловіддача від

горючої системи шляхом конвекції. Існує *температура самонагрівання*, за якої інтенсивності тепловиділення і тепловіддачі є рівними, і може початися *самонагрівання* – самовільне підвищення температури системи за рахунок тепловиділення внутрішніх екзотермічних процесів та наявності сприятливих умов для накопичення тепла. У такому разі спричиняється самоприскорення реакції внаслідок підвищення температури системи та виникає горіння.

Розрізняють самовільний та вимушений механізми виникнення горіння. *Вимушене запалювання* – ініціювання горіння джерелом запалювання з достатніми температурою та потужністю, самовільне запалювання – самовільне ініціювання горіння певними процесами всередині горючої системи. Самозапалювання можна поділити на *самоспалахування* – самовільне виникнення горіння у всій горючій повітряній системі та самозагоряння – самовільне утворення у купі твердої речовини розжареного осередку, здатного до запалювання. Самозагоряння можна поділити на: *самозаймання* – як самозагоряння з виникненням полум'яного горіння; та саможевріння – як самозагоряння без полум'яного горіння.

Таким чином, головна різниця між самоспалахуванням та самозайманням полягає у тому, що за *самоспалахування* нагрівається вся горюча система і за критичної температури сама вся водночас запалюється, причому це можливо й для відкладень *аерогелю* – пилу, який осів із повітря; а за *самозаймання* – тепло накопичується в частині твердої горючої системи за рахунок внутрішніх екзотермічних процесів, що викликає появу горіння, часто у вигляді саможевріння, з подальшим розширенням осередку до поверхні твердого матеріалу. Головною ознакою *вимушеного запалювання* є те, що горіння виникає у одній точці горючої суміші внаслідок дії високотемпературного невеликого джерела запалювання, після чого горіння поширюється з певною швидкістю на всю систему.

Перед кожним із цих видів виникнення горіння існує проміжний період самоприскорення реакції та накопичення її тепла, що приводить до *самонагрівання* системи. Час, протягом якого розвиваються відповідні процеси, називають *періодом індукції*. *Загальні ознаки видів виникнення горіння*: необхідна температура системи є більшою за критичну; інтенсивність тепловиділення в системі повинна бути більшою, ніж інтенсивність тепловтрат у навколишній простір; існує *період індукції* – затримка перед виникненням горіння, під час якої протікають самонагрівання та підготовчі процеси: нагрівання горючої суміші; розкладання або випаровування твердих і рідких горючих речовин; окиснення газоподібних продуктів із виділенням тепла; самонагрівання горючої системи від початкової температури до температури горіння; виникнення горіння.

*Особливості самозаймання*. Самозаймання виникає у скупченні твердого матеріалу в зоні з малою тепловіддачею, тому навіть за умови невеликого виділення тепла всередині системи може початися накопичення тепла. Найменшу температуру речовини, за якої починається її самонагрівання,

називають *температурою самонагрівання*  $t_{\text{сн}}$ . Виникнення горіння речовин за рахунок їх самонагрівання під впливом внутрішніх екзотермічних процесів (фізичних, хімічних, мікробіологічних, термічних) за відсутності джерела запалювання називається *самозайманням*.

До самозаймання схильні тверді речовини: деякі метали, вугілля, торф, рослинні матеріали. Більш схильні до самозаймання пористі, волокнисті, сипкі тверді речовини, усередину яких може проникати кисень. Якщо у речовини  $t_{\text{сн}} > 50$  °С, вона схильна до самозаймання лише за її нагрівання; якщо  $t_{\text{сн}} < 50$  °С, то такі речовини – *пирофорні*, схильні до самозаймання без додаткового нагрівання за умов звичайного зберігання.

Для самозаймання необхідні: первинний тепловий імпульс всередині системи, який викликає процеси окиснення горючої речовини, і можливість накопичення цього тепла всередині системи. Горіння виникає через період індукції в частині горючої системи з найменшою тепловіддачею. *Період індукції*, який має місце перед самозайманням, серед інших видів виникнення горіння є найбільшим і може становити від секунд до кількох місяців.

За первинним фактором, що ініціює самонагрівання твердої речовини, розрізняють 4 види самозаймання: *мікробіологічне, хімічне, фізичне та теплове*.

*Хімічне самозаймання* виникає у місці контакту речовин, які реагують із виділенням тепла: 1) з киснем повітря; 2) із водою; 3) з іншими окисниками.

*Фізичне самозаймання* є наслідком тепловиділення фізичних процесів: 1) адсорбція – поглинання газів на поверхні твердих речовин; 2) абсорбція – розчинення парів і газів у рідинах; 3) тепловиділення за умов тертя.

*Мікробіологічне самозаймання* властиве рослинним матеріалам, у яких можлива життєдіяльність мікроорганізмів. Таке самозаймання відбувається в товщі скупчення матеріалу, який тривало зберігається в умовах вологості.

*Теплове самозаймання* виникає за умови нагрівання речовини до температури термічного розкладання. У процесі окиснення продуктів розкладання горючої речовини виділяється тепло реакції, що викликає самонагрівання. Процес протікає у глибині матеріалу у формі тління, яке потім може перейти у полум'яне горіння на поверхні.

*Рідини* можуть брати участь у *процесах хімічного самозаймання*. Найчастіше це має місце у разі просочення рідиною, схильною до окиснення у певному середовищі (наприклад, на повітрі), твердого волокнистого або пористого матеріалу. До окиснення на повітрі схильні вуглеводні з ненасиченими зв'язками, наприклад,  $-C=C-$ . За місцем ненасиченого зв'язку протікають процеси окиснення з виділенням тепла, яке накопичується в об'ємі волокнистого матеріалу. Відповідними рідинами можуть бути жири рослинного та тваринного походження, які складаються із суміші гліцеридів насиченої та ненасиченої будови.

Якщо у складі жиру або інших рідин є молекули з ненасиченими зв'язками ( $C=C$ ), то вони можуть бути схильні до *хімічного самозаймання* на повітрі. Таку схильність визначають за *йодним числом* – кількістю грамів йоду  $I_2$ , який може

приєднатися до 100 г жиру (за дослідом або за розрахунком). Якщо приєднується 50 г або більше йоду, то це свідчить про схильність жиру до можливості ініціювання самозаймання обмаслених матеріалів. Машинні мастила не містять ненасичених зв'язків, проте ці зв'язки з'являються у відпрацьованому мастилi, що може призвести до самозаймання обмаслених матеріалів. Такі матеріали можуть загорятися і за механізмом *фізичного самозаймання*, коли первинне тепло у матеріалі накопичується за рахунок тертя, що ініціює наступні процеси окиснення та самонагрівання.

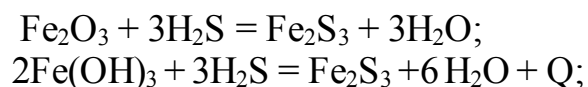
Рідкі рослинні олії, жири та інші хімічні речовини, які існують у рідкому стані, можуть самозайматися за контакту із твердими окисниками; наприклад, до таких процесів відноситься реакція гліцерину з перманганатом калію:



Рідкою системою, здатною до хімічного самозаймання на повітрі, є розчин фосфору в сірковуглеці. За розливання цієї системи на поверхнях сірковуглець випаровується, фосфор контактує з повітрям, окислюється та самозаймається. Сірковуглець має низьку температуру самоспалахування, тому нагріта фосфором поверхня запалює пароповітряну суміш.

У ракетній техніці досліджено багато дієголічних систем, у яких рідкий вуглеводень реагує з іншим компонентом із виникненням горіння (іноді потрібний каталізатор): з перманганатом калію або натрію, пероксидами водню або лужних металів, тетранітрометаном, закисом азоту, чотириокисом діазоту, азотною кислотою, хромовим ангідридом, трифторидом хлору, стиснутим киснем, хлором тощо.

Ще один варіант *хімічного самозаймання* за участю рідини можливий у резервуарі з нафтою (та деякими іншими нафтопродуктами), яка містить сірководень  $\text{H}_2\text{S}$ . Тоді, за умов корозії стінок резервуара, спостерігаються реакції з утворенням пірофорного «сірчистого заліза»:



тепловиділення цих реакцій викликає самозаймання пірофорного заліза на стінках резервуара, що може призвести до запалювання парів горючих рідин в об'ємі резервуара з вибухом і початком пожежі.

Для профілактики самозаймання пірофорних відкладень на стінках резервуара вживають заходів: 1) очищення продукту, що зберігається, від сірководню; 2) застосування антикорозійного покриття стінок; 3) продування інертними газами для видалення  $\text{O}_2$ ; 4) охолодження резервуара водою шляхом повільного наповнення та повільного спуску води.

*Самоспалахування.* Якщо пароповітряна горюча система контактує з гарячою стінкою і нагрівається до критичної температури, то ініціюється реакція окиснення та виникає швидке самонагрівання цієї горючої системи, а через час індукції (1–20 с) відбувається одночасне *самоспалахування* всього об'єму суміші

без поширення горіння (*тепловий вибух*). Чим менше температура стінок, тим спостерігається більший *період індукції* до появи спалаху суміші. Існує найменша температура суміші, за якої може виникнути самоспалахування. Тому *температура самоспалахування* – це така найменша температура стінок посудини, за якої час індукції є максимальним.

Таким чином, *температура самоспалахування*  $t_{cc}$  – це найменша температура системи, за якої різко збільшується швидкість екзотермічної реакції та порушується теплова рівновага. При цьому виникає стрибкоподібне підвищення температури за рахунок самонагрівання горючої системи.

Виділяють три групи факторів, які впливають на значення  $t_{cc}$ :

- 1) фактори хімічної будови горючої речовини: теплота згорання; середня довжина карбонового ланцюга молекули, що визначається за просторовою структурою горючої речовини;
- 2) фактори складу горючої системи: наявність та концентрація горючої речовини, окисника; негорючих газів; каталізаторів або інгібіторів;
- 3) умови, в яких знаходиться горюча система: тиск, температура стінок; об'єм горючої системи, діаметр посудини; площа тепловідведення; коефіцієнт тепловіддачі.

Хімічна реакція окиснення відбувається швидше, з більшою повнотою протікання та більшим виділенням тепла за стехіометричної концентрації горючої речовини у суміші з повітрям. Оскільки при цьому спостерігається максимальне тепловиділення, то температура самоспалахування набуває мінімального значення, а пожежна небезпека створюється найбільша.

За стехіометричної концентрації горючої речовини, за інших рівних умов, головним фактором, що впливає на  $t_{cc}$ , є середня довжина карбонового ланцюга молекули. У загальному випадку – чим довшим є карбоновий ланцюг молекули, тим меншою є її температура самоспалахування.

Значення  $t_{cc}$  використовують для порівняння пожежної небезпеки речовин, визначення групи вибухонебезпечних сумішей горючих речовин з повітрям при виборі вибухозахищеного електрообладнання та для визначення допустимої температури нагрівання робочих поверхонь технологічного обладнання. Існують такі групи вибухонебезпечних сумішей за значенням  $t_{cc}$ : T1 –  $t_{cc}$  більша за 450 °С, T2 – 300–450 °С, T3 – 200–300 °С, T4 – 135–200 °С, T5 – 100–135 °С, T6 – 85–100 °С. Більш небезпечні рідини мають меншу  $t_{cc}$  для пароповітряної суміші.

Нагріту поверхню, що контактує з повітряною сумішшю даної речовини, можна вважати безпечною – такою, яка не може ініціювати самоспалахування, якщо її температура є меншою за найбільший безпечний рівень:

$$t_{без} = 0,8t_{cc}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (1.38)$$

Наприклад, така рідина як сірковуглець має  $t_{cc} = 102 \text{ } ^\circ\text{C}$ , а  $t_{без} = 81,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ , тоді для приміщень, де він зберігається або знаходиться у технологічному процесі, забороняється використання системи парового опалення, яке має  $t = 95 \text{ } ^\circ\text{C}$ .



Схожим чином до схильності повітряних сумішей вуглеводнів до самоспалахування поводить себе схильність до *детонації* – збільшується для більш довгих алканів. Відомо, що з підвищенням тиску знижується температура самоспалахування. Тоді умовою детонації повітряної суміші вуглеводню можна вважати такий тиск (та швидкість зростання тиску), за якого температура самоспалахування зрівнюється з температурою навколишнього середовища. Схильність до детонації визначають за октановим числом дослідницьким або моторним методами.

Основним параметром, який дозволяє розрізняти рідини за схильністю до самоспалахування, є довжина карбонового ланцюга молекули. Оскільки молекула може мати розгалужену будову, то визначають її середню довжину  $l_{\text{сер}}$  (середню довжину усіх можливих карбонових ланцюгів між кінцевими групами молекули). Характер зменшення температури самоспалахування, за умови зростання  $l_{\text{сер}}$ , приблизно описують формули Монахова:

$$t_{\text{cc}} = 300 + 116\sqrt{5 - l_{\text{сер}}} \quad \text{за } l_{\text{сер}} \leq 5, \quad (1.39)$$

$$t_{\text{cc}} = 300 - 38\sqrt{l_{\text{сер}} - 5} \quad \text{за } l_{\text{сер}} \geq 5. \quad (1.40)$$

Тобто чим більша середня довжина молекули, тим менше  $t_{\text{cc}}$ , а речовина легше самоспалахує та є більш небезпечною.

Середня довжина  $l_{\text{сер}}$  молекули дорівнює середньому арифметичному всіх можливих довжин ланцюгів  $l_i$  усередині молекули:  $l_{\text{сер}} = \sum l_i / n_{\text{ланц}}$ . Число ланцюгів молекули  $n_{\text{ланц}}$  дорівнює кількості можливих унікальних сполучень між кінцевими групами (за принципом комбінаторики). Кінцевими групами вважаються  $-\text{CH}_3$ ,  $=\text{CH}_2$ , функціональні групи (ОН,  $\text{COOH}$  та ін.) та цикли. Якщо функціональна група або цикл розташовані в середині ланцюга, їх слід вважати одночасно і кінцевою, і проміжною групою.

Розрахункова кількість атомів карбону в аліфатичному вуглеводні дорівнює фактичному числу атомів карбону в даному ланцюзі. Подвійний зв'язок  $\text{C}=\text{C}$  довжину ланцюга не змінює. Потрійний зв'язок  $\text{C}\equiv\text{C}$  збільшує довжину ланцюга на  $6/(m_{\text{C}}!)$  атомів карбону. Еквівалентна довжина функціональних груп  $-\text{O}-\text{C}_6\text{H}_5$  та  $-\text{COO}-$  дорівнює одиниці, груп  $-\text{NH}-$  і  $\text{N}\equiv$  дорівнює 2,5, а для  $-\text{O}-$  у сполуках, де атом кисню не з'єднаний з первинним або вторинним атомом карбону, становить 3,5. Якщо до молекули приєднано кілька функціональних груп, то довжина кожного ланцюга змінюється відповідно. Еквівалентна довжина неароматичного моноядерного циклу дорівнює числу атомів карбону в циклі, яке зменшено на 0,5. Ароматичне кільце з функціональними групами в *мета*- і *пара*-положенні в довжині карбонового ланцюга враховується як «1». Довжина ланцюга молекули  $l_i$  зростає на 2, якщо до складу входять дві групи або ланцюги, які приєднані до ароматичного циклу в орто-положенні. Розрахункова кількість атомів карбону в ланцюгу аліфатичного спирту дорівнює фактичному числу атомів карбону плюс одиниця (гідроксильна група).

Температуру самоспалахування окремих класів органічних сполук можна визначити шляхом перерахунку очікуваної  $t_{cc}$  для алкан-радикалу молекули:

$$t_{cc} = at_{cc}^{алк} + b, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1.41)$$

де  $a$ ,  $b$  – коефіцієнти гомологічного ряду речовини (табл. 1.8);  $t_{cc}^{алк}$  –  $t_{cc}$  алкану за середньою довжиною алкільного радикала молекули  $l_{сер}$ .

Таблиця 1.8 – Коефіцієнти визначення  $t_{cc}$  окремих класів органічних сполук

Гомологічний клас рідин	a	b
Спирти	0,6796	121,2
Сполуки із групою NH <sub>2</sub>	0,4722	170,4
Ароматичні сполуки	0,6412	252,9
Форміати	0,7719	81,5
Ацетати	0,7909	52,0
Пропіонати	0,7158	91,3
Кислоти	0,7556	86,0

Наведені методики часто дають значні похибки розрахунку. Частково це визначається тим, що вони не враховують ефектів перерозподілу електронної щільності у молекулі: індукційного та мезомерного. Їх сукупна дія визначає відмінності у реакційній здатності та значенні  $t_{cc}$  як для окремих класів речовин, так і в одному гомологічному ряду. У молекулах із еквівалентною довжиною, більшою за «10», спостерігається незначне зростання  $t_{cc}$ , що пов'язано із завершенням дії електронних ефектів і виникненням всередині молекули області з однаковою електронною густиною. У молекулах кетонів  $R-C(=O)-R$  та складних ефірів  $R_{сп}-O-C(=O)-R_k$  наявні мезомерний ефект в обидва боки від групи C=O та індукційні ефекти кінцевих груп до п'ятого атома карбону. Тому коротка молекула набуває підвищеної здатності до опору температурному впливу до десяти атомів карбону в ланцюгу. Цей вплив є сильнішим за індукційний ефект метилових груп ізомерних сполук, тому  $t_{cc}$  більшості кетонів слабо залежить від ізомеризації молекули. Тому середня довжина кетонів становить половину від числа атомів карбону  $m_c$  у головному ланцюгу молекули:  $l_{сер} = m_c/2$ .

Гомологічним рядам складних ефірів властиві важко прогнозовані відхилення від очікуваних залежностей. Так, ацетати з коротким спиртовим залишком мають  $t_{cc}$  трохи більшу, ніж форміати, які є коротшими ацетатів на одну карбонову ланку. Складні ефіри пропанової кислоти (пропіонати) за довжин спиртового залишку від 4 до 6 виявляють нетиповий максимум.

Вирішення цих проблем у прогнозуванні  $t_{cc}$  кисневмісних органічних сполук здійснено шляхом впровадження нової системи визначення середньої довжини молекули (табл. 1.9) та альтернативних формул визначення  $t_{cc}$  – як заміна методики Монахова та формул (1.39) та (1.40):

$$l_{\text{сер}} < 5: \quad t_{\text{cc}} = K_1 \cdot 200 + K_2 \cdot 100 \cdot e^{\sqrt{\frac{2,2}{l_{\text{сер}}}}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1.42)$$

$$l_{\text{сер}} \geq 5: \quad t_{\text{cc}} = K_1 \cdot 200 + \frac{K_2 \cdot 100}{(2l_{\text{сер}} - K_3)} \cdot e^{\sqrt{\frac{2,2}{l_{\text{сер}}}}} + K_4(2l_{\text{сер}} - 10), \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (1.43)$$

де  $l_{\text{сер}}$  – середня довжина молекули (табл.1.9);  $K_1$  – коефіцієнт мінімальної  $t_{\text{cc}}$  у гомологічному ряду;  $K_2$  – коефіцієнт зміни  $t_{\text{cc}}$  в гомологічних рядах відносно алканів;  $K_3$  – подвійна критична довжина молекули з мінімумом  $t_{\text{cc}}$ ;  $K_4$  – коефіцієнт збільшення  $t_{\text{cc}}$  для молекул із довжиною більше за «10».

Таблиця 1.9 – Визначення середньої довжини молекул органічних сполук та коефіцієнти рівнянь (1.42) та (1.43) для розрахунку  $t_{\text{cc}}$

Гомологічний ряд		$l_{\text{сер}}$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
кетони		$m_c/2$	1	1,0	9,4	0,25
складні ефіри <sup>1</sup>		$m_e/2$	1	1,0	9,0	0,25
альдегіди		$1 + 3m_c$	1,1	-1,0	9,0	0,25
Спирти <sup>2</sup> $l_{\text{max}} < 5$		$(m_{\text{сп}} + m_{\text{сер}})/2 - (3n_{\text{гр}} - 2)/m_c$	0,675	1,1	9,0	0,2
$l_{\text{max}} \geq 5$		$m_{\text{Cmax}}$	1,175			
прості ефіри нормальної будови <sup>3</sup>	$l_{\text{сер}} \leq 3$	$2 + m_c$	0,925	0,9	19	1
	$l_{\text{сер}} < 5$		0,925	0,8		
	$l_{\text{сер}} \geq 5$		0,925	-0,24		

<sup>1</sup> –  $m_e$  – еквівалентна кількість атомів «С» молекули складного ефіру (табл. 1.10);

<sup>2</sup> –  $l_{\text{max}}$  – за найдовшим «С-ОН»-ланцюгом;  $m_{\text{сп}}$  – максимальна довжина ланцюга (для багатоатомних спиртів – від групи ОН у боковому положенні);  $m_{\text{сер}} (max)$  – середня довжина С-ланцюга молекули спирту (для багатоатомних спиртів – найменша між групами ОН);  $n_{\text{гр}}$  – число метильних груп у положенні «1» або «2» від групи ОН (для молекул нормальної будови у розрахунку приймаємо  $(3n_{\text{гр}} - 2) = 0$ );

<sup>3</sup> – для диметилового ефіру  $K_2 = 0,9$ .

Таблиця 1.10 – Еквівалентна кількість атомів у молекулі складного ефіру

Гомологічний клас складного ефіру	Еквівалентна кількість атомів карбону	
	$m_{\text{c сп}} \leq 3$	$m_{\text{c сп}} > 3$
форміати	$m_e = 3 + m_c$	$m_e = 6 + m_c$
ацетати	$m_e = 1 + m_c$	$m_e = 4 + m_c$
пропіонати	$m_e = 1 + m_c$	$m_e = 3 + m_c$
бутирати	$m_e = 1 + m_c$	$m_e = 2 + m_c$
валеріати	$m_e = 1 + m_c$	$m_e = 1 + m_c$
гексаноати та інші	$m_e = m_{\text{c к}} + 0,25(m_{\text{c сп}} - 1)$	
ізомерна будова: $m_c < 9$	$m_{e \text{ із}} = m_e - 0,25$	
	$m_c \geq 9$	
	$m_{e \text{ із}} = m_e + 1,5/n_{\text{із груп}}$	

$m_c$  – число атомів «С» або у найдовшому ланцюгу складного ефіру;

$m_{\text{c сп}}, m_{\text{c к}}$  – число атомів карбону у спиртовому та кислотному радикалі складного ефіру;

$m_{e \text{ із}}$  – еквівалентна довжина молекули з ізомерною будовою спиртового залишку ефіру;

$n_{\text{із груп}}$  – кількість бокових ланцюгів у молекулі ізомерної будови.

Уніфікація розрахунку  $l_{\text{сер}}$  для різних гомологічних класів складних ефірів досягнуто шляхом впровадження наступної формули:

$$l_{\text{сер}} = K_1 1,65 \sqrt{m_{\text{сеп}}} + K_2 e^{-K_3 m_{\text{сеп}}} + K_4 m_{\text{с}} - \frac{K_5}{m_{\text{сеп}}}, \quad (1.44)$$

де  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$  – константи, пов’язані з перерозподілом дії електронних ефектів у молекулах складних ефірів різних гомологічних класів (табл. 1.11).

Таблиця 1.11 – Константи для визначення середньої довжини карбонового ланцюга молекули складного ефіру

Гомологічний клас складного ефіру за кислотним залишком		Константи рівняння (1.44)					
		K <sub>1</sub>		K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>	K <sub>5</sub>
		m <sub>с сеп</sub> ≤ 3	m <sub>с сеп</sub> > 3				
Форміати	HC(O)-O- R <sub>сеп</sub>	1	1,6	1,55	0,7	0	0
Ацетати	CH <sub>3</sub> -C(O)-O- R <sub>сеп</sub>	1	1,55	1,05	0,65	0	0
Пропіонати	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> -C(O)-O- R <sub>сеп</sub>	1	1,5	1,55	0,6	0	0
Бутирати	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> -C(O)-O- R <sub>сеп</sub>	1	1,45	1,15	0,3	0	0
Валеріати	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> -C(O)-O- R <sub>сеп</sub>	0	0	5	0,35	0,55	3,3
Гексаноати та ін.	R <sub>к</sub> -C(O)-O- R <sub>сеп</sub>	0	0	2,6	0,7	0,675	0

*Вимушене запалювання.* Якщо на горючу систему діє потужне джерело запалювання з температурою, яка значно більша, ніж температура самонагрівання, то температура горючої системи зростає дуже інтенсивно і відбувається її вимушене запалювання. *Джерелом запалювання* може бути відкрите полум’я, розжарене тіло, електричний розряд, які мають енергію та температуру, достатні для запалювання інших речовин. Виділяють безумовні джерела запалювання: прямі удари блискавок, потужні електричні дуги, полум’я газових пальників і сірники.

На відміну від самоспалахування, вимушене запалювання виникає за умови зовнішнього нагріву малої частини горючої системи малим джерелом тепла, від якого полум’я поширюється всю суміш. Оскільки джерело запалювання є малим, інтенсивність тепловтрат є значною, тому температура для запалювання  $t_{\text{зап}}$  необхідна більша, ніж температура самоспалахування. Горіння пошириться на всю горючу суміш, якщо за час дії джерела запалювання тепло не встигне розсіятися в холодну суміш шляхом теплопровідності, а біля стінки джерела запалювання утвориться прогрітий до температури запалювання  $t_{\text{зап}}$  шар товщиною  $\delta$ . За умови тривалого впливу джерела запалювання на горючу повітряну суміш,  $t_{\text{зап}}$  зменшується, але не менше, ніж до температури самоспалахування  $t_{\text{сс}}$ .

Для запалювання конденсованих речовин (рідин із температурою спалаху, більшою за температуру навколишнього середовища та твердих матеріалів) джерело запалювання повинно спочатку прогріти рідину до

температури спалаху, а твердий матеріал – до температури розкладання. Якщо енергії джерела запалювання вистачить на забезпечення цих процесів та прогрів газової фази, що утворилася, то полум'яне горіння почнеться.

За статистикою 40 % пожеж спричиняється тепловими проявами електричної енергії: електричні розряди статичної та атмосферної електрики; іскри та краплі металу під час короткого замкнення; нагрівання поверхонь ламп розжарювання, електричних проводів та контактів у разі перевантажень.

Існує деяка мінімальна енергія електричного розряду  $E_{\min}$ , яка достатня для прогріву сферичного об'єму холодної горючої суміші радіусом  $r_{\min}$  до температури горіння. При цьому виникає критичний незгасаючий елемент полум'я, здатний до поширення. Тобто існує мінімальна енергія, необхідна для запалювання для даної горючої речовини.

*Мінімальну енергію запалювання* за дослідом визначають як найменшу енергію електричного конденсатора, при розряді якого через повітряний проміжок виникає іскра, яка запалює стехіометричну суміш газу, пари або аерозолу горючої речовини з повітрям з імовірністю 0,01.

Якщо джерело запалювання має запас енергії, рівний або більший за мінімальну енергію запалювання  $Q_{\text{іск}} > E_{\min\Gamma P}$ , та достатню температуру  $t_{\text{зап}}$ , то запалювання відбудеться. Запас енергії нагрітої твердої частинки  $Q_{\text{іск}}$ , наприклад, *фрикційної іскри*, залежить від її маси, об'єму  $V_{\text{іск}}$ , густини матеріалу  $\rho_{\text{іск}}$ , теплоємності  $C_{p\text{ іск}}$ , перевищення температури  $t_{\text{іск}}$  над температурою самоспалахування:  $Q_{\text{іск}} = V_{\text{іск}}\rho_{\text{іск}}C_{p\text{ іск}}(t_{\text{іск}} - t_{\text{ссл}\Gamma P})$ .

*Фрикційні іскри* – це шматочки металу, відірвані та нагріті в умовах механічного впливу та частково окиснені. Процес окиснення може підвищити температуру іскри на 500 °С.

Мінімальну енергію запалювання даної речовини  $E_{\min}$  визначають шляхом розрахункового порівняння з відомими властивостями н-бутану за значенням нормальної швидкості поширення горіння  $u_n$  даної горючої речовини:

$$E_{\min} = 0,036/u_n^2, \text{ мДж.} \quad (1.45)$$

Розжарене тіло, яке діє на горючу систему, буде безпечним та не зможе запалити цю пароповітряну суміш або тверду речовину, якщо її енергія буде меншою, ніж безпечна:

$$E_{\text{без}} = 0,4E_{\min}, \text{ мДж,} \quad (1.46)$$

а температура буде меншою, ніж безпечна температура самоспалахування, яку можна розрахувати за формулою (1.38).

$E_{\min}$  зменшується зі збільшенням температури навколишнього середовища  $t_{\text{поч}}$ . Для перерахунку значень  $E_{\min}$ , які визначено для нормальних умов  $E_{\min}^0$ , на фактичну  $E_{\min}$  використовують залежність:

$$E_{\min} = E_{\min}^{\circ} \left( 1 - \frac{t_{\text{поч}}}{t_{\text{сс}}} \right), \text{ мДж.} \quad (1.47)$$

Дана формула передбачає, що для умов, коли температура середовища дорівнює температурі самоспалахування речовини, додаткова енергія для запалювання вже не потрібна, дорівнює «0».

Також існує енергія насичення для джерела запалювання. Якщо його енергія дорівнює  $E_{\min}$ , то таке джерело у змозі запалити повітряну суміш горючої речовини лише за стехіометричної концентрації. Якщо збільшити енергію джерела запалювання, то розшириться діапазон концентрацій (КМПП), за яких можливе ініціювання горіння; але після досягнення джерелом енергії насичення  $E_{\text{насич}}$  таке розширення припиняється. Значення  $E_{\text{насич}}$  пов'язане з  $E_{\min}$  для речовин які мають  $E_{\min} < 1,0$  мДж виразом:

$$E_{\text{насич}} = \left( -\frac{89}{56 \ln E_{\min}} \right)^{1,818}, \text{ мДж.} \quad (1.48)$$

*Визначення схильності жиру до хімічного самозаймання на повітрі за йодним числом* (методику можна поширити й на відпрацьовані мастила, якщо знати вміст насичених та ненасичених компонентів).

1. Встановити тип та вміст гліцеридів  $C_3H_{(8-k)}(COOC_nH_m)_k$  у складі жиру; розрахувати молярну масу кожного гліцериду у складі олії  $\mu_i$ .
2. Визначити вуглеводневий радикал гліцериду:  $R = C_nH_m$ .
3. Розрахувати число атомів гідрогену  $x$ , яких не вистачає для насиченого стану радикалу карбонової кислоти:  $x = 2n+1 - m$ .
4. Розрахувати число ненасичених зв'язків  $z$  у вуглеводневому радикалі даного гліцериду  $z = x \cdot 0,5$ .
5. Визначити число ненасичених зв'язків у складі кожного гліцериду, який входить до складу жиру;  $Z_i = k \cdot z$ , де  $k$  – число радикалів карбонової кислоти у будові гліцериду (від «1» до «3»).
6. Визначити йодне число кожного гліцериду зі складу жиру:

$$J_{\text{ч}} = \frac{254 \cdot Z_i \cdot 100}{\mu_i}, \text{ Г,}$$

де 254 – молярна маса йоду, г/моль.

7. Визначити йодне число жиру за йодними числами та концентраціями компонентів  $\varphi_i$ :

$$J_{\text{ч}} = \sum J_{\text{ч}i} \frac{\varphi_i}{100}, \text{ Г.}$$

8. Зробити висновок про схильність жиру до хімічного самозаймання на повітрі за порівнянням з критичним йодним числом – 50 г.

*Розрахунок стандартної температури самоспалахування речовини за середньою довжиною молекули*

1. Скласти структурну формулу молекули речовини.
2. Пронумерувати ланки у структурній формулі.
3. Визначити кількість кінцевих груп  $m$  у молекулі речовини.
4. Визначити кількість карбонових ланцюгів  $n_{\text{ланц}}$  у молекулі горючої речовини:  

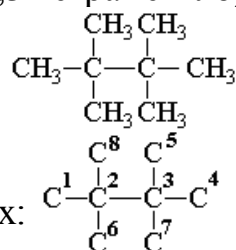
$$n_{\text{ланц}} = 0,5m(m - 1).$$
5. За структурою молекули визначити довжину кожного ланцюга  $l_i$ .
6. Провести розрахунок середньої довжини ланцюга  $l_{\text{сер}}$  молекули.
7. Визначити стандартну  $t_{\text{сс}}$  за формулами (1.39), (1.40) або (1.42), (1.43).
8. Для алкан-похідних визначити стандартну температуру самоспалахування за формулою (1.41).
9. Розрахувати максимальну безпечну температуру нагрівання робочих поверхонь за формулою (1.38).
10. Визначити групу вибухонебезпечних сумішей горючих речовин із повітрям.

#### *Приклад розв'язання задачі*

Розрахувати стандартну температуру самоспалахування 2,2,3,3-тетраметилбутану, порівняти розрахункове значення з дослідним – 430 °С. Визначити безпечну температуру нагрівання поверхонь і групу вибухонебезпечних сумішей парів 2,2,3,3-тетраметилбутану з повітрям.

#### *Розв'язання*

1. Записуємо структурну формулу 2,2,3,3-тетраметилбутану:



2. Нумеруємо атоми карбону в ланцюгах:

3. Визначаємо число кінцевих груп  $m$  у молекулі:  $\text{C}^1, \text{C}^5, \text{C}^6, \text{C}^7, \text{C}^8, \text{C}^9$ . Таким чином, кількість кінцевих груп  $m = 6$ .

4. Визначаємо число ланцюгів  $n_{\text{ланц}}$  у молекулі речовини:

$$n_{\text{ланц}} = 0,5m(m - 1) = 0,5 \cdot 6(6 - 1) = 15.$$

5. Визначаємо довжину кожного ланцюга  $l_i$ :

від кінцевої ланки «1»: 1-2-6, 1-2-8, 1-2-3-7, 1-2-3-5, 1-2-3-4;

від кінцевої ланки «8»: 8-2-6, 8-2-3-7, 8-2-3-5, 8-2-3-4;

від кінцевої ланки «6»: 6-2-3-7, 6-2-3-5, 6-2-3-4;

від кінцевої ланки «5»: 5-3-7, 5-3-4;

від кінцевої ланки «7»: 7-3-4;

Разом 15 ланцюгів, що й було прогнозовано попереднім розрахунком.

6. Розраховуємо середню довжину  $l_{\text{сер}}$  молекули 2,2,3,3-тетраметилбутану:

$$l_{\text{сер}} = \frac{3 \cdot 6 + 4 \cdot 9}{15} = 3,6.$$

7. Визначаємо стандартну температуру самоспалахування за формулою (1.39), оскільки  $l_{\text{сер}} \leq 5$ :

$$t_{\text{cc}} = 300 + 116\sqrt{5 - l_{\text{сер}}} = 300 + 116\sqrt{5 - 3,6} = 437,3 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

8. Розраховуємо максимальну безпечну температуру нагрівання робочих поверхонь за формулою (1.38):

$$t_{\text{роб без.}} \leq 0,8 \cdot t_{\text{cc}} = 0,8 \cdot 437,3 = 349,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

9. Визначаємо групу вибухонебезпечних сумішей 2,2,3,3-тетраметилбутану: оскільки  $t_{\text{cc}} = 437,3 \text{ } ^\circ\text{C}$  лежить у межах від 300 до 450  $^\circ\text{C}$ , то 2,2,3,3-тетраметилбутан відноситься до групи вибухонебезпечних сумішей T2.

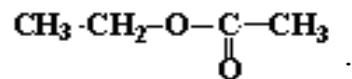
Висновок: розрахункова стандартна температура самоспалахування 2,2,3,3-тетраметилбутану дорівнює 437,3  $^\circ\text{C}$ , що є близьким до довідкових даних – 430  $^\circ\text{C}$ . Температура нагрівання поверхонь технологічного обладнання, що може контактувати з парою даної рідини, не повинна перевищувати 349,8  $^\circ\text{C}$ . Пара 2,2,3,3-тетраметилбутану за стехіометричної суміші з повітрям відноситься до групи вибухонебезпечних сумішей T2, оскільки  $t_{\text{cc}} = 437,3 \text{ } ^\circ\text{C}$  лежить у межах від 300 до 450  $^\circ\text{C}$ .

#### *Приклад розв'язання задачі*

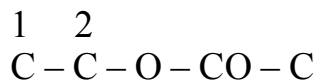
Розрахувати стандартну температуру самоспалахування етилацетату  $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$  та безпечну температуру нагрівання поверхонь обладнання.

#### *Розв'язання*

1. Складаємо структурну формулу етилацетату:



2. Нумеруємо атоми карбону в ланцюгу етил-радикалу молекули, не записуючи при цьому атоми водню карбонового ланцюга:



3. Визначаємо кількість кінцевих груп у молекулі етил-радикалу:  $m = 2$ .

4. Визначаємо число ланцюгів  $n_{\text{ланц}}$  у молекулі речовини:

$$n_{\text{ланц}} = 0,5m(m - 1) = 0,5 \cdot 2 \cdot (2 - 1) = 1.$$

5. Визначаємо довжину ланцюга  $l_i$  за ланками: «1-2»:  $l_{\text{сер}} = 2$ .

6. Визначаємо температуру самоспалахування алкан-радикалу: довжині ланцюга «2» відповідає етан, який має  $t_{\text{cc}} = 515 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

7. Визначаємо стандартну температуру самоспалахування за формулою (1.41) з використанням табл. 1.8 за ацетатами:  $a = 0,7909$ ,  $b = 52$ ;

$$t_{\text{cc}} = 0,7909 \cdot 515 + 52 = 459,3 \text{ } ^\circ\text{C}.$$



8. Розраховуємо максимальну безпечну температуру нагрівання робочих поверхонь за формулою (1.38):

$$t_{p. без} = 0,8 \cdot 459,3 = 367,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

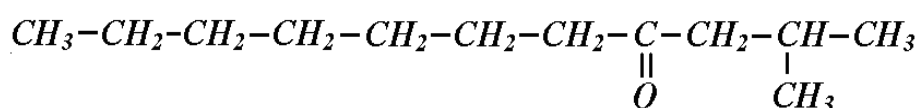
Висновок: стандартна температура самоспалахування етилацетату становить 459,3 °С. Температура нагрівання поверхонь технологічного обладнання не повинна перевищувати 367,5 °С.

### *Приклад розв'язання задачі*

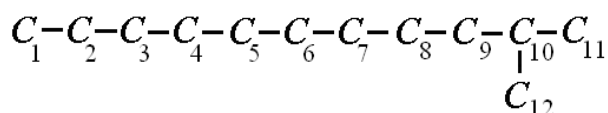
Розрахувати стандартну  $t_{cc}$  гептилізобутилкетону  $C_{12}H_{24}O$ .

#### *Розв'язання*

1. Складаємо структурну формулу гептилізобутилкетону:



2. Для зручності нумеруємо атоми карбону в ланцюгах, не записуючи при цьому атоми гідрогену, а також кисню карбонільної групи:



3. Визначаємо число атомів карбону у молекулі  $C_{12}H_{24}O$ : оскільки  $m_c \geq 10$ , то  $m_c$  приймаємо за числом атомів у найдовшому карбоновому ланцюгу молекули  $m_c = 12 - 1 = 11$ .

4. Визначаємо середню довжину молекули  $C_{12}H_{24}O$ :  $l_{сер} = (12-1)/2 = 5,5$ .

5. Визначаємо температуру самоспалахування гептилізобутилкетону за формулою (1.43) – оскільки  $l_{сер} \geq 5$ ; використовуємо коефіцієнти для кетонів із табл. 1.9:

$$t_{cc} = 1 \cdot 200 + \frac{1 \cdot 100}{(2 \cdot 5,5 - 9,4)} e^{\sqrt{\frac{2,2}{5,5}}} + 0,25 \cdot (2 \cdot 5,5 - 10) = 317,9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Висновок: розрахункова стандартна температура самоспалахування гептилізобутилкетону дорівнює 317,9 °С (за довідником 320 °С); відхилення розрахунку від експериментального значення становить 2,1 °С або 0,7 %.

### *Розрахунок можливості вимушеного запалювання*

1. За довідником визначити для даної речовини нормальну швидкість поширення полум'я,  $u_n$ ,  $m \cdot s^{-1}$ , температуру самоспалахування,  $t_{cc}$ .

2. Розрахувати мінімальну енергію запалювання цієї речовини за формулою (1.45).

3. Розрахувати безпечну енергію джерела запалювання для цієї речовини за формулою (1.46).

4. Розрахувати безпечну температуру джерела запалювання для цієї речовини за формулою (1.38).

5. Зробити висновок про умови вимушеного запалювання або про можливість запалювання відомим джерелом запалювання.

#### *Приклад розв'язання задачі*

Розрахувати безпечні енергію та температуру для джерела запалювання, що діє на пароповітряну суміш етилацетату; визначити можливість її запалювання електричною іскрою з енергією 0,2 мДж та температурою 2000 °С.

#### *Розв'язання*

1. За довідником для етилацетату  $u_n = 0,39 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $t_{cc} = 446 \text{ °С}$ .

2. Розраховуємо мінімальну енергію запалювання етилацетату (1.45):

$$E_{\min} = \frac{0,036}{(0,39)^2} = 0,24 \text{ мДж.}$$

3. Розраховуємо безпечну енергію джерела запалювання для даної речовини за формулою (1.46):

$$E_{\text{без}} = 0,4 \cdot 0,24 = 0,095, \text{ мДж.}$$

4. Розраховуємо безпечну температуру джерела запалювання для даної речовини за формулою (1.37):

$$t_{\text{дз. без}} = 0,8 \cdot 446 = 356,8 \text{ °С.}$$

5. Висновок: небезпека вимушеного запалювання пароповітряної суміші етилацетату існує за умови дії на цю суміш джерела запалювання з енергією більше, ніж 0,095 мДж, і температурою більше, ніж 356,8 °С; за умови дії на цю суміш електричної іскри з енергією 0,2 мДж і температурою 2000 °С запалювання не відбудеться, оскільки мінімальна енергія для запалювання необхідна більша (0,24 мДж); але умова безпеки не виконується, оскільки енергія та температура іскри більші за безпечні значення.

#### **Питання для самостійної перевірки знань**

1. У чому полягає сутність процесу горіння?
2. Розкрийте основні характерні ознаки горіння.
3. Які умови необхідні для виникнення або гальмування процесу горіння?
4. Якими бувають режими горіння рідин?
5. Що таке полум'я, види полум'я?
6. Який зв'язок між будовою полум'я, його кольором і температурою?
7. Що таке «стехіометрична суміш»?
8. Опишіть види температури горіння.
9. Як відбувається утворення тиску вибуху?
10. Що таке концентраційні межі поширення полум'я?
11. Опишіть процеси у дифузійному полум'ї.
12. Що таке насичена та ненасичена пара?

13. Що таке температурні межі поширення полум'я?
14. Опишіть області пожежної небезпеки на температурно-концентраційній шкалі.
15. У чому полягає необхідність розрахунку безпечних ТМПП?
16. Розкрийте практичне значення ТМПП.
17. Розкрийте характеристики безпечних (робочих) температур для експлуатації закритого (герметичного) технологічного процесу?
18. У чому полягає різниця між температурами спалаху та займання?
19. Розкрийте практичне значення температури спалаху.
20. Як проводять визначення пожежної небезпеки рідини за тиском насиченої пари?
21. Які існують види виникнення горіння?
22. Опишіть процеси самозаймання рідин ненасиченої будови.
23. Опишіть процеси самозаймання відкладень на стінках резервуарів.
24. Розкрийте особливості самоспалахування повітряних сумішей.
25. Розкрийте особливості утворення температури самоспалахування.
26. Які процеси необхідні для ініціювання вимушеного запалювання холодних горючих рідин?
27. Що таке мінімальна енергія запалювання?

**Література для самопідготовки та поглибленого вивчення розділу:**  
5, 7, 11, 13, 16, 34, 38, 39, 40, 51, 62, 63, 67.

## РОЗДІЛ 2. РОЗВИТОК ПОЖЕЖ ГОРЮЧИХ РІДИН

### 2.1 Загальні поняття про розвиток пожеж

*Пожежа* – це неконтрольоване горіння, що розвивається у просторі та часі поза спеціальним осередком, призводить до знищення або пошкодження вогнем майна, під час якого виникають фактори, небезпечні для живих істот та навколишнього середовища.

Під час пожежі як одночасно, так і послідовно відбуваються різноманітні складні фізико-хімічні процеси і *явища*, які відносяться не тільки до самого горіння речовин та матеріалів, але й до процесів, які супроводжують явище горіння та є характерними тільки для даної конкретної пожежі.

Фактори, що постійно спостерігаються та є обов'язковими для кожної пожежі, називають *загальними (первинними)* явищами пожежі:

1) *горіння*, яке супроводжується виділенням тепла та утворенням продуктів повного і неповного згорання;

2) *масообмін*, який виникає внаслідок утворення на пожежі конвекційних газових потоків, що зумовлюють надходження свіжого повітря в зону горіння і відведення продуктів згорання;

3) *теплообмін*, який полягає в тому, що тепло, яке виділяється у зоні горіння, передається в навколишній простір, витрачається на нагрівання речовин, матеріалів, будівельних конструкцій, що сприяє самостійному поширенню пожежі.

Тільки ліквідація горіння може призвести до зникнення загальних явищ. Загальні явища під час пожежі є основою виникнення *окремих (вторинних)* явищ, які мають випадковий характері та є властивими конкретній пожежі.

Сукупність первинних і вторинних явищ на пожежі називають «*обставини пожежі*». Первинні та вторинні явища, які викликають травмування, отруєння або загибель людей, а також знищення або пошкодження матеріальних цінностей, називають *небезпечними факторами пожежі*.

До *небезпечних факторів пожежі* відносять:

*первинні явища пожежі*: відкритий вогонь та іскри; підвищена температура навколишнього середовища та предметів; токсичні продукти горіння; дим; знижена концентрація кисню у повітрі;

*вторинні явища пожежі*: падаючі частини будівельних конструкцій, агрегатів, установок; небезпечні фактори вибуху (ударна хвиля, теплове випромінювання); НХР, які можуть надійти з пошкодженого обладнання; електричний струм; вогнегасні речовини.

Пожежа розвивається у просторі та часі; при цьому вона завдає матеріальних, моральних та екологічних збитків. Під час розвитку пожежі у просторі умовно можна виділити три зони: *зону горіння*, *зону теплового впливу* та *зону задимлення*.

*Зона горіння* – це частина простору, в якому відбуваються процеси

термічної підготовки горючих речовин (розкладання, плавлення, випаровування) та безпосередньо процес горіння. Зона горіння обмежена поверхнею речовин, охоплених полум'ям, та фронтом полум'я дифузійного факела. За розвитку тліючої пожежі (гетерогенне горіння) зона горіння збігається з поверхнею зони реакції. У зоні горіння виділяється все тепло пожежі та продукти повного і неповного згоряння, що утворюють дисперсну систему – дим.

*Зона теплового впливу* – це частина простору, що прилягає до зони горіння; у ній відбуваються процеси теплообміну між поверхнею зони горіння та оточуючими конструкціями, а також речовинами. Зовнішня межа зони теплового впливу проходить там, де тепловий вплив викликає помітні зміни у стані матеріалів і конструкцій або створюються умови, які перешкоджають роботі особового складу з гасіння пожежі. Визначають межі зони теплового впливу за критичними значеннями температури газового середовища у приміщенні (70 °С для людини без засобів захисту) або густини теплового потоку від пожежі (1,05 кВт/м<sup>2</sup> для короткочасного перебування людини без засобів захисту).

*Зона задимлення* – це частина простору, що прилягає до зони горіння, в якій є неможливим перебування людей без засобів захисту органів дихання. Зовнішню межу зони задимлення визначають за видимістю (за проникненням променю пожежного ліхтаря: до 3 м – сильне задимлення, до 6 м – середнє, до 12 – слабке), концентраціями небезпечних хімічних речовин (небезпечні для життя і здоров'я людини) або кисню у повітрі (менше 16%).

*Дим* – дисперсна система, що складається із твердих і рідких часток продуктів повного та неповного згоряння (дисперсної фази), завислих у газовому дисперсійному середовищі (суміші повітря з газоподібними продуктами повного та неповного згоряння).

*Продукти горіння* – це газоподібні, тверді та рідкі речовини, що утворюються при взаємодії окисника з горючою речовиною у процесі горіння. Склад продуктів горіння залежить від складу горючої речовини та умов протікання реакції горіння; до продуктів горіння переходять також нейтральні домішки, що знаходились у вихідній суміші, та частина горючої речовини або окисника, що не брали участі у реакції горіння.

Якщо у процесі розвитку пожежі виконуються дії з її гасіння, то тривалість пожежі можна поділити на *три основні періоди*: вільного розвитку  $\tau_{\text{віль}}$ , локалізації  $\tau_{\text{лок}}$  та ліквідації пожежі  $\tau_{\text{лік}}$ .

*Період вільного розвитку пожежі* триває з моменту її виникнення до моменту введення перших сил та засобів для її гасіння. За цей час площа пожежі зростає спочатку повільно, а потім – інтенсивніше.

*Період локалізації пожежі* – час, протягом якого створюються умови для запобігання подальшому розвитку пожежі. За цей час площа пожежі ще зростає, але з меншою швидкістю за рахунок впливу вогнегасних речовин.

*Період ліквідації пожежі* – час із моменту локалізації пожежі

(припинення її поширення) до ліквідації будь-яких проявів горіння. За цей час площа пожежі зменшується та повністю зникає.

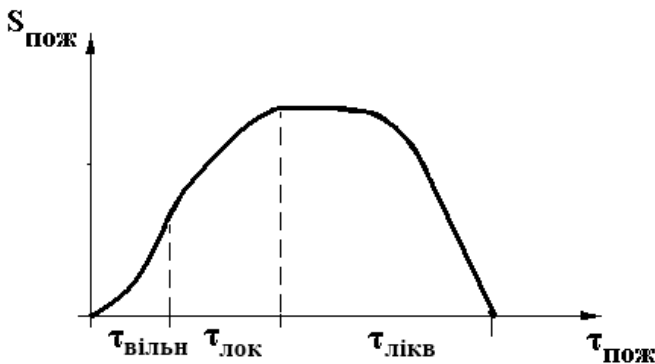


Рис. 2.1 – Зміна площі пожежі залежно від періоду її розвитку та застосування пожежогасіння

Зміна площі пожежі залежно від часу її розвитку та за умов введення засобів пожежогасіння, представлена на рис. 2.1.

Для кращого вивчення пожеж, розробки прийомів та засобів гасіння всі пожежі класифікують за різними ознаками на групи, класи та види.

За умовами газообміну пожежі поділяють на дві великі групи: пожежі на відкритому просторі та пожежі в огороженні.

*Пожежі на відкритому просторі* характеризуються вільним газообміном із навколишнім простором, що зумовлює високу швидкість протікання процесів горіння. При цьому теплообмін здійснюється випромінюванням, а також конвекцією. Пожежі на відкритому просторі поділяють на окремі, суцільні, масові та вогненний шторм. *Окремі* – зовнішнє горіння окремої споруди або будівлі. *Суцільні* – одночасне інтенсивне горіння більшості споруд на даній ділянці. *Масові* – сукупність окремих і суцільних пожеж у населених пунктах, на великих промислових підприємствах. *Вогненний шторм* – особлива форма розвитку пожежі, яка характеризується утворенням єдиного гігантського турбулентного факела з потужною конвекційною колонкою нагрітих продуктів згоряння до 5 км заввишки, яка втягує повітря зі швидкістю більше  $15 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ . Виникає за сухих умов, великої пожежної навантаги, площі пожежі (одночасного горіння)  $S_{\text{пож}} > 2,5 \text{ км}^2$ , за слабого вітру (що інтенсифікує постачання кисню)  $0 < v_{\text{вітр}} < 5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ .

*Пожежі в огороженні* характеризуються тим, що газообмін обмежений будівельними конструкціями. При цьому відбувається накопичення тепла та диму; теплообмін здійснюється шляхом конвекції, теплопровідності та випромінювання. Пожежі в огороженні можна поділити на пожежі, що регулюються вентиляцією, та пожежі, що регулюються пожежною навантагою.

*Пожежі, які регулюються вентиляцією (ПРВ)*, протікають за умов нестачі окисника в об'ємі приміщення та надлишку горючих речовин і матеріалів. Параметри горіння визначаються інтенсивністю газообміну, оскільки окисника не вистачає для повного згоряння пожежної навантаги.

*Пожежі, які регулюються пожежною навантагою (ПРН)*, – це пожежі, які протікають за умов надлишку окисника у приміщенні, тому розвиток пожежі залежить від кількості пожежної навантаги. За своїми параметрами такі пожежі наближаються до пожеж на відкритому просторі.

Якщо приміщення має великий вільний об'єм (більше 1000 м<sup>3</sup>) або відкриті отвори значної площі, процес поширення пожежі протікає за рахунок поступового охоплення полум'ям поверхні горючих матеріалів. У приміщеннях меншого об'єму з обмеженим газообміном у разі досягнення температури 300–350 °С вміст газоподібних продуктів розкладання досягає нижньої концентраційної межі. У цьому випадку поширення пожежі відбувається вже не по поверхні горючого матеріалу, а по об'єму газового середовища, при цьому увесь вільний об'єм приміщення перетворюється на зону горіння (об'ємна пожежа). Зазвичай це супроводжується руйнуванням скління і у приміщення починає надходити повітря, яке інтенсифікує процеси згоряння та розвиток пожежі.

В умовах *пожежі в огороженні* тепло та дим, які виділяються під час горіння, накопичуються у приміщенні. В результаті зона теплового впливу та зона задимлення з часом зростають. *Зона задимлення* характеризується зниженим вмістом кисню і підвищеним вмістом токсичних речовин, а *зона теплового впливу* – критичною температурою, за якої відбуваються помітні зміни у фізичному стані матеріалів.

Кількісною характеристикою зміни тепловиділення на пожежі є його температурний режим. Під *температурним режимом пожежі* (ТРПО) розуміють зміну температури пожежі в часі. За *температуру пожежі в огороженні* приймають середньооб'ємну температуру газового середовища у приміщенні, в якому відбувається пожежа. Існують типові залежності зміни температури стандартної пожежі (див. рис. 2.2), водневої, тліючої тощо.

*Стадії розвитку пожежі:*

1. Початкова – вигоряє 20 % пожежної навантаги, руйнується скління вікон, досягається максимальна температура пожежі. Триває до 30 хв.
2. Основна – температура пожежі максимальна і далі знижується на 20 %. Вигоряє 80 % пожежної навантаги. Будівельні конструкції втрачають несучу спроможність. Триває ще близько 30 хв.
3. Кінцева – догорання, знижується температура пожежі, швидкість вигорання твердих вуглецевих матеріалів, площа горіння. Гомогенне горіння твердих матеріалів (полум'яне) переходить в гетерогенне (тління).

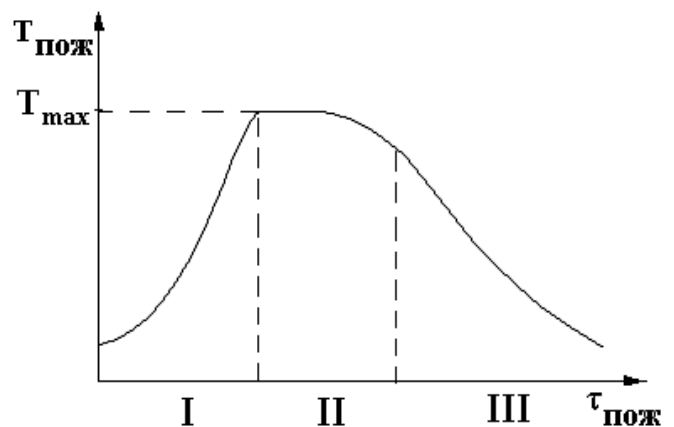


Рис. 2.2 – Зміна температури стандартної пожежі

*Температура пожежі в огороженні* залежить від об'єму приміщення, часу розвитку та площі пожежі, кількості пожежної навантаги, виду горючої речовини (теплоти згоряння, масової швидкості вигорання речовини,

швидкості поширення горіння), інтенсивності газообміну, теплових втрат на нагрівання конструкцій, від температури повітря, що надходить у приміщення тощо. Якщо повітрообмін у приміщенні не обмежений, то інтенсивність горіння збільшується, зростає температура в зоні реакції горіння. З іншого боку, це повітря має досить низьку температуру, тому в момент руйнування скління температура пожежі може короткочасно падати.

За стандартною кривою ТРПО можна оцінити температуру пожежі (при цьому не враховується схема газообміну, швидкість поширення пожежі або площа аварійного розливу рідини): до 10 хв.  $t_{\text{пож}} = 55 \lg(8\tau_{\text{пож}} + 1)$ , після 10 хв.  $t_{\text{пож}} = 345 \lg(8\tau + 2)$ , °С, де  $\tau$  – час розвитку пожежі після 10 хв. ( $\tau = \tau_{\text{пож}} - 10$ , хв.). За типової пожежної навантаги зміну температури в часі для пожежі класу А, що поширюється, можна оцінити за зростанням площі пожежі по

$$\text{відношенню до площі підлоги: } T_{\text{пож}} = 298 + 1200 \frac{S_{\text{пож}}}{S_{\text{підл}}}, \text{ К.}$$

Найбільш точно описує цей процес – *диференційна модель*, яка заснована на використанні диференційних рівнянь матеріального та теплового балансів пожежі. *Зонна модель* поділяє приміщення на зону горіння, конвекційну колонку, прошарок гарячих продуктів горіння біля стелі та область повітря, для яких застосовує окремий математичний опис. *Інтегральна модель* – більш простий розрахунок; за нею тепло пожежі витрачається на нагрів продуктів горіння, матеріалів та будівельних конструкцій, втрачається випромінюванням та з частиною продуктів горіння, осередок пожежі знаходиться в центрі підлоги приміщення, температура лінійно зростає за висотою та зменшується за наближення до периферії приміщення. При розрахунках приймають, що отвори, до яких розширилася площа пожежі, а також усі після 10 хв. – руйнуються внаслідок контрасту температур. Розраховану температуру пожежі приймають для геометричного центру об'єму приміщення. Тоді температуру у будь-якій точці приміщення можна визначити за формулою:  $T_{x,y,\tau} = T_{\tau} \left( 0,8 + 0,2 \frac{y}{y_0} \right) \left( 1,33 - \frac{x}{2x + x_0} \right)$ , К, де  $x_0 = 0,25L$  та  $y_0 = 0,5h$  – габаритні координати центру половини приміщення.

Знання закономірностей газообміну на пожежі має вирішальне значення у забезпеченні безпеки людей, які знаходяться всередині приміщення, та створенні умов для організації та проведення бойових дій, рятувальних робіт та гасіння самої пожежі.

Під час пожежі в огороженні в залежності від умов газообміну на певній висоті від рівня підлоги фізичні параметри газового середовища (густина, тиск) відповідають фізичним параметрам повітря поза приміщенням. Цю площину називають *нейтральною зоною*, або *площиною рівних тисків*. Висота нейтральної зони показує нижній рівень розташування диму у приміщенні. Цей рівень знижується з накопиченням продуктів горіння у приміщенні та зі зростанням температури пожежі. Визначення



висоти рівня нейтральної зони та знання способів регулювання її висоти під час пожежі в огороженні необхідні для організації евакуації людей, роботи особового складу у зоні задимлення (застосування засобів індивідуального захисту). З точки зору формування висоти нейтральної зони розглядають три схеми газообміну:

- *ізольоване приміщення* – повністю задимлене, умовна нейтральна зона знаходиться нижче підлоги (у будь-якій частині приміщення тиск є більшим за атмосферний);
- *газообмін через один отвір* – існує або один отвір, або декілька, які розташовані на одному рівні та разом працюють як на приплив повітря (у нижній частині отвору), так і на вихід гарячих продуктів горіння (у нижній частині отвору); нейтральна зона розташовується приблизно посередині висоти отвору; якщо у цього отвору існує певна висота розташування від рівня підлоги – то вона додається до висоти нейтральної зони (наприклад,

висота підвіконня): 
$$h_{\text{нз}} = \frac{h}{1 + \sqrt[3]{\frac{T_{\text{пг}}}{T_{\text{п}}}}} + h_{\text{підв}}$$
, де  $h$  – висота отвору, м;  $h_{\text{підв}}$  –

висота розташування отвору від рівня підлоги (висота підвіконня, якщо отвором є двері, то частіше  $h_{\text{підв}} = 0$  м), м;  $T_{\text{п}}$  та  $T_{\text{пг}}$  – температура повітря та продуктів горіння (температура пожежі), К;

- *газообмін через два отвори* – існує дві групи отворів, які розташовані на різній висоті: нижні отвори працюють на приплив повітря, верхні – на виток диму; нейтральна зона розташовується між центром нижнього та верхнього отвору, але ближче до того з них – площа якого більша:

$$h_{\text{нз}} = \frac{H}{\left(\frac{S_{\text{прип}}}{S_{\text{вит}}}\right)^2 \frac{T_{\text{пг}}}{T_{\text{п}}} + 1} + 0,5h_{\text{прип}}$$
, де  $H$  – відстань між центрами нижнього

та верхнього отворів, м;  $h_{\text{прип}}$  – висота припливного (нижнього) отвору, м;  $S_{\text{прип}}$ ,  $S_{\text{вит}}$  – площі припливного (нижнього) та витяжного (верхнього) отворів, м.

Основними способами регулювання висоти нейтральної зони є наступні:

- зниження тиску у верхній частині приміщення шляхом відкачування нагрітих продуктів згорання димососами та використання систем вентиляції для примусового видалення диму;
- розкриття витяжних отворів у верхній частині приміщення, де досягаються максимальна температура та тиск продуктів горіння; за можливості розкривають димові та аераційні люки, наприклад, у стелі;
- зниження температури та тиску продуктів горіння за допомогою тонкорозпилених струменів води;
- регулювання співвідношення площі припливних та витяжних отворів; у разі збільшення площі витяжних отворів (верхніх) відбувається підвищення

рівня нейтральної зони, біля підлоги виникає повітряна область, придатна для дихання;

- підвищення тиску повітря у приміщенні шляхом нагнітання чистого повітря в нижню частину приміщення димососами.

*За ознакою зміни площі пожежі розрізняють:*

- *пожежі, що поширюються* – розвиваються з безперервною зміною параметрів зони горіння: площі, периметра, фронту тощо;
- *пожежі, що не поширюються* – площа зони горіння не змінюється у часі (обмежена площею розташування горючої речовини).

Залежно від *фізико-хімічних властивостей речовин*, які горять, особливостей їх горіння та гасіння, всі пожежі можна умовно поділити на класи «А», «В», «С», «D» та додатковий підклас «Е» (іноді виділяють і інші класи пожеж).

До пожеж класу «А» відносять пожежі, під час яких переважно горять тверді горючі речовини; ці пожежі можна поділити на підкласи «А1» та «А2». До пожеж підкласу «А1» відносять горіння тліючих матеріалів (усі целюлозовмісні матеріали), для яких є характерним як гомогенний, так і гетерогенний режими горіння. Пожежі матеріалів, що горять тільки у гомогенному режимі (без тління), відносять до підкласу «А2» (головним чином – пластмаси, які плавляться).

До пожеж класу «В» відносять пожежі горючих та легкозаймистих рідин, а також твердих речовин, які плавляться та випаровують. У тих випадках, коли горять водонерозчинні рідини або тверді речовини, які під час нагрівання переходять у рідкий стан, пожежі відносять до підкласу «В1» (нафтопродукти, парафін тощо). У випадку горіння водорозчинних горючих рідин пожежі відносять до підкласу «В2».

Пожежі горючих газів відносять до класу «С».

Пожежі горючих металів та металоорганічних сполук відносять до окремого класу «D», який поділяють на три підкласи: «D1», «D2» та «D3». До пожеж підкласу «D1» відносять горіння легких металів – другої, третьої та четвертої груп періодичної системи Менделєєва (магній, алюміній, стронцій, барій, титан, цирконій тощо). Пожежі лужних металів відносять до підкласу «D2». У разі горіння металоорганічних сполук пожежі відносять до підкласу «D3».

Пожежу електрообладнання, що знаходиться під напругою, іноді відносять до пожеж підкласу Е, але після вимкнення напруги пожежа переходить до класу, який відповідає речовині, яка горить.

Щоб можна було описувати, досліджувати та порівнювати пожежі, використовують параметри, які характеризують різні аспекти їх розвитку. Знання закономірностей зміни параметрів пожежі та факторів, що на них впливають, необхідні для прогнозування обставин пожежі та розробки заходів щодо запобігання поширенню пожежі та її ліквідації, забезпечення безпеки людей, які перебувають під впливом пожежі, та для складання планів

евакуації людей і матеріальних цінностей. Нижче наведено основні параметри розвитку пожежі.

*Пожежна навантага*  $R_{\text{пож}}$  – питома кількість теплоти, яка може виділитися у приміщенні під час пожежі з одиниці площі підлоги

приміщення:  $R_{\text{пож}} = \frac{\sum m_i Q'_i}{S_{\text{підл}}}$ , кДж·м<sup>-2</sup>, де  $m_i$  – маса і-го горючого матеріалу,

що знаходиться у приміщенні, кг;  $Q'_i$  – масова теплота згоряння і-го горючого матеріалу, кДж·кг<sup>-1</sup>;  $S_{\text{підл}}$  – площа підлоги приміщення, м<sup>2</sup>.

Іноді пожежну навантагу розраховують як масу всіх горючих та важкогорючих матеріалів, які знаходяться на одиниці площі підлоги приміщення, кг·м<sup>-2</sup>. Пожежна навантага визначає тривалість пожежі, інтенсивність задимлення, теплоту й температуру пожежі.

*Тривалість пожежі*  $\tau_{\text{пож}}$  – час з моменту виникнення пожежі до повного припинення горіння.

*Площа пожежі*  $S_{\text{пож}}$  – площа проекції зони горіння на горизонтальну або вертикальну площину.

*Коефіцієнт поверхні горіння* показує, у скільки разів площа горіння (для пожеж класу А є характерною наявністю розвинутої поверхні) більша за площу пожежі.

*Периметр пожежі*  $P_{\text{пож}}$  – сумарна довжина ліній, які обмежують площу пожежі.

*Фронт пожежі*  $\Phi_{\text{пож}}$  – частина периметра, на якій відбувається поширення пожежі (або – відбувається найінтенсивніше; для відкритих пожеж розглядають швидкості поширення фронту, флангу та тилу пожежі).

*Масова швидкість вигорання*  $v_m$  – кількість речовини, що вигорє за одиницю часу з одиниці площі пожежі:

$$v_m = \frac{dm}{S_{\text{пож}} d\tau}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (2.1)$$

де  $\frac{dm}{d\tau}$  – зміна маси матеріалу за одиницю часу під час його горіння.

*Лінійна швидкість поширення пожежі*  $v_l$  – відстань, яку проходить фронт пожежі за одиницю часу:  $v_l = \frac{dl}{d\tau}$ , м·с<sup>-1</sup>.

*Температура пожежі в огороженні* – середньооб'ємна температура газового середовища у приміщенні.

*Температура пожежі на відкритому просторі* – температура зони горіння, в якості якої приймають адіабатичну температуру горіння речовини.

*Інтенсивність газообміну*  $I_r$  – кількість повітря, що надходить за одиницю

часу до одиниці площі пожежі:  $I_r = \frac{g_v}{S_{\text{пож}}}$ ,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , де  $g_v$  – витрата, з якою повітря надходить до зони горіння,  $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $S_{\text{пож}}$  – площа пожежі,  $\text{м}^2$ .

*Інтенсивність задимлення*  $I_z$  – зміна об'єму диму за одиницю часу в одиниці об'єму приміщення:  $I_z = \frac{V_{\text{дутьв}} - V_{\text{двид}}}{V_{\text{прим}}}$ ,  $\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ , де  $V_{\text{дутьв}}$  – об'єм диму, що утворюється за одиницю часу під час згоряння пожежної навантаги,  $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $V_{\text{двид}}$  – об'єм диму, що видаляється із приміщення в одиницю часу,  $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $V_{\text{прим}}$  – об'єм приміщення,  $\text{м}^3$ .

*Коефіцієнт надлишку повітря*  $\alpha$  на пожежі – під час дифузійного горіння на пожежі полум'яне горіння припиняється за зменшення вмісту кисню у димових газах до 14 %, тління припиняється – якщо вміст кисню менше 5 %. Тобто, у приміщенні залишається і кисень, і горюча речовина, температура середовища ще висока, але горіння не відбувається. Виникає уявний надлишок повітря на пожежі, з його врахуванням визначають значення  $\alpha$  під час горіння певних матеріалів за значенням теоретичної витрати повітря на цей процес за допомогою номограми на рис. 2.2.

*Теплота пожежі*  $Q_{\text{пож}}$  – кількість тепла, що виділяється під час пожежі у зоні горіння за одиницю часу:

$$Q_{\text{пож}} = \eta Q_n^p v_m S_{\text{пож}}, \text{кДж} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (2.2)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт повноти згоряння речовини;  $Q_n^p$  – робоча теплота згоряння,  $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ ;  $v_m$  – масова швидкість вигорання,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $S_{\text{пож}}$  – площа пожежі,  $\text{м}^2$ .

Правильна оцінка швидкості виділення тепла під час пожежі необхідна для визначення температури пожежі, коефіцієнтів теплообміну, температури на поверхні будівельних конструкцій тощо. У деяких випадках теплоту пожежі приймають за основу для оцінки ступеня пожежної небезпеки об'єктів.

*Критичний час розвитку пожежі* в огороженні для людини – час, за який вміст кисню у димогазовому повітряному середовищі зменшується до 16–17 %, а температура – зростає до 70 °С. Тобто зона задимлення або зона теплового впливу через деякий час від початку пожежі можуть зайняти все приміщення, тому перебування людей в ньому стане неможливим, оскільки досягнуто критичних значень вмісту кисню або температури середовища.

За зниження концентрації кисню у повітрі до 17 % у задимленому середовищі відбувається втрата свідомості, а за зниження до 14 % в організмі людини протікають незворотні процеси і може настати смерть. Критичний час розвитку пожежі залежить від об'єму приміщення, площі пожежі, теплоти згоряння, масової швидкості вигорання, об'єму повітря, необхідного для повного згоряння одиниці кількості горючої речовини.

Якщо вважати, що нормальна життєдіяльність організму припиняється

за вигорання  $21-14 = 7$  % кисню, що відповідає  $7 \cdot 4,76 = 33,32$  % повітря за об'ємом, тоді за умови сталої площі пожежі (наприклад, під час горіння рідин), час досягнення критичної концентрації кисню можна визначити як:

$$\tau_{кр}^{0_2} = \frac{0,33V_{прим}}{\eta S_{пож} v_m^0 v_{п}^0}, \text{ хв}, \quad (2.3)$$

де  $v_m$  – масова швидкість вигорання горючої речовини,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1}$ ;  $\eta$  – коефіцієнт повноти згорання;  $V_{прим}$  – повний об'єм приміщення,  $\text{м}^3$ ;  $S_{пож}$  – площа пожежі,  $\text{м}^2$ ;  $v_{п}^0$  – витрата повітря для повного згорання,  $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$ .

*Критичний час перебування людини в нагрітому повітряному просторі* визначається накопиченим запасом тепла, а отже теплоємністю цього простору. У димових газах, за умови згорання вуглеводнів, які є основною пожежною навантагою пожеж класів А, В та С, завжди є в наявності багато пірогенетичної вологи, згідно з рівнянням реакції горіння (вода є продуктом згорання гідрогену зі складу молекул). Вода як представник суміші продуктів горіння має одну з найбільших теплоємностей серед рідин, тому вологе повітря запасатиме більше тепла, ніж сухе. Також відмітимо, що за температур більше  $100$  °С вологе повітря містить «суху пару» (газоподібний стан без аерозолу води). Розрахунок часу досягнення критичної температури  $70$  °С (за наявності аерозолу води у складі продуктів горіння) у приміщенні проводять за формулою:

$$\tau_{кр}^t = 71 \cdot \frac{V_{прим}}{\eta Q'_н S_{пож} v_m}, \text{ хв.}, \quad (2.4)$$

де  $Q'_н$  – масова теплота згорання горючого матеріалу,  $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ .

*Розрахунок температури пожежі класу «В» в огороженні та висоти нейтральної зони з використанням номограм*

1. Визначитись із габаритними розмірами приміщення, вікон, дверей, досліджуваним моментом розвитку пожежі, типом горючої речовини.

2. Для горючої речовини за додатком № 7 визначити параметри її згорання:  $v_m^0$  – масова швидкість вигорання,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1}$ ;  $Q'_н$  – нижча масова теплота згорання речовини,  $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ ;  $v_{п}^0$  – питомий теоретичний об'єм повітря,  $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$ ;  $\eta$  – коефіцієнт повноти згорання.

3. Визначити площу пожежі  $S_{пож}$  (для рідин – за площею аварійного розливу).

4. Визначити загальну площу розкритих отворів, площу отворів, що працюють на приплив повітря, площу підлоги та огорожуючих конструкцій (сума площ підлоги, стін, стелі).

5. Розрахувати співвідношення  $S_{\text{пож}}/S_{\text{підл}}$  та  $S_{\text{прип}}/S_{\text{пож}}$ , які визначають ступінь розвитку пожежі та її забезпеченість повітрям. Для користування номограмою (рис. 2.3) визначити за значенням  $S_{\text{пож}}/S_{\text{підл}}$  тип кривої (суцільна або пунктирна), а за значенням  $S_{\text{прип}}/S_{\text{пож}}$  – номер кривої.

6. Визначити коефіцієнт надлишку повітря за номограмою (рис. 2.3): на осі відмітити питомий теоретичний об'єм повітря  $v_{\text{п}}^{\circ}$ , від нього провести вертикальну пряму лінію, від точки перетину із визначеною кривою (за номером та типом) провести горизонтальну лінію до осі коефіцієнта надлишку повітря, відмітити показання.

7. Оцінити можливу температуру пожежі у першому наближенні за формулами для стандартної пожежі.

8. Розрахувати густину теплового потоку, який створює пожежа на поверхнях огорожуючих конструкцій:  $q = \frac{\eta Q'_{\text{н}} v_{\text{м}} S_{\text{пож}}}{60 S_{\text{огор}}}$ , кВт·м<sup>-2</sup>.

9. Визначити температуру пожежі у приміщенні за номограмою (рис. 2.4), виходячи зі значень коефіцієнта надлишку повітря, часу розвитку пожежі, густини теплового потоку.

10. Розрахувати температуру в певній точці об'єму приміщення (за необхідності).

11. Розрахувати висоту нейтральної зони.

### *Приклад розв'язання задачі*

Визначити температуру та висоту нейтральної зони на 10 хв. пожежі у приміщенні 7×20×2,9 м за умови горіння ацетону на площі аварійного розливу 16,8 м<sup>2</sup>, відкритого дверного отвору 1,2×2,3 м та зачиненого вікна 2×1,5 м. Температура навколишнього повітря 15°C, тиск 101,3 кПа.

### *Розв'язання*

1. Визначаємо параметри горіння для ацетону за додатком 7: масова швидкість вигорання  $v_{\text{м}} = 2,64$  кг·м<sup>-2</sup>·хв<sup>-1</sup>; коефіцієнт повноти згорання  $\eta = 0,93$ ; нижча масова теплота згорання  $Q'_{\text{н}} = 29137$  кДж·кг<sup>-1</sup>, теоретична витрата повітря на горіння  $v_{\text{п}}^{\circ} = 7,35$  м<sup>-3</sup>·кг<sup>-1</sup>.

2. Розраховуємо площі отвору, припливної частини отвору, підлоги та огорожуючих конструкцій: площа підлоги  $S_{\text{підл}} = 7 \cdot 20 = 140$  м<sup>2</sup>, площа отвору  $S_{\text{отв}} = 1,2 \cdot 2,3 = 2,76$  м<sup>2</sup> та його припливної частини (газообмін через один отвір – 1/3)  $S_{\text{прип}} = 2,76/3 = 0,92$  м<sup>2</sup>, площа огорожуючих конструкцій:  $S_{\text{огор}} = 2 \cdot (20 \cdot 7 + 20 \cdot 2,9 + 7 \cdot 2,9) = 436,6$  м<sup>2</sup>.

3. Розраховуємо співвідношення  $S_{\text{пож}}/S_{\text{підл}}$  та  $S_{\text{прип}}/S_{\text{пож}}$ :

$S_{\text{пож}}/S_{\text{підл}} = 16,8/140 = 0,12$  – пунктирна крива (менше ніж 0,25).

$S_{\text{прип}}/S_{\text{пож}} = 0,92/16,8 = 0,055$  – крива №2 (в межах 0,04–0,06).

4. За номограмою на рис. 2.3 знаходимо коефіцієнт надлишку повітря:  $\alpha=1,5$ .

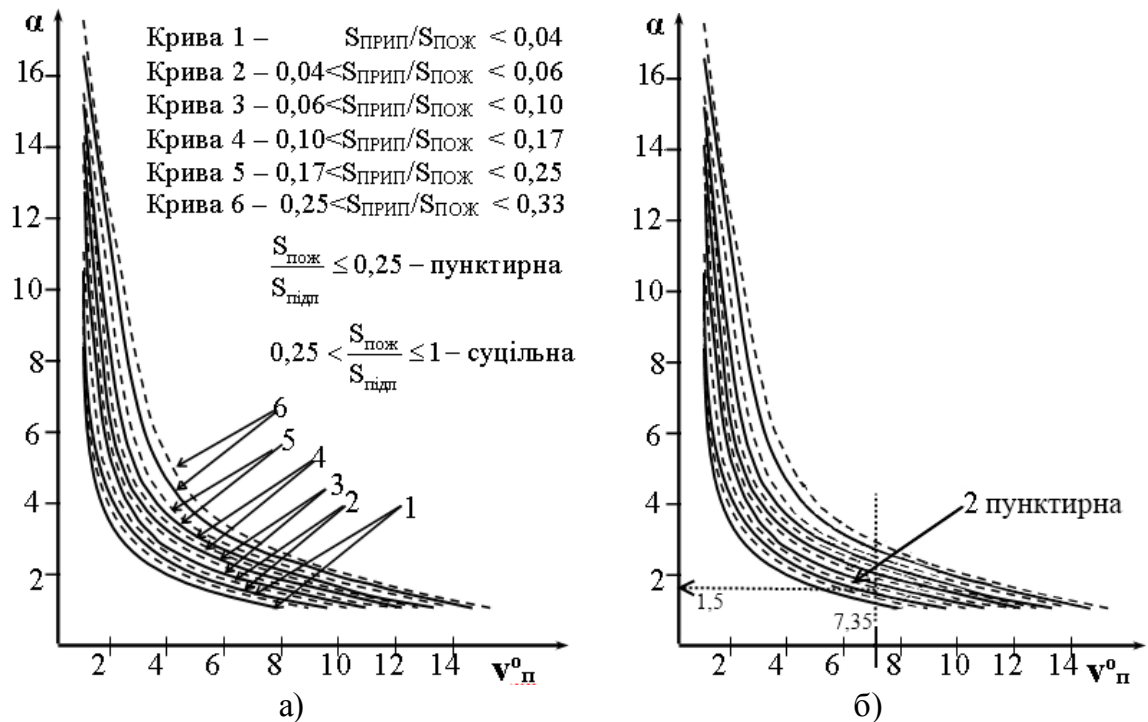


Рис. 2.3 – Номограма (а) та схема пошуку (б) коефіцієнта надлишку повітря пожежі в огороженні

5. Розраховуємо густину теплового потоку:

$$q = \frac{0,93 \cdot 29137 \cdot 2,64 \cdot 16,8}{60 \cdot 436,6} = 45,9, \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}.$$

6. Визначаємо температуру пожежі в огороженні за номограмою на рис. 2.4, спираючись на густину теплового потоку для 10 хв. пожежі, яка відбувається з коефіцієнтом надлишку повітря  $\alpha = 1,5$ .

На лівій осі (густини теплового потоку) знаходимо значення  $q=45,9 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$  (для порівняння наведено схему пошуку для  $14,6 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$ ), далі – рівнобіжно до найближчої похилої лінії проводимо пряму лінію на вісь температур, далі – рівнобіжно до найближчої кривої лінії проводимо аналогічну та зупиняємось на точці, що відповідає  $\alpha = 1,5$ . З цієї точки проводимо горизонтальну пряму до  $\tau = 30$  хв. (коли закінчується перша стадія пожежі, під час якої і зростає температура). Потім рівнобіжно до найближчої хвилястої залежності повертаємось (проводимо лінію) до шкали температур та зупиняємось на точці, що відповідає  $\tau = 10$  хв. З цієї точки проводимо горизонтальну пряму на ось температур, відмічаємо шукане значення температури пожежі в огороженні:  $t_{\text{пр}} = 710 \text{ }^\circ\text{C}$  або  $T_{\text{пр}} = 983 \text{ K}$  (або для  $14,6 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$  отримано  $t_{\text{пр}} = 370 \text{ }^\circ\text{C}$  або  $T_{\text{пр}} = 643 \text{ K}$ ).

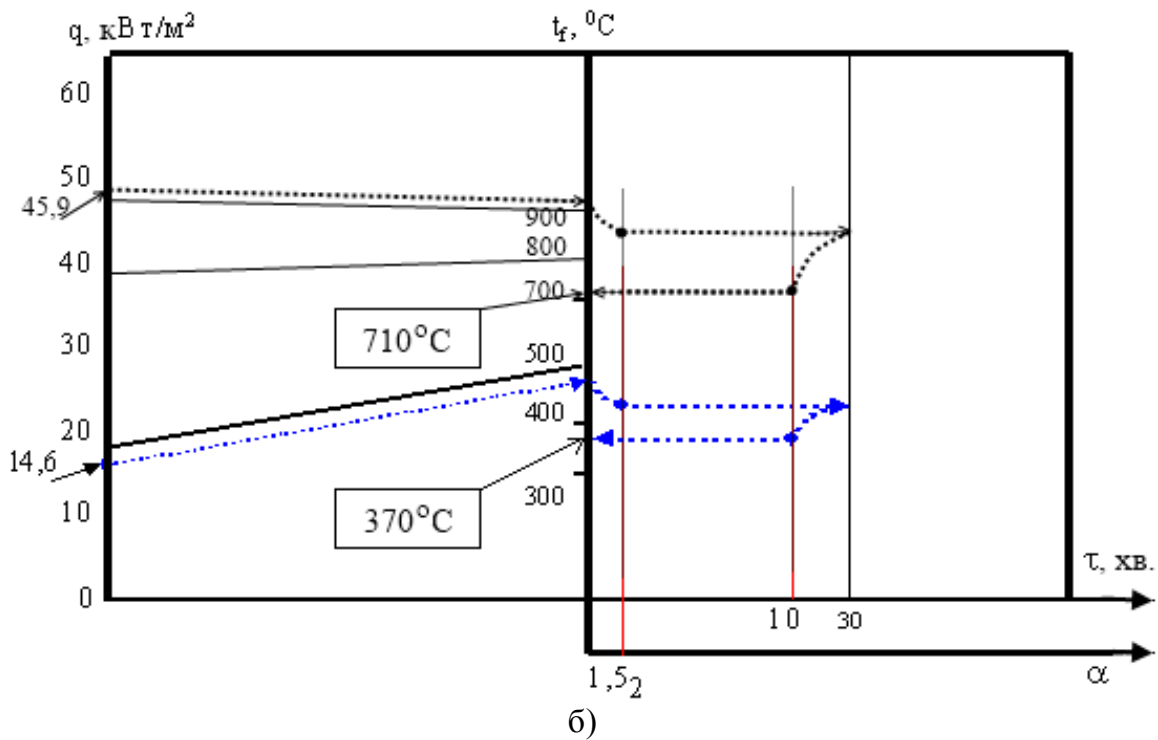
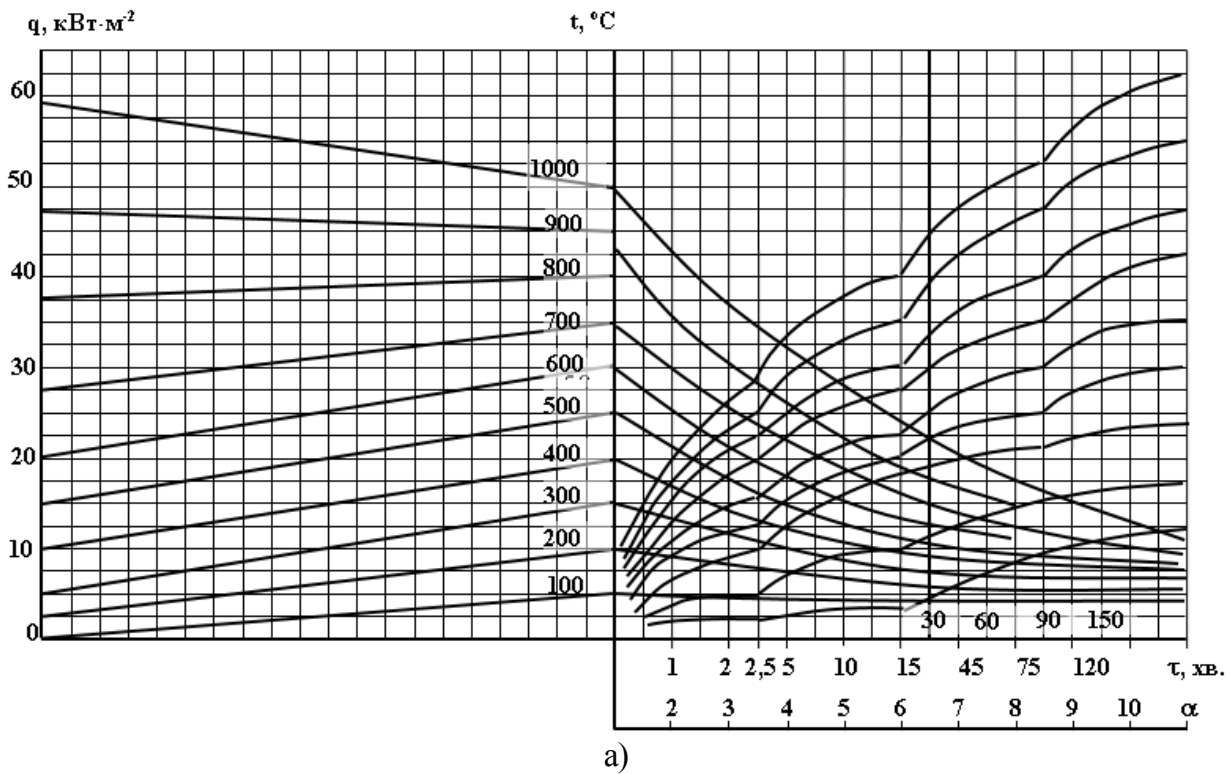


Рис.2.4 – Номограма (а) та схема пошуку (б) температури пожежі за густиною теплового потоку, що припадає на огорожуючі конструкції приміщення

7. Визначаємо висоту нейтральної зони (що відповідає нижньому рівню диму у приміщенні). На момент максимального наближення до розрахункового часу  $\tau = 10 - 0$  хв. газообмін здійснюється лише через двері; у момент  $\tau = 10$  хв. руйнується скління вікон, що змінює схему газообміну,



але температура пожежі змінитися ще не встигає. Для наступного моменту часу  $\tau = 10 + 0$  хв. необхідно повторити весь розрахунок для схеми газообміну через 2 отвори (верхній та нижній) – припливною площею буде повна площа дверей, що буде відповідати за рис. 2.3 пунктирній кривій №4 та  $\alpha = 2,5$ , а за рис. 2.4 – температурі пожежі  $t_{\text{пр}} = 620$  °С або  $T_{\text{пр}} = 893$  К. Тоді динаміка нейтральної зони для  $\tau = 10$  хв. буде наступною:

$$h_{\text{нз}(10-0)} = \frac{2,3}{1 + \sqrt[3]{\frac{983}{288}}} = 0,92 \text{ м.}$$

Для визначення відстані між центрами припливного (нижнього – двері) та витяжного (верхнього – вікно) отворів необхідно від висоти приміщення відняти половину висоти дверей та половину висоти вікна.

$$h_{\text{нз}(10)} = \frac{2,9 - 0,5 \cdot 2,3 - 0,5 \cdot 2}{\left(\frac{1,2 \cdot 2,3}{2 \cdot 1,5}\right)^2 \frac{983}{288} + 1} + 0,5 \cdot 2,3 = 1,34 \text{ м.}$$

$$h_{\text{нз}(10+0)} = \frac{2,9 - 0,5 \cdot 2,3 - 0,5 \cdot 2}{\left(\frac{1,2 \cdot 2,3}{2 \cdot 1,5}\right)^2 \frac{893}{288} + 1} + 0,5 \cdot 2,3 = 1,37 \text{ м.}$$

Висновок: на момент, що безпосередньо передуює 10 хв. пожежі, газообмін здійснювався через одні відкриті двері, досягнута температура пожежі 983 К, що визначило опускання нейтральної зони до висоти 0,92 м; у момент 10 хв. – руйнується скління вікон, виникає газообмін через 2 групи отворів, що підіймає висоту нейтральної зони до рівня 1,34 м (хоча температура пожежі за час 0 хв. змінитися не встигла); через малий час – на момент 10+0 хв. – температура пожежі дещо зменшується (відповідно до нової схеми газообміну) до 893 К, що незначно додатково підіймає нейтральну зону до 1,37 м.

## 2.2 Загальні поняття розвитку пожеж горючих рідин

Пожежа класу «В» виникає внаслідок запалювання пароповітряного середовища, що утворюється над поверхнею рідини і може перебувати як у технологічному устаткуванні (резервуарах, технологічних апаратах), так і у вигляді розливу, який виник унаслідок аварійної ситуації. Відповідно якщо температура горючої рідини виявляється меншою, ніж температура спалаху, то запалювання парів і початок пожежі є неможливими (або джерело запалювання повинно мати тривалий вплив, щоб прогріти ділянку поверхні рідини до температури спалаху). Також для пожеж класу «В», на відміну від

пожеж класу «А», коефіцієнт поверхні горіння завжди дорівнює «1». Тобто площа пожежі дорівнює площі горіння. Крім цього, пожежі класу «В» відносяться до таких, які не поширюються, – під час пожежі горить тільки поверхня рідини з однаковою площею. Однак після руйнування резервуара, внаслідок викиду або спінювання, пожежа переходить у форму, яка поширюється. Також пожежа класу «В» може поширюватись, якщо горюча рідина з температурою, меншою за температуру спалаху, зайнялася на частині поверхні.

Імовірність виникнення пожежі всередині технологічного обладнання з горючими рідинами зумовлюється можливістю утворення горючої пароповітряної суміші та одночасної появи джерела запалювання в його внутрішньому газовому просторі.

Умова утворення горючої пароповітряної суміші у *внутрішньому просторі* резервуара визначається співвідношенням:  $\varphi_n \leq \varphi_{\text{факт}} \leq \varphi_v$ , де  $\varphi_n$  та  $\varphi_v$  – відповідно нижня та верхня концентраційні межі поширення полум'я горючої рідини;  $\varphi_{\text{факт}}$  – відповідно нижня та верхня концентраційні межі поширення полум'я горючої рідини. За такої умови поява джерела запалювання всередині резервуара ініціює виникнення горіння пароповітряного середовища з повним його вигоранням у вигляді вибуху.

*Основними джерелами запалювання* для резервуарів є: прямі удари блискавки, розряди статичної електрики, фрикційні іскри механічних ударів під час ручного вимірювання рівня і відбору проб у процесі виконанні робіт з ремонту та обслуговування резервуара, самозаймання відкладень пірофорних сульфідів заліза на стінках резервуарів з нафтопродуктами, які мають високий вміст сірки. Приблизно 35 % усіх зареєстрованих пожеж та спалахів відбувається на резервуарах, що ремонтуються або очищаються.

У *зовнішньому просторі* горюче середовище може виникнути:

- за умови виходу пари горючої рідини через дихальні пристрої технологічного обладнання;
- за умови випаровування горючої рідини з поверхні аварійного розливу.

Внаслідок дифузії пари у навколишній простір утворюється пароповітряна хмара. Якщо фактична концентрація пари в пароповітряному об'ємі хмари перевищує нижню концентраційну межу поширення полум'я та у межах цієї хмари виникне джерело запалювання, то виникне горіння.

Під час пожеж класу «В» на людей та будівельні конструкції впливають такі *небезпечні фактори пожежі*: відкритий вогонь, фактори вибуху (ударна хвиля, уламки зруйнованого технологічного обладнання та будівель), теплове випромінювання факела полум'я, випадіння горючих рідин навкруги після викиду (парового вибуху резервуара), вихід рідини з резервуара внаслідок його руйнування або як результат спінювання, токсичні продукти, що утворилися під час горіння або поширилися з пошкодженого обладнання.

Кількість енергії, що передається променистим потоком до поверхні рідини, що горить, становить близько 40 % від загальної кількості, що

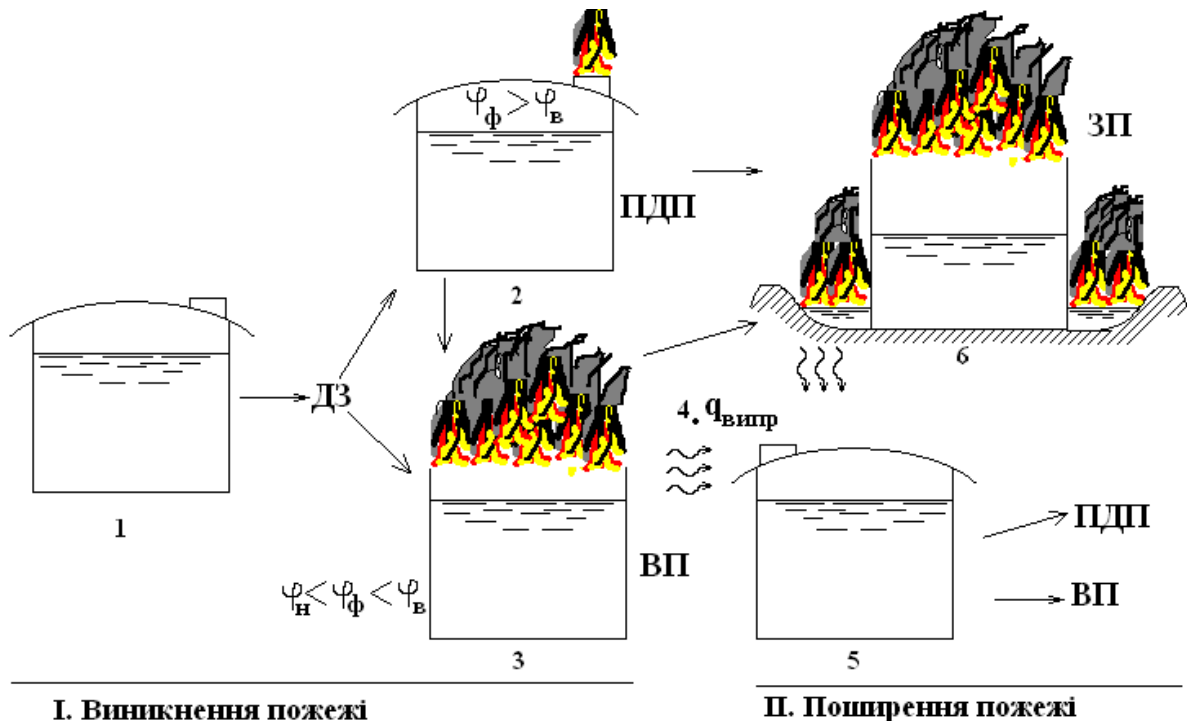
виділяється у процесі згоряння пароповітряної суміші.

Інтенсивність випромінювання залежить від випромінюючої площі, отже – від форми зони горіння. Форма факела над резервуаром безперервно змінюється, але для визначення характеристик горіння її можна прийняти як конус або циліндр із діаметром резервуара та висотою  $H_{\phi}$ . Висота полум'я залежить від діаметра резервуара та типу горючої рідини. Відомо, що під час горіння горючих рідин у резервуарах із розмірами від 2 до 23 м висота факела полум'я є пропорційною діаметру резервуара. Так, для бензину  $H_{\phi} = 1,5D$ , для дизельного палива  $H_{\phi} = 1,0D$ ; для етилового спирту  $H_{\phi} = 0,8D$ .

Кількісними характеристиками інтенсивності процесу горіння рідин є *масова та лінійна швидкість вигорання рідини*. *Масова швидкість вигорання*  $V_m$  характеризує масу рідини, яка вигорає з одиниці площі поверхні в одиницю часу. *Лінійна швидкість вигорання*  $V_h$  характеризує висоту шару рідини, яка вигорає з одиниці площі поверхні в одиницю часу.

Лінійна і масова швидкість вигорання рідини визначаються *інтенсивністю випаровування*  $I_{\text{вип}}$  – масою рідини, яка випаровується з одиниці площі поверхні в одиницю часу у процесі горіння. *Інтенсивність випаровування*, у свою чергу, визначається природою речовини (молярною масою, теплою випаровування, в'язкістю), температурою рідини, теплою згоряння, швидкістю руху середовищ (як поверхневого шару рідини, так і повітряних мас поблизу її поверхні) і тиском над поверхнею рідини.

*Каскадний розвиток має пожежа у резервуарному парку (рис. 2.5).*



**I. Виникнення пожежі**

**II. Поширення пожежі**

Рис. 2.5 – Схема каскадного розвитку пожежі в резервуарному парку:

- 1 – резервуар до пожежі; 2 – пожежа на дихальному пристрої;
- 3 – внутрішня пожежа; 4 – теплове випромінювання; 5 – резервуар, що знаходиться під впливом теплового випромінювання; 6 – зовнішня пожежа

Види пожеж нафтопродуктів у резервуарах: 1) *внутрішня пожежа* (ВП) – вибух пари та подальше горіння рідини всередині резервуара на поверхні «дзеркала» рідини; 2) *пожежа на дихальних пристроях* (ПДП) – горіння пари, що виходить через технологічні отвори резервуара; 3) *зовнішня пожежа* (ЗП) – пожежа з аварійним витіканням або викидом рідини з резервуара та подальшим її горінням в обвалуванні. Поширення пожежі залежить від місця та її характеру на початковій стадії.

*Перша стадія пожежі у резервуарному парку.* Виникнення пожежі від джерела запалювання у вигляді внутрішньої пожежі або пожежі на дихальному пристрої. За умови тривалої пожежі на дихальному пристрої у ньому плавляться вогнеперешкоджувачі, горіння може проскочити у внутрішній об'єм з вибухом, зривом перекриття та переходом пожежі у внутрішню. Таке може статися також під час спроби відкачати горючу рідину, розкриття додаткових отворів для подачі вогнегасних речовин, внаслідок перегріву перекриття. Горіння переходить на «дзеркало» рідини.

*Друга стадія пожежі у резервуарному парку.* Поширення пожежі на сусідні резервуари відбувається в разі прогрівання резервуара, що не горить, шляхом теплового випромінювання до запалювання пари на дихальному пристрої за механізмом самоспалахування або при прямому контакті відкритого вогню з новою пароповітряною хмарою, що виникла у вигляді «дихання» перегрітого теплом пожежі сусіднього резервуара, який ще не горить (діє або випромінювання полум'я резервуара, що горить, або полум'я зовнішньої пожежі в обвалуванні).

### 2.3 Горіння пароповітряної суміші на відкритому просторі

Вихід пари горючої рідини через дихальні пристрої технологічного обладнання називається «*диханням резервуара*». У разі незмінного об'єму внутрішнього газового простору, але за зміни температури навколишнього середовища відбувається «*мале дихання*» за рахунок зміни інтенсивності пароутворення з відкритої поверхні рідини, а також – флуктуацій об'єму рідини при цьому. «*Велике дихання*» спостерігається під час заповнення резервуара горючою рідиною: зменшується внутрішній об'єм газового простору і відповідна частина внутрішньої пароповітряної хмари витискається назовні. Кількість пари у процесі дихання резервуара, як унаслідок підвищення температури навколишнього середовища, так і під час заповнення можна знайти за формулою:

$$G_a = \left[ V_1(1 - \varphi_1) \frac{P_1}{T_1} - V_2(1 - \varphi_2) \frac{P_2}{T_2} \right] \frac{\varphi_{\text{сер}}}{1 - \varphi_{\text{сер}}} \frac{1}{R}, \quad (2.5)$$

де  $V_1, V_2$  – об'єми газового простору резервуара до та після закачування відповідно;  $P_1, P_2$  – тиск насиченої пари за температур  $T_1$  та  $T_2$ ;  $\varphi_1, \varphi_2$  –

концентрація пари горючої рідини в об'ємах  $V_1, V_2$  за температур  $T_1$  та  $T_2$ ;  $\varphi_{\text{ср}}$  – середня концентрація пари горючої рідини;  $R$  – універсальна газова стала.

Пожежонебезпечна загазованість території підприємства виникає у разі «великого дихання», під час якого відбувається короточасний, але потужний викид пари. В разі збільшення відстані від поверхні розливу або місця виходу концентрація пари зменшується. Частина простору, де концентрація пари горючої рідини перевищує нижню концентраційну межу поширення полум'я, називають *зоною загазованості*. Діаметр зони загазованості, що утворюється внаслідок «великого дихання», з урахуванням розміру резервуара можна визначити за формулою:

$$D_{\text{заг}} = D_{\text{рез}} + 10H_{\text{рез}} \left( \frac{g \cdot \varphi_{\text{факт}}}{\varphi_{\text{н}} H_{\text{рез}}^2} \right)^{0,86}, \text{ м}, \quad (2.6)$$

де  $H_{\text{рез}}$  – висота резервуара, м;  $D_{\text{рез}}$  – діаметр резервуара, м;  $g$  – об'ємна витрата, з якою закачують рідину в резервуар,  $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $\varphi_{\text{н}}$  – нижня КМПП горючої рідини, %;  $\varphi_{\text{факт}}$  – фактична концентрація насиченої пари рідини за даних умов, %.

У спрощеному вигляді горизонтальний розмір (радіус) зони загазованості  $L$  можна визначити за формулою:

$$L = 10 \left( \frac{1,5g\varphi_{\text{факт}}}{\varphi_{\text{н}}} \right)^{0,66}, \text{ м}; \quad (2.7)$$

поява джерела запалювання в цій зоні призведе до об'ємного запалювання пари з вибухом.

У разі аварійного виходу горючих рідин із технологічного обладнання площа, яку займе розлив рідини, визначається об'ємом розлитої рідини, рельєфом місцевості та властивостями ґрунту:

$$S_{\text{розл}} = \eta \frac{g_{\text{вит}} \tau_{\text{вит}}}{\rho_{\text{рід}} h_{\text{рід}}}, \text{ м}^2, \quad (2.8)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт просочуваності ґрунту;  $g_{\text{вит}}$  – витрата витікання рідини,  $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $h_{\text{рід}}$  – висота шару рідини, м;  $\rho_{\text{рід}}$  – густина рідини,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $\tau_{\text{вит}}$  – час витікання, с.

У разі відсутності довідкових даних площу випаровування рідини з горизонтальної поверхні на відкритому просторі визначають виходячи з припущення, що 1 л сумішей і розчинів, що містять за масою 70 % або менше розчинників, розливається на площі 0,1  $\text{м}^2$ , а 1 л інших рідин – на площі 0,15  $\text{м}^2$ .

З поверхні розливу відбувається випаровування рідини у навколишній простір. *Інтенсивність випаровування у відкритий простір* можна визначити за емпіричним рівнянням:

$$I_{\text{вип}} = 10^{-6} P_{\text{нп}} \mu_{\text{рід}} (0,734 + 1,637 v_{\text{в}}), \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (2.9)$$

де  $\mu_{\text{р}}$  – молярна маса рідини,  $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ;  $P_{\text{нп}}$  – тиск насиченої пари за даної температури,  $\text{кПа}$ ;  $v_{\text{в}}$  – швидкість вітру над поверхнею випаровування,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Загальна маса горючої речовини, яка утворює пароповітряну хмару, визначається часом та площею випаровування:

$$m_{\text{пар}} = I_{\text{вип}} S_{\text{розл}} \tau_{\text{вип}}, \text{ кг}, \quad (2.10)$$

де  $\tau_{\text{вип}}$  – час випаровування рідини в навколишній простір із вільної поверхні аварійного розливу,  $\text{с}$ ;  $S_{\text{розл}}$  – площа розливу рідини на поверхні, що не просочується,  $\text{м}^2$ .

Пароповітряна хмара набуває диско- або сигароподібної форми, де густина суміші формується більшою, ніж у повітря. Зовнішня межа зони вибухонебезпечної загазованості визначається відстанню від відкритої поверхні рідини, де концентрація горючого компонента у суміші зменшується до нижньої КМПП. На більшій відстані концентрації є безпечними, не можуть запалюватися від джерела запалювання та не беруть участі у вибуху. Горизонтальний розмір зони загазованості  $R_{\text{заг}}$  визначають за формулою:

$$R_{\text{заг}} = 3,15 \sqrt{\frac{\tau_{\text{вип}}}{3600}} \left( \frac{P_{\text{нп}}}{\varphi_{\text{н}}} \right)^{0,813} \left( \frac{m_{\text{пар}}}{\rho_{\text{пар}} P_{\text{нп}}} \right)^{0,333}, \text{ м}, \quad (2.11)$$

де  $\tau_{\text{вип}}$  – час випаровування рідини (але не більше 3600  $\text{с}$ ),  $\text{с}$ ;  $\rho_{\text{пар}}$  – густина пари за даних умов,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $m_{\text{пар}}$  – маса пари, що утворилася за час  $\tau_{\text{вип}}$ ,  $\text{кг}$ .

За відсутності вітру горизонтальний розмір зони загазованості газом (або паром «великого дихання») можна розрахувати за формулою:

$$R_{\text{заг}} = 14,563 \left( \frac{m_{\text{г}}}{\rho_{\text{г}} \varphi_{\text{н}}} \right)^{0,33} \approx 14,6 \sqrt[3]{\frac{m_{\text{г}}}{\rho_{\text{г}} \varphi_{\text{н}}}}, \text{ м}, \quad (2.12)$$

де  $m_{\text{г}}$  – маса горючого газу, що надійшов у відкритий простір під час аварійної ситуації,  $\text{кг}$ ;  $\rho_{\text{г}}$  – густина горючого газу за даних умов,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\varphi_{\text{н}}$  – нижня КМПП горючого газу, %.

Під час витoku зріджених газів для оцінки довжини зони загазованості у напрямку вітру можна використовувати емпіричну формулу:

$$L = 40 \sqrt{\frac{G}{v_{\text{віт}}}}, \text{ м}, \quad (2.13)$$

де  $L$  – довжина зони загазованості,  $\text{м}$ ;  $G$  – витрата зрідженого газу,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ;  $v_{\text{віт}}$  – швидкість вітру,  $\text{м}/\text{с}$ .

Згоряння зовнішньої області зони загазованості, де концентрація горючої речовини знаходиться в межах від нижньої до верхньої КМПП, протікає у

вибуховому режимі. Вибух пароповітряної хмари супроводжується утворенням та розширенням області підвищеного тиску, яка поширюється у вигляді *ударної хвилі*. Чим більша відстань від епіцентру вибуху – тим меншим буде тиск у фронті ударної хвилі. Величину *надлишкового тиску*  $\Delta P$  (перевищення над атмосферним тиском), який створюється в ударній хвилі на відкритому просторі під час згоряння такої газо- або пароповітряної хмари після дії точкового джерела запалювання на певній відстані від центру цієї хмари  $r$ , можна розрахувати, орієнтуючись на *тротиловий еквівалент вибуху*  $W_{\text{ТНТ}}$ :

$$\Delta P = P_0 \left( 0,8 \frac{W_{\text{ТНТ}}^{0,33}}{r} + 3 \frac{W_{\text{ТНТ}}^{0,66}}{r^2} + 5 \frac{W_{\text{ТНТ}}}{r^3} \right), \text{кПа}, \quad (2.14)$$

де  $P_0$  – атмосферний тиск, кПа;  $r$  – відстань до геометричного центру парогазової хмари, м.

У вибуховому згорянні бере участь не вся маса горючої рідини, яка перейшла у пару, а її частина – яка визначається областю вибухонебезпечних концентрацій (між нижньою та верхньою КМПП). Біля поверхні випаровування або в місці аварійного виходу газу концентрація газоподібної горючої речовини у повітрі наближається до 100 %. Зі збільшенням відстані від цього місця, внаслідок змішування з повітрям, на якійсь відстані концентрація горючого компонента суміші знижується спочатку до верхньої КМПП, а на ще більшій відстані – до нижньої КМПП. Тоді необхідно визначити приведену масу цієї області пари, яка бере участь у вибуху:

$$m_{\text{пр}} = m \cdot Z, \text{кг}, \quad (2.15)$$

де  $m$  – маса усїєї вибухонебезпечної пароповітряної суміші, кг;  $Z$  – *коефіцієнт участі парів або газів у вибуху*, який залежить від умов вибуху та горючої речовини: для незамкненого (відкритого) простору  $Z = 0,1$ ; для замкненого – залежно від речовини: для водню  $Z = 1,0$ ; для інших горючих газів  $Z = 0,5$ ; для парів ЛЗР та ГР  $Z = 0,3$ .

Для наближеного оцінювання параметрів вибуху пароповітряної хмари на відкритому просторі враховують участь у роботі вибуху від 2 до 10 % теплоти згоряння речовини, яка утворила пароповітряну хмару. Максимально можливий «коефіцієнт корисної дії» вибуху цієї хмари під час сферичної детонації становить близько 40 %, а для дефлаграційної ударної хвилі – 30 %. Решта енергії залишається у нагрітих продуктах згоряння.

Потужність вибуху оцінюють за його *тротиловим еквівалентом*  $W_{\text{ТНТ}}$ , який визначають шляхом порівняння із приведеною енергією вибуху тринітротолуолу згідно з формулою:

$$W_{\text{ТНТ}} = 0,45 \frac{Q'_n}{Q_{\text{ТНТ}}} m_{\text{пр}}, \text{кг}, \quad (2.16)$$

де  $Q'_n$  – масова нижча теплота згоряння речовини, кДж·кг<sup>-1</sup>;  $m_{пр}$  – приведена маса пари, яка бере участь у вибуху, кг;  $Q_{ТНТ}$  – приведена енергія вибуху тринітротолуолу (ТНТ), яку оцінюють як 46000 кДж·кг<sup>-1</sup>.

Тоді тротиловий еквівалент вибуху можна оцінити за рівнянням:

$$W_{ТНТ} \approx m_{пр} Q'_n 10^{-5}, \text{ кг.} \quad (2.17)$$

Вибух пароповітряної хмари супроводжується підвищенням тиску, яке є пропорційним зростанню температури внаслідок згоряння. *Надлишковий тиск*, що виникає при цьому в ударній хвилі, може призвести до руйнувань будівель і технологічного обладнання, травм та загибелі людей. До травм і загибелі можуть призвести і вторинні фактори вибуху, такі як уламки скла, що падають, частин будівель, елементів конструкції апаратів тощо. Обсяг руйнувань під час вибуху газопароповітряної хмари можна оцінити за *надлишковим тиском вибуху*, залежно від якого радіус певної зони ураження ударною хвилею буде становити:

$$R_{ур} = \Psi \sqrt[3]{W_{ТНТ}}, \text{ м,} \quad (2.18)$$

де  $\Psi$  – коефіцієнт надлишкового тиску вибуху, див. табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Вплив надлишкового тиску вибуху на людину та об'єкти

Дія ударної хвилі	$\Delta P$ , кПа	$\Psi$
на людей		
летальні наслідки від розриву легень	70	3,5
розрив барабанних перетинок	35	4,9
легкі травми та контузії	12	9,8
на звичайні споруди		
повна руйнація споруд	50	4,1
сильна руйнація споруд	30	5,4
середні руйнування з можливими пожежами	20	6,9
слабкі руйнування, можливі окремі пожежі	10	11,2
руйнування віконного скління	2	34

Всередині пароповітряної хмари концентрація пари може перевищувати верхню КМПП. Дія джерела запалювання на цю область не ініціює виникнення горіння (ці концентрації є пожежонебезпечними під час змішування з повітрям, але у поточному стані – вибухобезпечні). У цьому випадку в *кінетичному* режимі (у вигляді вибуху) згоряє тільки зовнішня частина зони загазованості, а її внутрішня частина, яка не брала участі у вибуху, буде вигоряти по периферії цієї області в *дифузійному* режимі у процесі змішування з навколишнім повітрям. При цьому формується *вогненна сфера*, яка клубиться вогнем, розширюється, піднімається вгору та характеризується потужним тепловим випромінюванням. У зоні впливу вогненної сфери



відбуваються практично миттєве загоряння більшості тканин та опіки шкіри людини. Тепловий вплив у зоні дії вогненної сфери викликає летальні наслідки.

*Радіус вогненної сфери* можна пов'язати із тротиловим еквівалентом вибуху даної повітряної суміші й температурою горіння  $T_{гор}$ :

$$R_{bc} = 29,6 \cdot \sqrt[3]{\frac{W_{тнт}}{T_{гор}}}, \text{ м.} \quad (2.19)$$

Наявність температури горіння у знаменнику формули знижує її роль у формуванні даного показника, оскільки вона опосередковано працює у чисельнику у значенні тротилового еквівалента вибуху.

*Час життя вогненної сфери* можна визначити за аналогічним принципом:

$$\tau_{bc} = 4,6 \cdot \sqrt[3]{\frac{W_{тнт}}{T_{гор}}}, \text{ с.} \quad (2.20)$$

Одним із факторів, що зумовлюють поширення пожежі та ураження людей, є теплове випромінювання вогненної сфери, яка виникає після вибуху. Опіки відкритих ділянок шкіри виникають за *густини теплового потоку* більше, ніж  $1,4 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$ . Тоді критичну відстань від поверхні вогненної сфери, ближче якої людина може отримати опіки шкіри внаслідок теплового випромінювання, можна визначити за формулою:

$$R_{оп} = 95 \sqrt[3]{\frac{W_{тнт}}{T_{гор}}}, \text{ м.} \quad (2.21)$$

Стадія згоряння вогненної сфери переходить у стадію горіння по поверхні аварійного розливу рідини (горіння на «дзеркалі» рідини); або під час пожежі резервуара існує потік пари, який горить на дихальному пристрої або над кромкою стінок резервуара. Горіння при цьому є дифузійним та наближається до турбулентного. *Дифузійне горіння* – процес згоряння попередньо не змішаної з повітрям горючої речовини, в якому визначальну роль відіграє процес дифузії окисника у фронт полум'я. *Турбулентне горіння* – процес, під час якого масообмін здійснюється не тільки за рахунок як молекулярної дифузії, так і турбулентної дифузії, в результаті макроскопічного вихрового руху газоподібних шарів горючої суміші.

*Газодинамічний режим горіння* залежить від лінійної швидкості горючої речовини і характеризується *критерієм Рейнольдса*:  $Re = \frac{v \cdot l \cdot \rho}{\mu}$ , де  $v$  –

лінійна швидкість газового потоку, м/с;  $l$  – характерний розмір, м;  $\rho$  – густина потоку, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – динамічна в'язкість, Н·с/м<sup>2</sup>. Якщо  $Re < 2300$  – режим руху

шарів горючої суміші ламінарний; якщо  $2300 < Re < 10000$  – перехідний; якщо  $Re > 10000$  – турбулентний.

Під час пожеж резервуарів факел полум'я формується висхідними конвекційними потоками продуктів горіння. У вільновисхідному конвекційному потоці критичне значення числа Рейнольдса становить 150, що приблизно в 10 разів менше зазвичай прийнятого. Газодинамічний режим горіння залежить від діаметра резервуара. Пожежам у резервуарах діаметром понад 1 м властивий турбулентний режим полум'я, а швидкість вигорання слабо залежить від діаметра.

Однією з важливих характеристик процесу горіння рідин є *швидкість висхідних конвекційних потоків* над осередком горіння, яка визначає можливість подачі вогнегасної речовини на гасіння у дисперсному стані. Чим більша швидкість висхідних конвекційних потоків, тим більше спостерігається втрат вогнегасної речовини у процесі гасіння. Так, високократні піни та високодисперсні вогнегасні порошки значною мірою уносяться конвекційними потоками. Швидкість висхідних потоків над бензином, дизельним паливом та гасом становить 2,3–2,6 м/с, 1,6–2,1 м/с та 1,3–1,4 м/с відповідно.

#### 2.4 Вигорання рідин під час пожежі. Явища скипання та викиду

Під час пожежі резервуара відбувається вигорання рідини (зменшується рівень наливання) та її прогрівання у глибину за рахунок тепла, що передається від зони горіння променистим тепловим потоком. Цей процес характеризують швидкістю вигорання. Розрізняють *масову* та *лінійну швидкості вигорання*.

*Масова швидкість вигорання* – кількість речовини, що вигорє з одиниці площі поверхні рідини за одиницю часу:

$$v_m = \frac{dm}{Sd\tau}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1}. \quad (2.22)$$

*Лінійна швидкість вигорання* – висота шару рідини, що вигорє за одиницю часу (зменшення висоти шару горючої рідини у процесі вигорання):

$$v_h = \frac{v_m}{\rho} = \frac{dh}{d\tau}, \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}. \quad (2.23)$$

У початковий період швидкість вигорання поступово підвищується, збільшується висота факела полум'я, яка залежить від діаметра резервуара і виду горючої рідини. Приблизно через 10 хвилин пожежі настає стабілізація: швидкість вигорання та розмір полум'я стають незмінними у часі.

Зазвичай швидкість вигорання рідини визначають експериментальним шляхом, проте це потребує значних матеріальних витрат. Для оцінки швидкості вигорання рідини можна використати рівняння теплового балансу. За умов сталого горіння швидкість вигорання визначається швидкістю нагрівання та

випаровування рідини:  $q_{\text{нагр}} = v_m \Delta H_{\text{вип}} + v_{\text{прогр}} c_p (t_{\text{кип}} - t_o)$ . Та частка тепла, що випромінюється полум'ям у бік поверхні горючої рідини, і йде на її нагрівання та випаровування. Якщо швидкості вигорання та прогрівання є близькими, то  $v_m = v_{\text{прогр}}$ , тоді:

$$v_m = \frac{q_{\text{нагр}}}{\Delta H_{\text{вип}} + c_p (t_{\text{кип}} - t_o)}. \quad (2.24)$$

Важливою характеристикою процесу горіння рідини є температура її поверхні. Спочатку після запалювання вона швидко зростає і наближається до температури кипіння. З часом рідина прогривається у глибину. Але розподіл температури рідини углиб резервуара носить різний характер та залежить від теплофізичних характеристик рідини. У легкокиплячих рідинах, у міру збільшення відстані від поверхні, температура знижується (розподіл температур I роду), а у високиплячих – формується рівномірно прогрітий до температури кипіння шар (розподіл температур II роду). Цей шар отримав назву *гомותרмічного*. Товщина гомותרмічного шару в індивідуальній рідині з часом горіння зростає, а його температура залишається сталою. У багатокомпонентних рідинах їх температура з часом поступово підвищується, оскільки першими вигорють легкокиплячі компоненти. Гомותרмічний шар значної товщини виникає у рідинах із температурою початку кипіння більше 100 °С. Стосовно процесу вигорання розрізняють рідини першого і другого роду.

До *рідин першого роду* відносять низькокиплячі з температурою кипіння менше 100 °С. Для таких рідин швидкість вигорання є більшою за швидкість прогрівання у глибину. Рідина на поверхні має температуру кипіння, а у внутрішніх шарах – залишається холодною.

До *рідин другого роду* відносять високиплячі з температурою кипіння більше 100 °С. У процесі вигорання такі рідини прогриваються до дна до температури кипіння. У горючих рідин із високою теплоємністю та теплопровідністю швидкість вигорання є меншою, ніж швидкість прогрівання у глибину. У процесі вигорання таких речовин із часом від поверхні заглиблюється у рідину *гомותרмічний шар* – поверхневий прогрітий шар з однаковою температурою, близькою до температури кипіння.

Під час горіння рідин II роду, які містять нерозчинну воду, можуть виникати явища скипання та викиду рідини, що горить. *Викид* є одним із найнебезпечніших явищ під час пожеж класу «В» та часто супроводжується людськими жертвами. Вода може міститися у горючій рідині задалегідь (наприклад, нафта при видобутку містить супутню воду) або потрапити у рідину внаслідок технологічної потреби чи випадкових обставин (наприклад, подача компактного струменя води на поверхню рідини під час гасіння).

Нерозчинна вода може знаходитись у горючій рідині у вигляді розподілених по об'єму крапель. Тоді під час пожежі така суміш у межах

гомотермічного шару здатна до *спінювання* – перетворення крапель води як більш легкокиплячого компонента в момент досягнення 100 °С на бульбашки пари. При цьому горюча рідина перетворюється на піну, що збільшує об'єм. Піна, що горить, може не вміститися у резервуарі та вилитися назовні, що збільшить площу пожежі та ускладнить гасіння. Таким чином, *спінювання (скипання)* – це перехід у пару значної кількості дрібних крапель води, що знаходяться у вигляді емульсії в нафтопродукті, й пов'язана з цим поява на поверхні рідини піни, що горить та може переливатися через борт резервуара, поширюючи горіння на сусідні ділянки.

У разі тривалого горіння важких нафтопродуктів з часом можливе прогрівання до температури кипіння всієї маси горючої рідини – до дна резервуара. За умов зберігання нафти або іншої висококиплячої рідини, що містить воду, вода може відстоюватися та утворювати придонний шар. Якщо резервуар містить шар відстояної води, то вона під час пожежі резервуара нагріється до температури гомотермічного шару. Але кипіння води при цьому не почнеться, оскільки на неї тисне шар горючої рідини, тому вода перегрівається вище за температуру кипіння. Водночас у процесі вигорання рідини знижується її тиск на водяний шар, а оскільки температура водяного шару зростає – збільшується тиск водяної пари. Як тільки тиск пари відстояної води зрівняється з тиском шару горючої рідини, відбудеться бурхливе одночасне перетворення придонного шару перегрітої води на пару зі збільшенням об'єму у десятки разів. Тиск цієї пари спричиняє *викид* горючої рідини, що горить, із резервуара.

*Викид* – це миттєвий (вибухоподібний) перехід у пару води (процес *BLEVE*), яка знаходилася у придонному шарі під нафтопродуктом, та пов'язане з цим виштовхування з резервуара цього нафтопродукту у вигляді гейзера, який запалюється та утворюється факел. Відбувається викид нафтопродукту, який горить, на висоту до 100 м з розбризкуванням залишків нафтопродукту, який не встиг згоріти у факелі, у радіусі 40 м від борту резервуара.

Проміжок часу від початку горіння резервуара до настання *викиду* визначається швидкістю прогрівання та вигорання нафтопродукту та практично дорівнює часу, протягом якого прогрітий гомотермічний шар нафти досягає придонного шару води:

$$\tau_{\text{вик}} = \frac{H_{\text{ГР}} - h_{\text{H}_2\text{O}}}{(v_{\text{виг}} + v_{\text{прогр}}) \cdot 3600}, \text{ год}, \quad (2.25)$$

де  $v_{\text{виг}}$  – лінійна швидкість вигорання рідини,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $v_{\text{прогр}}$  – швидкість прогрівання горючої рідини,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $H_{\text{ГР}}$  – рівень наповнення резервуара горючою рідиною, м;  $h_{\text{H}_2\text{O}}$  – висота придонного шару води, м.

Спінювання і викид у процесі горіння рідини являють собою велику небезпеку, оскільки раптово викинута рідина, що горить, може вразити велику площу поблизу осередку пожежі, де у цей час ще знаходяться люди та

техніка. Характерними ознаками наближення спінювання або викиду є виникнення шипіння, вібрації стінок резервуара і зростання розмірів факела.

Залежно від умов, згоряння пари рідини може бути повним або неповним. У разі *повного згоряння* утворюються продукти, не здатні до подальшого окиснення ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HCl}$ ); у разі *неповного згоряння* – ті, що здатні до подальшого горіння (кіптява  $\text{C}_{\text{тв}}$ ,  $\text{CO}$  та інші). У реальних умовах пожежі під час горіння органічних речовин повного згоряння частіше не відбувається. При цьому спостерігається наявність диму, який містить частинки вуглецю (сажі), що не згоріли. Дим характеризується підвищеною температурою, непрозорістю й токсичністю.

## 2.5 Горіння рідини, що фонтанує

Горючі рідини у викопних умовах (нафта) і в технологічному обладнанні часто знаходяться під тиском, що у разі порушення герметичності системи може призвести до фонтанування. Залежно від складу в надрах природних вуглеводнів, за умови їх витискання назовні, *фонтани* будуть відрізнятися за складом суміші, що утворюється: *газові* містять газу не менше 95 % та нафти до 5 %, *газонафтові* містять газу більше 50 % та нафти до 50 %, *нафтові* містять нафти понад 50 %. При цьому виявляється, що газонафтові фонтани формуються як найвищі, оскільки є більш компактними. Найменш високими є нафтові фонтани, оскільки продукт, що фонтанує, має найбільшу густину.

Фонтани газових родовищ містять мало важких вуглеводнів і умовно називаються *сухими газами* – такими, що не дають конденсату. Фонтани газоконденсатних родовищ складаються із суміші сухих газів, пропан-бутанової фракції, ароматичних вуглеводнів, газового бензину та дизельного пального. Фонтани нафтових родовищ більш багаті на важкі фракції; вміст сухих газів у попутному газі є невеликим, а основну частину складають пропан-бутанова фракція, ароматичні вуглеводні, фракції газового бензину. Крім зазначених компонентів, газовою складовою зазначених фонтанів може бути водень, сірководень, оксид карбону, азот та деякі інші гази.

Фонтанування рідини може відбуватись й з пошкодженого обладнання або трубопроводів; при цьому утворюється *аерозоль* – розпилена у повітрі речовина. Вибухонебезпечність аерозолу горючих речовин виявляється більшою, ніж в парів або газів, оскільки передача тепла від частинки (краплі), що зайнялася, до сусідньої частинки, здійснюється випромінюванням, а не теплопровідністю. Вибухонебезпеку аерозолу визначають за його нижньою масовою КМПП; її значення можна розрахувати за формулою Шоневальда на

підставі значення теплоти згоряння речовини:  $\varphi'_n = a + \frac{b \cdot 10^6}{Q'_n}$ , г/м<sup>3</sup>, де  $a$  та  $b$  –

константи розрахунку, для органічних речовин  $a = -2,524$  та  $b = 1,235$ , для палива  $a = -7,952$  та  $b = 1,394$ . За НКМПП аерозолі поділяють на: I група – вибухонебезпечний пил з надлишковим тиском вибуху  $\Delta P > 5$  кПа; I група 1

клас – найбільш вибухонебезпечний пил з НКМПП до  $15 \text{ г/м}^3$ ; I група 2 клас – вибухонебезпечний пил з НКМПП від 15 і до  $65 \text{ г/м}^3$ ; II група – пожежонебезпечний пил з  $\Delta P < 5 \text{ кПа}$  та НКМПП більше за  $65 \text{ г/м}^3$ ; II група 3 клас – найбільш пожежонебезпечний пил із  $t_{cc} < 250^\circ\text{C}$ ; II група 4 клас – пожежонебезпечний пил із  $t_{cc} > 250^\circ\text{C}$ .

*Горіння фонтанів* – це характерний приклад дифузійного горіння. Основним вражаючим фактором горіння фонтанів є потужне теплове випромінювання, що обмежує можливість розташування людей та техніки ближче за певну відстань від факела.

Пожежі газових і газонафтових фонтанів відрізняються від нафтових тим, що фонтануюча горюча речовина встигає згоріти в повітрі, а під час горіння нафтових фонтанів вигоріти встигають тільки попутний газ і легкі фракції нафти, а все інше випадає навколо гирла бурової свердловини та продовжує горіти у вигляді аварійного розливу, який розтікається по поверхні, що ускладнює гасіння.

Форма факела, його розмір та інтенсивність випромінювання залежать не тільки від тиску в ємності або у надрах Землі, але і від параметрів отвору, через який відбувається витікання. Так, за зовнішнім виглядом факела розрізняють режими горіння фонтанів, рис. 2.6: 1) компактний факел виникає у разі відкритого фонтанування із труби при зриві обладнання; 2) розпилений факел виникає в разі витікання через трубну головку із фланцями; 3) похилий і розпилений факел виникає при деформації арматури внаслідок перегріву або з інших причин; 4) *грифон* – це розпилений факел, який виникає у випадку фонтануванні рідини із ґрунту. Розпилений факел має розвинену поверхню та більшу інтенсивність випромінювання. Аварії на нафтогазових родовищах можуть супроводжуватися повним обривом фонтанного обладнання над поверхнею або нижче рівня ґрунту.

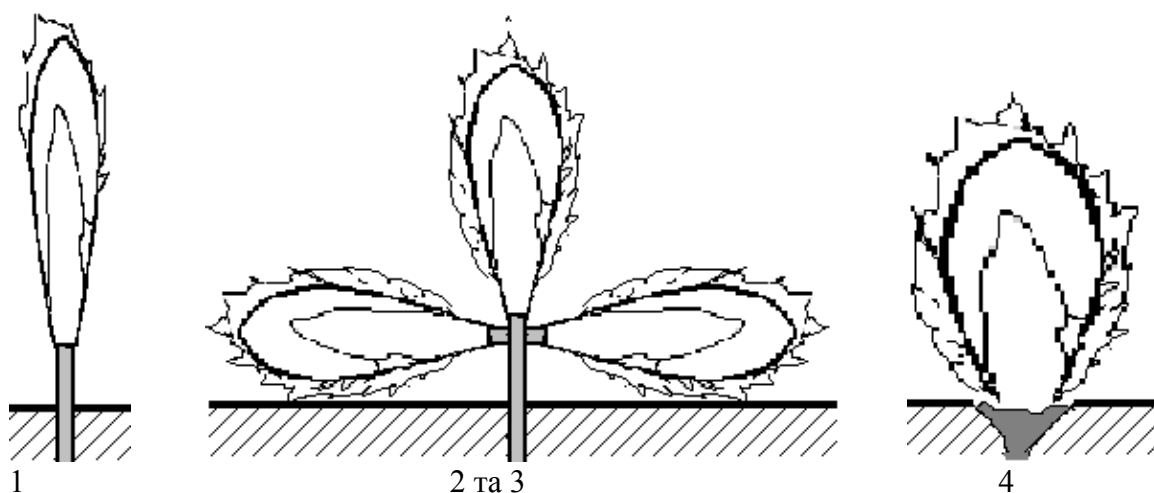


Рис. 2.6 – Види факелів:

1 – компактний; 2 та 3 – похилий та розпилений; 4 – грифон

За умови виходу нафти та газу зі свердловини продукт може рухатись зі швидкістю, близькою до швидкості звуку. За таких умов горіння має чітко

виражений турбулентний режим (неспокійне полум'я, наявність зони відриву та гул). Тоді факел фонтана за висотою умовно можна поділити на зони:

- 1) *зона відриву полум'я*; частина фонтана безпосередньо від гирла до нижньої видимої межі зони горіння факела; розмір зони відриву залежить від температури горіння, тиску та може досягати трьох метрів;
- 2) *зона займання*, в якій відбувається запалювання та горіння речовини фонтана; у цій частині факела газ і нафта можуть згоряти повністю, оскільки повітря має доступ до цієї зони;
- 3) *зона горіння*, яка розміщена від верхньої частини зони займання до верхньої частини факела; у цій зоні відбувається згорання основної маси вуглеводнів, але частіше спостерігається неповне згорання.

Внаслідок пульсації потоку контури зон є умовними і їх розміри можуть змінюватися. Висота газового фонтана менше залежить від діаметра труби, через яку виходить газ, а головним чином, визначається витратою витікання газу (дебіт свердловини):

$$H_{\phi} = 23g_{\phi}^{0,4}, \text{ м}, \quad (2.26)$$

де  $g_{\phi}$  – витрата (дебіт) витікання горючої речовини, млн  $\text{м}^3 \cdot \text{доба}^{-1}$ ;  $H_{\phi}$  – висота факела фонтана (рис. 2.7), м.

Для спрощення розрахунків можна використати формулу:

$$H_{\phi} = 20\sqrt{g_{\phi}}, \text{ м}. \quad (2.27)$$

Це співвідношення може бути використане для орієнтовного визначення дебіту виходячи з висоти факела компактного газового фонтана:

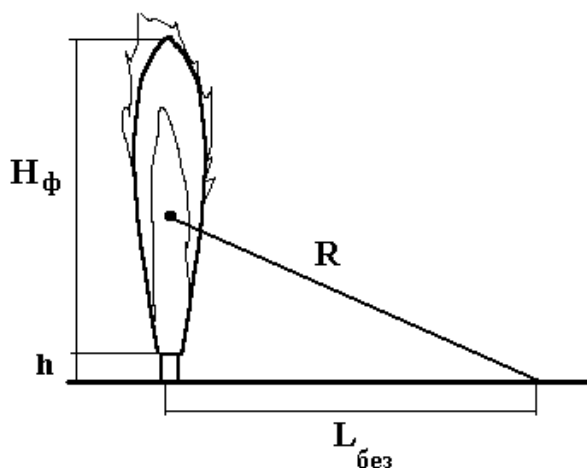


Рис. 2.7 – Схема визначення критичної відстані від факела фонтана

$$g_{\phi} = 0,0025H_{\phi}^2, \text{ млн } \text{м}^3 \cdot \text{доба}^{-1}. \quad (2.28)$$

Факел фонтана характеризується теплотою пожежі:

$$Q_{\text{пож}} = 11,57 \cdot \eta \cdot Q_{\text{н}}'' \cdot g_{\phi}, \text{ кДж} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (2.29)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт повноти згорання;  
 $g_{\phi}$  – дебіт фонтана, млн.  $\text{м}^3 \cdot \text{доба}^{-1}$ ;  
 $Q_{\text{н}}''$  – нижча об'ємна теплота згорання суміші горючих речовин у факелі фонтана,  $\text{кДж} \cdot \text{м}^{-3}$ .

Основним небезпечним впливом під час горіння фонтана є теплове випромінювання факела. Зі збільшенням відстані від центра факела до об'єкта густина теплового потоку меншає; за її критичним значенням для людини або об'єкта, можна визначити граничну межу безпечного

наближення (рис. 2.7):

$$R = \sqrt{\frac{f \cdot Q_{\text{пож}}}{4 \cdot \pi \cdot q_{\text{кр}}}}, \text{ м}, \quad (2.30)$$

де  $q_{\text{кр}}$  – критична густина теплового потоку для людей, техніки або інших об'єктів,  $\text{кВт} \cdot \text{м}^{-2}$  (тривале перебування людини без засобів захисту – до 0,5, короткочасне – до 1, особовий склад у бойовому одязі – до 4,2, пожежна техніка – до 12  $\text{кВт} \cdot \text{м}^{-2}$ );  $f$  – коефіцієнт випромінювання факела фонтана даного складу ( $f = 0,05 \sqrt{\mu}$ ); де  $\mu$  – молярна маса горючої речовини ( $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ), для суміші речовин визначають усереднену молярну масу  $\mu_{\text{сум}}$  з урахуванням часток її компонентів  $r_i$ :

$$\mu_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^z r_i \cdot \mu_i, \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}. \quad (2.31)$$

Відстань від основи факела для безпечного розташування різних об'єктів можна визначити за теоремою Піфагора (рис. 2.7). Для спрощення розрахунку приймають, що точка, звідки відбувається випромінювання всієї потужності факела знаходиться посередині його висоти з урахуванням можливої наявності трубної головки або зони відриву:

$$L_{\text{без}} = \sqrt{R^2 - \left( h + \frac{H_{\text{ф}}}{2} \right)^2}, \text{ м}, \quad (2.32)$$

де  $h$  – висота зони відриву та (або) трубної головки, м;  $R$  – гранична відстань від центру факела, м;  $H_{\text{ф}}$  – висота факела фонтана, м.

Додатковим небезпечним чинником пожежі з турбулентним виходом рідини або газу є виникнення потужних інфразвукових коливань, які можуть викликати у людей, що перебувають неподалік, паніку (оскільки довжина хвилі таких коливань резонує з розмірами людського тіла або його органів). Також до небезпечних факторів пожежі фонтанів належать наявність відкритого вогню та виділення токсичних продуктів горіння.

*Розрахунок безпечної відстані від факела фонтана.*

1. Скласти рівняння реакції горіння компонентів фонтана.
2. Визначити теплоти утворення  $\Delta H_{\text{ф}}^{\circ}$  ( $\text{кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ ) продуктів горіння та горючих речовин за довідником.
3. Розрахувати за законом Гесса нижчу молярну теплоту згоряння  $Q_{\text{н}}$  ( $\text{кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ ) для компонентів фонтана.
4. Розрахувати об'ємну теплоту згоряння компонентів фонтана  $Q_{\text{н}}^{\text{//}}$  ( $\text{кДж} \cdot \text{м}^{-3}$ ).
5. Розрахувати об'ємну теплоту згоряння суміші речовин фонтана:



$$Q''_{\text{н гф}} = \frac{\sum(Q''_{\text{ні}} \cdot \varphi_i)}{100}, \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (2.33)$$

де  $Q''_{\text{ні}}$  – нижча об'ємна теплота згоряння і-го компонента фонтана,  $\text{кДж} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  
 $\varphi_i$  – вміст і-го компонента фонтану, %.

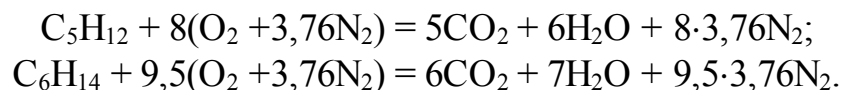
6. Визначити висоту фонтана за формулою (2.27).
7. Визначити кількість тепла пожежі, що виділяється у факелі, за формулою (2.29).
8. Визначити критичну відстань від центра факела за формулою (2.30).
9. Визначити безпечну відстань від факела фонтана за формулою (2.32).

#### *Приклад розв'язання задачі*

Розрахувати критичну відстань від факела газоконденсатного фонтана, для особового складу в засобах захисту, якщо склад суміші вуглеводнів:  $\text{C}_5\text{H}_{12}$  – 40 %;  $\text{C}_6\text{H}_{14}$  – 60 %; дебіт – 0,1 млн  $\text{м}^3 \cdot \text{доба}^{-1}$ , коефіцієнт повноти згоряння – 0,85; висота зони відриву – 1 м.

#### *Розв'язання*

1. Складаємо рівняння реакції горіння для компонентів фонтана:



2. Визначаємо теплоти утворення горючих речовин за даними таблиці додатків 5:  $\Delta H_{\text{f}}\text{C}_5\text{H}_{12} = -164,4 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ ;  $\Delta H_{\text{f}}\text{C}_6\text{H}_{14} = -167,2 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ .

3. Розраховуємо нижчу молярну теплоту згоряння компонентів газового фонтана:

$$\begin{aligned} \text{C}_5\text{H}_{12}: \quad Q_{\text{н}} &= |5 \cdot (-394) + 6 \cdot (-242) - (-164,4)| = 3257,6 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \\ \text{C}_6\text{H}_{14}: \quad Q_{\text{н}} &= |6 \cdot (-394) + 7 \cdot (-242) - (-167,2)| = 3890,8 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \end{aligned}$$

4. Розраховуємо об'ємну теплоту згоряння для компонентів фонтана:

$$\begin{aligned} \text{C}_5\text{H}_{12}: \quad Q''_{\text{н}} &= 3257,6 \cdot 1000 / 24,5 = 132963,3 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}; \\ \text{C}_6\text{H}_{14}: \quad Q''_{\text{н}} &= 3890,8 \cdot 1000 / 24,5 = 158808,2 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}. \end{aligned}$$

5. Розраховуємо об'ємну теплоту згоряння парогазової суміші фонтана:

$$Q''_{\text{н ф}} = (132963,3 \cdot 40 + 158808,2 \cdot 60) / 100 = 148470,2 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

6. Знаходимо висоту фонтана:

$$H_{\text{ф}} = 20 \cdot \sqrt{0,1} = 6,3 \text{ м.}$$

7. Визначаємо кількість тепла, що виділяється факелом під час пожежі фонтана:

$$Q_{\text{пож}} = 11,57 \cdot 0,85 \cdot 148470,2 \cdot 0,1 = 146013,0 \text{ кДж} \cdot \text{с}^{-1}.$$

8. Визначаємо критичну відстань від центру факела для особового складу в бойовому одязі, для якого критична густина теплового потоку  $q_{\text{кр}} = 4,2 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$ .

Розрахуємо середню молярну масу горючих компонентів у суміші  $\mu_{\text{сум}}$ :

$$\mu (\text{C}_5\text{H}_{12}) = 12 \cdot 5 + 12 = 72 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1};$$

$$\mu (\text{C}_6\text{H}_{14}) = 12 \cdot 6 + 14 = 86 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1};$$

$$\mu_{\text{сум}} = (72 \cdot 40 + 86 \cdot 60) / 100 = 80,4 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}.$$

Розраховуємо коефіцієнт випромінювання:  $f = 0,05 \cdot (80,4)^{0,5} = 0,45$ .

Розраховуємо критичну відстань від центру факела для особового складу у бойовому одязі:  $R = (0,45 \cdot 146013 / (4 \cdot 3,14 \cdot 4,2))^{0,5} = 35,3 \text{ м}$ .

9. Розраховуємо безпечну відстань від основи фонтана за теоремою Піфагора з врахуванням висоти зони відриву турбулентного факелу:

$$L_{\text{безп}} = (35,3^2 - (1 + (1 + 6,3/2))^2)^{0,5} = 35,5 \text{ м}.$$

Висновок: не можна розташовувати особовий склад у бойовому одязі від основи факела даного фонтана на відстані ближче, ніж 35,5 м.

### **Питання для самостійної перевірки знань**

1. Що таке пожежа?
2. Назвіть первинні та вторинні явища пожежі.
3. Опишіть зони на пожежі.
4. Опишіть періоди розвитку пожежі.
5. Надайте класифікацію пожеж на відкритому просторі.
6. Надайте класифікацію пожеж в огороженні.
7. Надайте класифікацію пожеж залежно від типу горючої речовини.
8. Опишіть параметри пожежі.
9. Опишіть умови виникнення пожежі класу «В».
10. Опишіть види пожеж у резервуарному парку.
11. Що таке «дихання» резервуара?
12. Як відбувається утворення зони загазованості?
13. Як відбувається вигорання горючих рідин на пожежі.
14. Розкрийте сутність явищ викиду та скипання (спінювання).
15. Опишіть види фонтанів.
16. Опишіть види факелів фонтанів.
17. Надайте будову факела фонтана.
18. Вкажіть небезпечні чинники пожежі фонтанів.

### **Література для самопідготовки та поглибленого вивчення розділу:**

9, 11, 13, 16, 21, 25, 34, 39, 40, 56, 59, 60, 61, 62, 74.

### РОЗДІЛ 3. ОСОБЛИВОСТІ РОЗВИТКУ ТА ЗАПОБІГАННЯ МАСШТАБНИМ ПОЖЕЖАМ НА ПІДПРИЄМСТВАХ

#### 3.1 Розвиток масштабних пожеж на підприємствах

Класифікацію пожеж за умовами газообміну, яку наведено раніше, можна спрощено подати у вигляді структурної схеми, рис. 3.1.



Рис. 3.1 – Загальна класифікація пожеж за умовами газообміну

Пожежі також класифікують за ознаками:

- місце виникнення пожежі та особливості її поширення (групи I, II);
- тип речовин та матеріалів, що становлять пожежну навантагу (класи A, B, C, D), схема наведена на рис. 3.2.

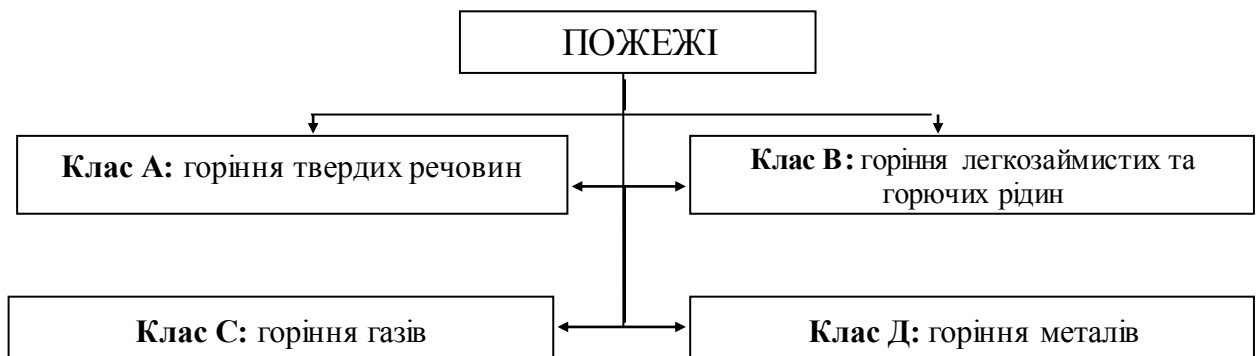


Рис. 3.2 – Загальна класифікація пожеж за типом горючого матеріалу

Дані стосовно *масштабних пожеж* на промислових підприємствах показують, що здебільшого така пожежа супроводжується ефектом «доміно», тобто каскадним розвитком, коли у процес послідовно вступають різні об'єкти, що знаходяться на території підприємства. Таким чином, *каскадність* є характерною рисою великих пожеж.

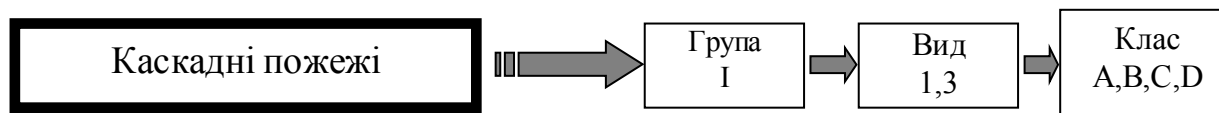


Рис. 3.3 – Місце каскадних пожеж у загальній систематизації

Так, під час пожежі на заводі отрутохімікатів (табл. 3.1) у процес горіння послідовно вступали окремі об'єкти-контейнери з ЛЗР, ГР та зрідженим газом; всього зайнялося понад 200 контейнерів; пожежа поширилася також на завод з виробництва пиломатеріалів, що знаходився поруч. Процес мав яскраво виражений каскадний характер.

Таблиця 3.1 – Масштабні пожежі на промислових підприємствах\*

№	Місце пожежі	Основна пожежна навантага
1.	Абердін, Великобританія	Бутан + «К» + (1)
2.	Австралія	Контейнери з отрутохімікатами+«К»+(3)
3.	Англія	Нафтопереробний завод + «К»
4.	Бек, Нідерланди	Пропілен+«К»+(1)+(4)
5.	Белт, США	Скраплений нафтовий газ +«К»+(1)
6.	Бремен, ФРН	Мучний пил+(2)
7.	Голданна, США	Скраплений нафтовий газ +«К» +(1)+(5)
8.	Гуд-Хоп, США	Пропан (пожежа на кораблі)
9.	Доннелсон, США	Скраплений нафтовий газ +«К»
10.	Зал. Бантрі, Ірландія	Нафта (пожежа на кораблі)+(2)
11.	Ігл-Пасс, США	Скраплений нафтовий газ + (2)
12.	Йонава, Литва	Аміак+(2)
13.	Кінгмен, США	Пропан (2)
14.	Кресент-Сіті, США	Пропан+«К»+(1)
15.	Лінчберг, США	Пропан + «К»+(1)
16.	Луїсвіль, США	Вінілхлорид+«К»
17.	Людвігсхафен, Німеччина	Бугадієн+«К»+(1)+(4)+(5)
18.	Москва, РФ	Склад побутової хімії + «К»
19.	Річмонд, Великобританія	Целулоїд+«К»+(1)+(4)+(5)
20.	Сан-Карлос, Іспанія	Пропан, вибух цистерни +(2)
21.	Сан-Хуан-Іксуатепек, Мексика	Скраплений нафтовий газ +«К»+(1)+(5)
22.	Сент-Пол, США	Скраплений нафтовий газ +«К»+(1)
23.	Фліксборо, Великобританія	Циклогексан+«К»+(3)
24.	Фрейзен, Франція	Пропан+«К»+(3)
25.	Хехст, ФРН	Ніпрат амонію +«К»+(1)+(4)
26.	Х'юстон, США	Вінілхлорид+«К»

\* – «К» – пожежа розвивалася каскадно; якщо об'єкт із пожежею не вказано – пожежа була на підприємстві; у дужках подано класифікацію за позиціями рис.3.1.

Аналогічна послідовність подій спостерігалася на пожежі на нафтопереробному заводі в Англії. У цьому випадку основними об'єктами, що брали участь у каскадній пожежі, були ємності з бутаном і ректифікаційні колони. Склад побутової хімії не був промисловим підприємством, але мав велику пожежну навантагу; мала місце суцільна пожежа як результат

каскадного розвитку, де послідовно спалахували об'єкти-контейнери з аерозольними балончиками та іншою побутовою хімією.

Великі аварії з супутніми пожежами та вибухами на нафтопереробних підприємствах (НПП) у більшості випадків відбуваються через виток горючої рідини або вуглеводневого газу, що трапляється частіше з наступних причин:

- порушення правил виробничої та пожежної безпеки (33 %);
- неякісний монтаж або ремонт обладнання (22 %);
- неякісний блискавкозахист (13 %);
- порушення правил технологічного регламенту (11 %);
- неякісні сальникові ущільнення та фланцеві з'єднання (11 %);
- знос обладнання (8 %); інші причини (2 %).

У табл. 3.2 наведено відомості про великі аварії на підприємствах НПП ряду країн, що супроводжувалися пожежами та вибухами.

Таблиця 3.2 – Великі аварії у нафтопереробній промисловості

Місце аварії	Речовина та характер аварії		Маса, т	Кількість загиблих	Кількість постраждалих
Німеччина, Людвігсхафен	Вибух хмари	бутадиєн і бутилен	20	57	459
		диметиловий спирт	30	207	3000
Франція, Фейзен	Вибух сховища зрідженого нафтового газу		200	18	81
США, порт Гудзон			70	0	7
ПАР, Потчсфетсрум	Вихід рідкого аміаку		-	18	64
США, Декейтор	Вихід пропану		63	7	152
Нідерланди, Бек	Вибух хмари пропану		3-5	14	107
Англія, Фліксборо	Вибух хмари циклогексану		30-50	28	89
США, Веєю	Вихід пропілену		5,5	14	45
Колумбія, Картахена	Вихід аміаку		-	30	22
Колумбія, Санга-Крус	Вибух метану		-	52	-
Іспанія, Сан-Карлос	Вибух хмари пропілену		38	215	780
Мексика, Мехіко	Вибух ємності (скраплений газ)		-	452	5250
Бразилія, Кубатао	Вибух газоліну (легкий бензин)		-	500	7000
РФ, Ярославль	Вихід та вибух вуглеводневих газів		3,3	6	13
РФ, Красноярськ			-	4	5
РФ, Уфа			-	2	8

Джерелами запалювання газопароповітряних сумішей на відкритих установках НПП є:

- розпечена поверхня технологічного обладнання (36,8 %);
- відкритий вогонь печей тощо (22,8 %);
- відкритий вогонь газо- або електрозварювальних робіт (8,8 %);
- електричні іскри несправного обладнання (8,9 %);
- нагрівання внаслідок тертя погано змащених деталей (7,6 %);
- самоспалахування горючих парів та газів (7,5 %); інші джерела (7,6 %).

Зі збільшенням обсягів виробництва, транспортування, зберігання та споживання зріджених вуглеводневих газів зростає й кількість вибухів та пожеж, які відрізняються тривалістю, значними людськими та матеріальними втратами. Згідно зі статистичними даними, прямі матеріальні збитки від таких пожеж становлять значну частку вартості об'єктів (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Матеріальні збитки від однієї пожежі (вибуху)

Об'єкти	Збитки від пожежі (вибуху), % від вартості одного об'єкта
Виробничі будівлі	6,1
Складські приміщення	30,5
Виробничі установки поза будівлями	15,1

Великі аварії на НПП супроводжуються, як правило, викидом пожежонебезпечних речовин в атмосферу та виникненням загазованості території відкритих технологічних установок. Такі процеси можуть мати місце як за умов регламентного режиму роботи технологічного обладнання, так і за аварійної розгерметизації апаратів або комунікацій.

Причини виникнення аварій на НПП, пов'язані з технологічним обладнанням, розташованим на відкритих виробничих майданчиках, наведено у табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Причини аварій на відкритих технологічних установках НПП

Причина аварії	Кількість аварій, %
Вихід продукту через сальники, прокладки тощо	30,2
Порушення режиму експлуатації технологічної лінії	16,9
Неякісний монтаж обладнання	14,1
Корозія обладнання	12,1
Прогарання труб	8,5
Переповнення промислової каналізації	10,6
Інші причини	10,6

Внаслідок розгалуженої мережі технологічних комунікацій, великої щільності насичення території підприємства відкритими технологічними установками, високого енерговмісту цих установок – негативні наслідки можливих аварій на відкритих промислових майданчиках НПП можуть бути більшими, ніж у закритих виробничих будівлях.

Пожежовибухонебезпечність окремих блоків зовнішніх технологічних установок визначається характером сировини та готової продукції, параметрами технологічного процесу та особливостями обладнання. Окремі елементи схем, наприклад, трубчасті печі, є джерелами як утворення вибухонебезпечних сумішей, так і джерелами їх запалювання. Розподіл кількості аварій за видами технологічного обладнання НПП представлено у табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Розподіл кількості аварій за видом обладнання НПП

Обладнання	Частка аварій, %
Технологічні трубопроводи	31,2
Насосні станції	18,9
Ємнісні апарати (теплообмінники, дегідратори)	15,0
Печі	11,4
Ректифікаційні, вакуумні та інші колони	11,2
Промислова каналізація	8,5
Резервуарні парки	3,8

Аварійне витікання горючих газів, зріджених газів, легкозаймистих рідин, а також їх залповий викид із пошкодженої частини технологічного обладнання, є основними джерелами загазованості території НПП. Для подібних аварій можна виділити кілька стадій (рис. 3.4).

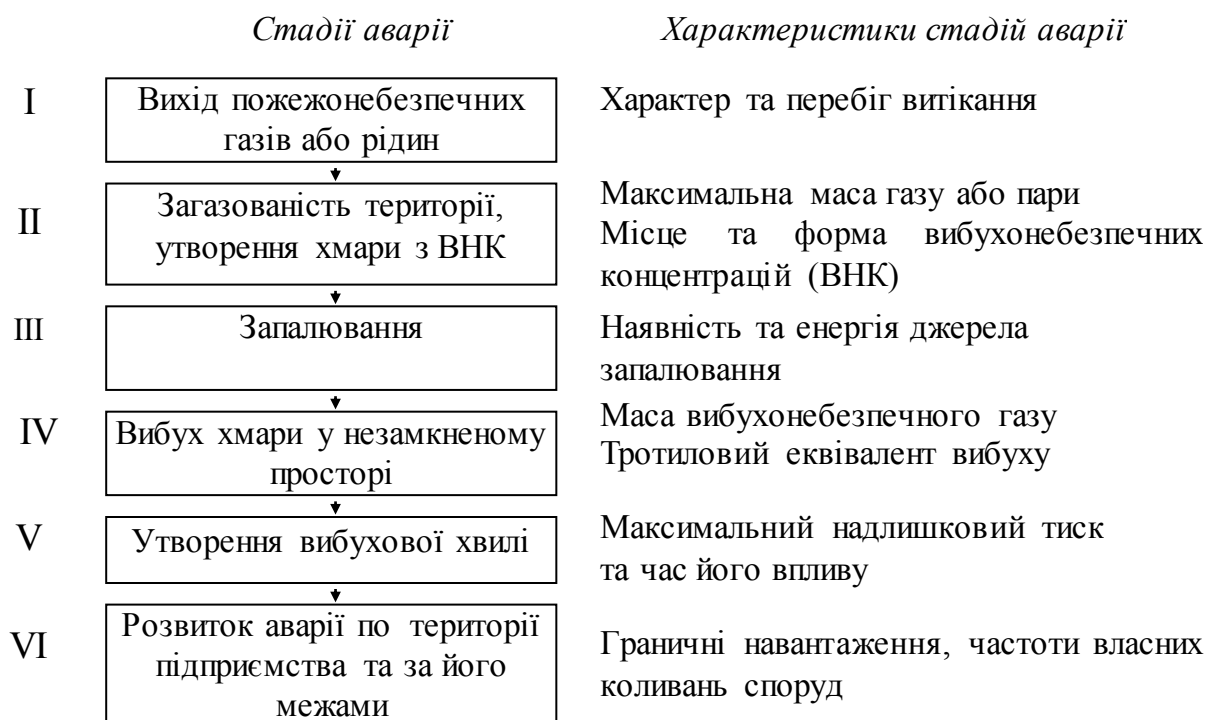


Рис. 3.4 – Характерні стадії аварії з викидом горючих газів або парів на НПП

Вибухонебезпечні хмари горючих повітряних сумішей частіше спалахують через деякий час після їх утворення, що дозволяє сповістити персонал підприємства та населення, застосувати засоби захисту (парові або водяні завіси) та вжити заходів щодо запобігання можливим вибухам. Тому актуальним є виявлення загазованості повітряного середовища промислового майданчика НПП на ранніх стадіях аварії (рис. 3.4, стадії I та II).

У табл. 3.6 наведено економічні збитки від великих аварій на НПП США. Сукупні збитки від цих аварій становили близько 1,66 млрд дол. (за середніх збитків від однієї великої аварії – 58 млн дол.).

Таблиця 3.6 – Прямі економічні збитки від великих аварій на НПІ США

Місто, штат	Установка, процес	Прямі збитки, млн дол.
Norco, Louisiana	Каткрекінг	327,0
Romeoville, Illinois	Інші	152,4
Deer Park, Texas	Інші	114,2
Richmond, California	Гідрорекінг	100,7
Texas City, Texas	Алкілювання	99,6
Linden, New Jersey	Гідрорекінг	94,6
Lake Charis, Louisiana	Інші	76,6
Wilmington, California	Гідроочищення	72,7
Avon, California	Каткрекінг	60,7
Borger, Texas	Алкілювання	53,8
Martinez, California	Каткрекінг	53,0
Sweeny, Texas	Гідроочищення	51,0
Baton Rouge, Louisiana	Інші	45,6
Texas City, Texas	Алкілювання	40,3
Denver, Colorado	Інші	39,7
Philadelphia, Pennsylvania	Інші	28,7
Port Arthur, Texas	Вакуумна перегонка	27,5
Warren, Pennsylvania	Каткрекінг	26,3
Lake Charis, Louisiana	Каткрекінг	23,5
Avon, California	Коксування	22,9
Baton Rouge, Louisiana	Каткрекінг	18,2
Torrance, California	Алкілювання	16,9
Chalmette, Louisiana	Гідрорекінг	15,8
Beautmont, Texas	Вакуумна перегонка	15,3

Проте прямими втратами збитки від аварій не обмежуються. Уявлення про повні економічні збитки надають дані з табл. 3.7.

Таблиця 3.7 – Повні економічні збитки від деяких великих аварій

Місто, штат, країна	Збитки, млн дол.	
	прямі	додаткові
Ras Tanura, Саудівська Аравія	31,5	20,0
Port Arthur, Texas, США	27,5	76,0
Lake Charis, Louisiana, США	23,5	44,0
Seadrift, Texas, США	81,6	60,0
Sweeny, Texas, США	51,0	225,0
Sterlington, Louisiana, США	107,1	35,0
Melbourne, Австралія	11,4	40,0
Haifa, Ізраїль	15,0	22,0
Westlake, Louisiana, США	12,6	20,0
La Mede, Франція	191,9	200,0



На практиці виявляється, що у випадках, коли на підприємстві або у стик із ним є додаткова пожежна навантага, процес набуває каскадного характеру. *Масштабні пожежі*, що не належать до каскадних, спостерігаються лише у тих випадках, коли у процес горіння із самого початку була залучена уся пожежна навантага, наприклад, пожежі на кораблях або загоряння окремого великого резервуара з горючою рідиною. *Каскадний розвиток* пожежі можливий для більшості блоків схеми на рис. 3.1 – блоки 1, 3, 4; блок 5 також можна розглядати як окремий випадок каскадного процесу, в якому бере участь велика кількість об'єктів. Суцільна пожежа виникає внаслідок послідовного вступу у процес окремих об'єктів і є граничним випадком каскадного процесу. Спостерігається зростання ролі небезпеки каскадних пожеж на підприємствах у збільшенні пожежної небезпеки в цілому та у збільшенні втрат різної спрямованості (матеріальних, моральних, екологічних).

Статистичний аналіз втрат від великих пожеж у ХХ ст. для обраних показників у частках наведено на рис. 3.5:

$$\alpha_1 = \frac{N_k}{N}; \alpha_2 = \frac{Q_k}{Q}; \alpha_3 = \frac{M_k}{M}, \quad (3.1)$$

де  $\alpha_1$  – частки каскадних пожеж,  $\alpha_2$  – частки показників збитків;  $\alpha_3$  – частки показників кількості постраждалих;  $N$  – загальна кількість великих пожеж на підприємствах протягом року;  $N_k$  – кількість каскадних пожеж;  $Q_k$  – економічні збитки від каскадних пожеж;  $Q$  – загальні економічні збитки від усіх великих пожеж;  $M_k$  – кількість постраждалих внаслідок каскадних пожеж;  $M$  – загальна кількість постраждалих від пожеж у промисловості.

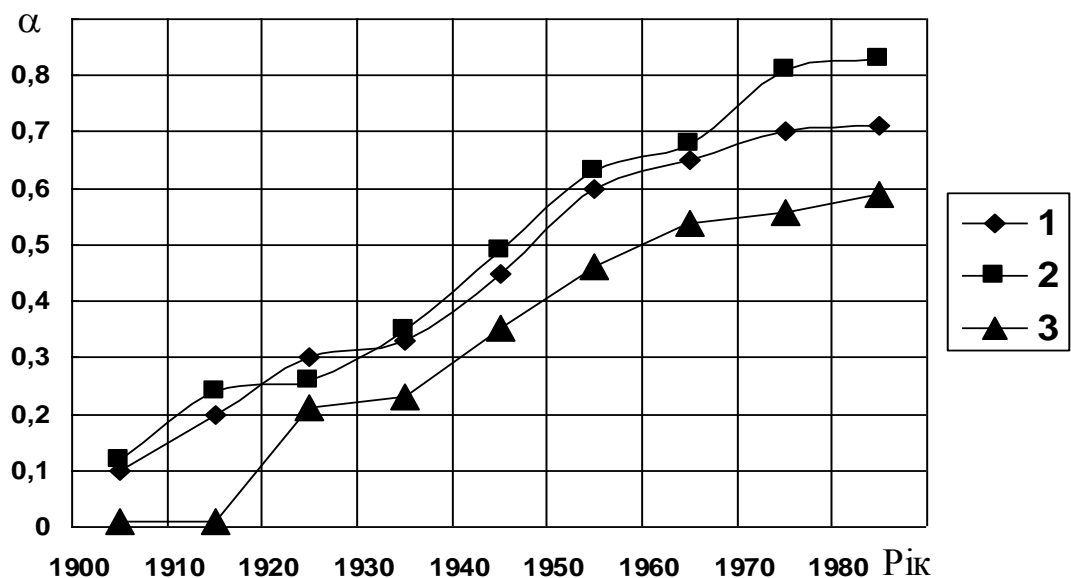


Рис. 3.5 – Зростання частки каскадних пожеж: 1 –  $\alpha_1$ , 2 –  $\alpha_2$ , 3 –  $\alpha_3$

Тобто збитки від каскадних пожеж (як економічні, так і соціальні) істотно зростають, що пов'язано зі зростанням розмірів підприємств та кількості пожежної навантаги на об'єктах. Однак із початку 70-х років XX ст. помітна стабілізація збитків, що можна пояснити зниженням швидкості укрупнення підприємств (продуктивність почала підвищуватися за рахунок вдосконалення технологій), покращення протипожежного захисту та впровадження більш безпечних технологій. Кількість каскадних пожеж із розвитком промисловості збільшилася та стабілізувалася на рівні 70 %.

### 3.2 Методи визначення характеристик каскадного розвитку пожежі

Каскадні пожежі найчастіше розвиваються як зовнішні. Для оцінки характеристик поширення зовнішньої пожежі слід враховувати особливості технологічного процесу, розташування об'єктів і рельєфу місцевості на території конкретного підприємства, можливості виникнення ефекту «доміно».

Існують *детермінований, статистичний* та «*дерева рішень*» підходи до визначення характеристик пожежі:

- а) *детермінований* – створення фізичної та (або) математичної моделі розвитку подій та розробка відповідного програмного забезпечення;
- б) *статистичний (імовірнісний)* – використовує статистичну обробку даних про пожежі; аналіз об'єктивних даних про параметри пожежі та спостереження осіб, які перебували на території підприємства у момент пожежі або її ліквідації, на підставі методу «експертних оцінок»;
- в) *метод дерева рішень (МДР)* для аналізу розвитку ситуації.

Під *деревом рішень* розуміють схему всіх можливих сценаріїв розвитку подій з урахуванням ймовірності їхньої реалізації. Елементами структури дерева рішень можуть бути результати статистичного аналізу та розрахунки на основі математичної моделі процесу за підходами «а» та «б». Підходи «а» та «б» взаємно доповнюють один одного і дають можливість отримати більш повну інформацію про розвиток та можливі наслідки пожежі. Структура дерева рішень дозволяє узагальнити ці результати.

В основі *детермінованого підходу* лежить створення моделей розвитку подій аварійної ситуації на основі законів збереження імпульсу, енергії, речовини, а також інформації про хімічні процеси, що мають місце, з використанням емпіричних співвідношень, отриманих на основі обробки експериментальних результатів.

Більш точні результати дають методи, які використовують системи диференціальних рівнянь для моделювання суцільного середовища, проте їх практичне застосування є проблематичним. Існуючі методики та програмне забезпечення, основані на використанні моделі суцільного середовища, поширюються, головним чином, на розрахунки внутрішніх та лісових пожеж.

Для оцінки розвитку та впливу зовнішньої пожежі й вибуху на навколишні будівлі, споруди, а також на життя та здоров'я людей доцільно

використовувати математичні моделі з використанням емпіричних залежностей. При цьому можливі такі типи сценаріїв розвитку подій на об'єктах, розташованих на території підприємства: факельне горіння; горіння потоку продукту (pool fire); вибух пароповітряної хмари та її згоряння без детонації (flash fire); миттєвий викид продукту з утворенням «вогненної сфери»; вибух газу або пари всередині обладнання; потрапляння в атмосферу або на поверхню землі небезпечних для життя та здоров'я людей хімічних речовин (хлору, аміаку тощо) або продуктів горіння.

*Статистичний підхід* розглядає не конкретну фізичну модель процесу, а аналізує дані про пожежі на підприємствах обраного типу, виходячи з чого визначаються можливі варіанти розвитку пожежі на конкретному об'єкті. Такий підхід дає можливість отримати достовірну інформацію про особливості процесу шляхом аналізу об'єктивних статистичних даних або методом «експертних оцінок».

Аналіз об'єктивних статистичних даних дозволяє оцінити ймовірність можливих сценаріїв розвитку подій, як це зроблено в цьому навчальному посібнику. Однак практичне застосування такого аналізу пожеж та вибухів на великих підприємствах часто є неефективним, внаслідок невеликої кількості пожеж для формування статистичної вибірки та низької достовірності даних методом «експертних оцінок».

*За методом дерева рішень* створюється схема дерева рішень, елементами якого можуть бути як розрахунки, виконані з урахуванням детермінованого підходу, так і результати статистичного аналізу.

Наприклад, враховують, що на певному підприємстві є  $M$  об'єктів, для кожного з яких є можливими  $N_i$  варіантів розвитку подій пожежі. Тоді виникне « $i$ » варіантів сценарію  $n_{i,j}$ . Приймають, що пожежа розпочалася на першому об'єкті, а процес розвитку подій протікає за першим сценарієм  $n_{1,1}$ . При цьому можливе поширення пожежі на один з наступних об'єктів. На розвиток подій накладають ряд обмежень: в даний момент до каскадного процесу може підключитися тільки один наступний об'єкт; сценарій розвитку пожежі на кожному об'єкті залежить від подій на сусідньому об'єкті в межах принципу «каскадності», але при цьому не враховується зворотний та паралельний взаємний вплив подій між об'єктами.

Такі обмеження полегшують побудову структури дерева подій як просту послідовність, але з усіма можливими варіантами наступного розгалуження подій без урахування вже задіяних об'єктів. Це дає можливість будувати прості фізичні та математичні моделі процесу.

У дереві рішень для конкретного підприємства часто можна відсікти деякі з гілок, реалізація яких є неможливою. Можливість або неможливість їх реалізації визначається або логікою послідовності розрахунку розвитку подій на різних об'єктах, або на основі статистичних даних. Схема дерева рішень буде ефективною у разі, коли немає надійної моделі та алгоритму прямого розрахунку ефекту «доміно».

Таким чином, немає універсального методу визначення основних характеристик пожежі, тому для кожного випадку однотипних підприємств потрібний досвід експерта з дослідження пожеж, щоб підібрати відповідні даному випадку модельні схеми розрахунку. Крім того, доцільно проводити кілька альтернативних варіантів оцінки характеристик розвитку пожежі з подальшим порівнянням результатів між собою, а також із характеристиками розвитку реальних пожеж на підприємствах.

### 3.3 Захист від каскадного розвитку пожежі

Процес поширення пожежі характеризується швидкістю, що залежить від ряду факторів, головні з яких наведено у табл. 3.8.

Таблиця 3.8 – Фактори, що впливають на швидкість поширення полум'я по поверхні горючих матеріалів

Властивості матеріалу		Чинники довкілля
Хімічні	Фізичні	
Склад горючої речовини Наявність уповільнювачів горіння (інгібіторів)	Початкова температура Орієнтація поверхні Напрямок поширення Товщина Теплоємність Теплопровідність Густина Геометрія Однорідність	Склад атмосфери Атмосферний тиск Температура Тепловий потік Швидкість вітру

Для зниження швидкості поширення пожежі, обмеження її поширення, для захисту персоналу підприємства та особового складу оперативних підрозділів використовують різноманітні технічні засоби. Засоби захисту від небезпечних факторів пожежі поділяють на *індивідуальні* та *стаціонарні*, які влаштовують на території підприємства. До *стаціонарних (конструктивних)* відносять протипожежні розриви, захисні екрани, обвалування і захисні стіни (рис. 3.6). Обвалування застосовують частіше на складах ЛЗР або ГР для обмеження площі розливу горючої рідини та відповідного зменшення передбачуваної площі пожежі (наприклад, на нафтобазах).

Основним *небезпечним фактором* пожежі, обмеження якого досягають шляхом влаштування захисних екранів та протипожежних розривів, є *теплове випромінювання*. Протипожежні розриви між об'єктами передбачають на етапі проєктування; їх зміна на підприємстві вимагає перепланування, що економічно не є виправданим. У такому разі для запобігання каскадному розвитку пожежі ефективним рішенням буде влаштування захисних екранів, які можна встановити між об'єктами підприємства, що вже працює, або навіть безпосередньо під час пожежі.

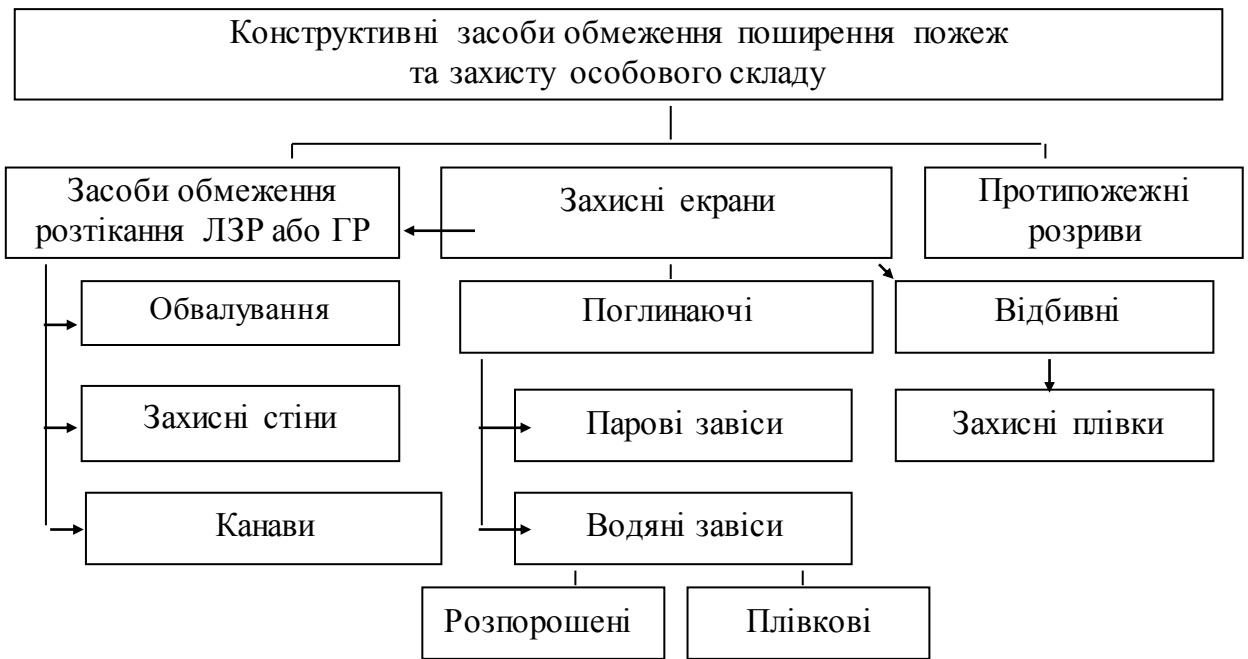


Рис. 3.6 – Класифікація засобів обмеження поширення пожежі та захисту людей

У ролі захисного екрана можуть виступати матеріали: «твердий» – екран-стіна, «гнучкий» – плівка, «розпорошений» – водяні та парові завіси, що поглинають теплове випромінювання. Для запобігання впливу випромінювання на об'єкт та каскадному розвитку пожежі застосовують два основних ефекти екранування: поглинання або відбивання теплового випромінювання (рис. 3.6). Так, водяна завіса та захисна стіна з цегли є поглинаючими екранами, а поверхня полірованого металу й тонка плівка – відбивними. Розглянемо принцип їх дії. Можна прийняти, що об'єкт, який випромінює, є точковим або сферичним (рис. 3.7), а об'єкт, який необхідно захистити, знаходиться у безпосередній близькості від екрана.

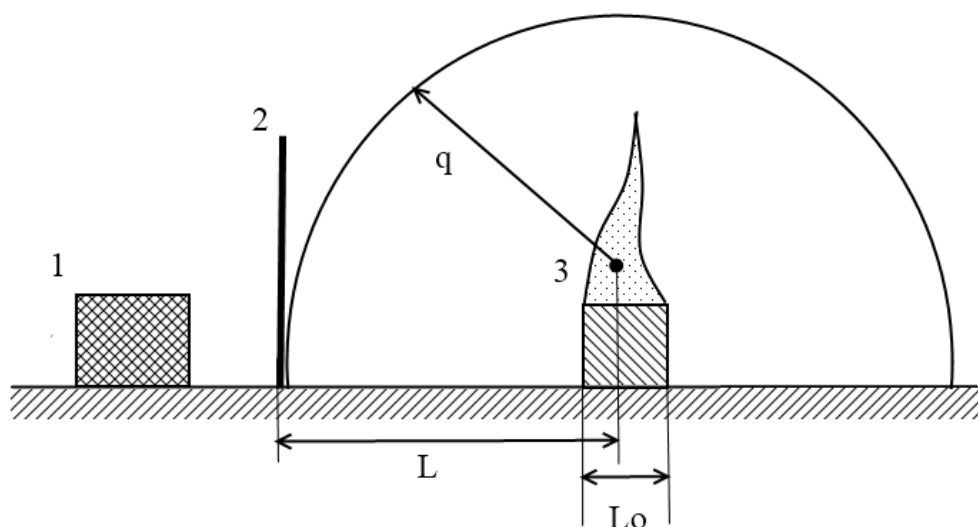


Рис. 3.7 – Розташування захисного екрана:

1 – об'єкт, який захищається; 2 – захисний екран; 3 – осередок пожежі;  
 $L$  – відстань між осередком пожежі та екраном;  $L_0$  – характерний розмір об'єкта, що горить;  $q$  – потік теплового випромінювання певної густини

Приймають, що  $L \gg L_0$ . За наявності екрана теплове випромінювання лише опосередковано впливає на об'єкт, що не горить, оскільки екран ізолює пряму взаємодію між об'єктом і джерелом випромінювання. Тобто взаємодія між ними реалізується за схемою «об'єкт, який горить,  $\rightarrow$  розігрів екрана  $\rightarrow$  об'єкт, який не горить». У такій системі на об'єкт впливає лише випромінювання розігрітого екрана.

Ефективність захисту одношаровим екраном з однорідного матеріалу можна оцінити за схемою, наведеною на рис. 3.8, наприклад, для цегляної стіни. Перехід до багатошарового екрана передбачає послідовне вирішення задачі одношарового екрана, оскільки поширення тепла всередині екрана описується аналогічними рівняннями теплопровідності з урахуванням відповідних граничних умов між шарами.

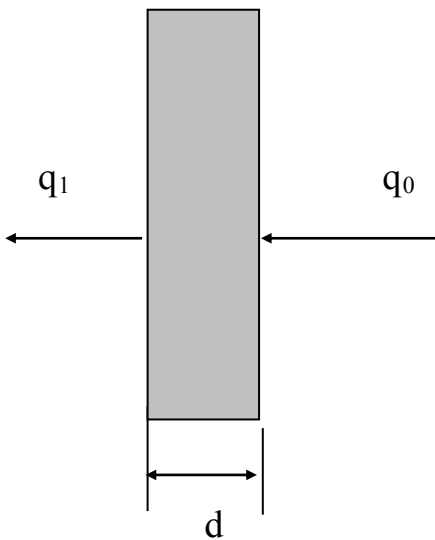


Рис. 3.8 – Робота захисного екрана:  $d$  – товщина екрана;  $q_0, q_1$  – густина потоку теплового випромінювання, який падає на екран, та поза екраном

Температура екрана в результаті впливу на нього випромінювання з певною густиною теплового потоку  $q_0$  (Дж/м<sup>2</sup>с) зростає, тому він починає випромінювати у напрямку об'єкта, який захищається, але вже менший тепловий потік  $q_1$ . Процес взаємодії елементів системи «об'єкт, який горить, – захисний екран – об'єкт, який не горить» можна розділити на дві складові: розігрів екрана як нестационарний процес та вплив нагрітого екрана на об'єкт, який захищається. У часі ці обидва етапи перетинаються – вплив екрана на об'єкт, який не горить, починається до виходу нагріту екрана на стаціонарний режим. Для спрощення розрахунку іноді моделюють лише другий етап.

Рівняння теплопровідності для нескінченної стіни має вигляд:

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (3.2)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;  $C$  – питома теплоємність;  $\rho$  – густина речовини екрана;  $x$  – координата;  $T$  – температура стіни;  $t$  – час.

Для отримання однозначно розв'язуваної системи рівнянь, що описує роботу екрана, враховують вплив як зовнішнього випромінювання, так і самої стінки, яку приймають «сірим тілом» із коефіцієнтом чорноти  $\varepsilon$ . Тоді рівняння теплового балансу екрана можна записати у вигляді:

$$\varepsilon q_0 - \varepsilon(T(0,t)^4 + T(d,t)^4) = C \frac{d}{dt} \rho \left\{ \int_0^d T(x,t) dx \right\}, \quad (3.3)$$

де  $C$  – питома теплоємність речовини екрана;  $d$  – товщина захисного екрана;  $\sigma$  – стала Стефана–Больцмана.

У лінійному наближенні стан екрана (3.3) можна записати як:

$$\varepsilon q_0 - \sigma \varepsilon (T(0,t)^4 + T(d,t)^4) = C\rho \frac{d}{dt} \left\{ T(0,t)d + \frac{d}{2} (T(d,t) - T(0,t)) \right\}. \quad (3.4)$$

Систему диференціальних рівнянь (3.2–3.4) для початкової умови  $T(0,x) = T_0$  розв'язують чисельними методами. Для типових речовин та матеріалів такі системи вже вирішені. Також розроблено й емпіричні методики визначення раціональної товщини екран, що забезпечує як захист від випромінювання заданої інтенсивності, так і відсутність поширення пожежі.

*Поглинання* енергії випромінювання *водяною завісою* відбувається аналогічно до попереднього випадку. Основна відмінність полягає в тому, що, крім поглинання тепла завісою, відбувається і випаровування крапель води внаслідок їх нагріву, тому в рівнянні (3.2) виникає доданок, що визначає поглинання енергії не тільки на нагрівання, але й на випаровування води.

У практичній діяльності підрозділів пожежної охорони використовують апробовані емпіричні залежності, що визначають зв'язок між витратою води та поглинанням енергії випромінювання.

*Відбиваючі екрани* використовують частіше для захисту обладнання та установок, що знаходяться всередині будівлі або споруди – в межах одного об'єкта, тому вони не мають прямого впливу на обмеження розвитку каскадної пожежі.

Практичною задачею є визначення раціональних характеристик захисних екранів та місць їх розташування на території підприємства: для екранів із твердих матеріалів – геометричні розміри, форма, кількість та місця розташування; для водяних або парових завіс – їх кількість, місця розташування та об'єм подавання розпиленої води або пари.

Підвищення ефективності протипожежного захисту підприємств від каскадного розвитку пожежі потребує комплексного використання заходів щодо обмеження дії її небезпечних факторів. На практиці шукають компроміс між точністю опису каскадного розвитку пожежі та простотою проведення практичних розрахунків. При цьому метою раціонального вибору параметрів засобів протипожежного захисту є зменшення кількості людей, які можуть постраждати від пожежі.

Оцінку ефективності застосування засобів протипожежного захисту на промисловому підприємстві проводять шляхом апробації розрахунку для розвитку подій відомої масштабної пожежі на підприємстві. При цьому порівнюють відомі наслідки пожежі з модельними, які могли б мати місце на цьому підприємстві у разі його обладнання раціональною системою протипожежного захисту.

### **Запитання для самостійної перевірки знань**

1. Що таке каскадна пожежа?
2. Опишіть види каскадної пожежі.
3. Укажіть причини великих аварій та пожеж.
4. Укажіть джерела запалювання великих пожеж.
5. Укажіть місця можливого виникнення аварій та пожеж на НПП.
6. Охарактеризуйте стадії розвитку аварій та пожеж на НПП.
7. Опишіть перехід великої пожежі у каскадний механізм розвитку.
8. Надайте характеристики каскадної пожежі.
9. Розкрийте методи визначення основних показників пожежі.
10. Охарактеризуйте статистичний підхід до моделювання пожежі.
11. Як використовується метод дерева рішень для моделювання пожежі?
12. Як відбувається поширення каскадної пожежі?
13. Укажіть методи обмеження поширення каскадної пожежі.
14. Укажіть засоби обмеження поширення пожежі.

### **Література для самопідготовки та поглибленого вивчення розділу:**

1, 3, 12, 13, 15, 39, 40, 41, 43, 50, 53, 69, 73.



## РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНКИ ЛОКАЛЬНИХ СЦЕНАРІЇВ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖІ НА ПІДПРИЄМСТВІ

### 4.1 Основні способи зберігання горючих рідин

Залежно від кількості горючих рідин їх зберігають у резервуарах або спеціальній тарі (цистернах, бочках, бідонах, бутлях, балонах, каністрах, баках тощо), в якій рідини можна і транспортувати. В якості резервуарів раніше використовували так звані комори (земляні ями), які зараз іноді використовують у модернізованому вигляді для тимчасового зберігання малолетких рідин. Для транспортування горючих рідин також широко застосовують трубопровідний транспорт. Резервуари займають провідне місце для зберігання великих кількостей горючих рідин. Саме резервуари великої ємності є найскладнішими об'єктами для пожежогасіння.

*Резервуари, залежно від виду конструкції, поділяються на вертикальні, горизонтальні, кульові. За способом розташування виділяють надземні та підземні резервуари. Також, резервуари розрізняють за умовами експлуатації на стаціонарні, ті, що переміщуються (збірно-розбірні) та транспортні (у тому числі плавучі). За способом спорудження резервуари поділяють на збірно-монолітні, збірні ємності та монолітні залізобетонні.*

Важливою є класифікація резервуарів за способом організації даху: зі стаціонарним дахом, зі стаціонарним дахом та понтоном, із плаваючим дахом. Останні два види резервуарів забезпечують суттєве зменшення втрат легких рідин. Їх конструкція також впливає на характер розвитку пожежі та вимагає застосування іншої тактики гасіння порівняно з резервуарами зі стаціонарним дахом.

Головною характеристикою резервуара є його об'єм (місткість), він вказується після скороченої назви через дефіс (м<sup>3</sup>). Наприклад, РВС–1000, що означає «Резервуар вертикальний сталевий об'ємом 1000 м<sup>3</sup>».

Перші циліндричні сталеві резервуари були спроектовані у 1864 році. З цього часу починається історія пожеж резервуарів із горючими рідинами. Важкі наслідки таких пожеж визначили необхідність розробки заходів щодо безпечного поводження з горючими рідинами, що зберігаються в резервуарах, та розробки методів гасіння таких пожеж.

### 4.2 Основні пожежовибухонебезпечні об'єкти підприємств

Існує класифікація об'єктів, що знаходяться на території підприємства, з точки зору можливих локальних сценаріїв на них. Для підприємств, на яких можуть мати місце *масштабні пожежі*, найчастіше в пожежах беруть участь такі *об'єкти*: ємність із легкозаймистою (ЛЗР) або горючою рідиною (ГР); ємність зі стисненим газом; ємність зі зрідженим газом; трубопроводи, які з'єднують окремі об'єкти; приміщення з об'єктами типів «1–4».

Об'єкти 1–3 класифікують як локальні (тип «Л»), підприємство загалом – великий об'єкт (тип «К»), одиниця довжини ділянки трубопроводу – об'єкт типу «Т». Якщо об'єкти 1–4 знаходяться у приміщенні, то будівля, в якій знаходяться ємності з ЛЗР, ГР або газом, може розглядатися як об'єкт типу «Л», але під час розрахунку характеристик локального сценарію слід враховувати складну структуру об'єкта, тоді він переходить до типу «К». Найбільш небезпечними у пожежному відношенні є об'єкти типу «Л», зокрема ємності з ЛЗР, ГР, стисненим або зрідженим газом, причому характерні лінійні розміри об'єктів типу «Л» є набагато меншими за характерні лінійні розміри території підприємства, тому під час розрахунку пожежі в масштабах підприємства такі об'єкти вважаються точковими.

Послідовність розвитку подій на кожному окремому об'єкті називають *локальним сценарієм*. Відповідно до визначення «*локального об'єкта*» у процесі горіння або вибуху бере участь уся кількість горючої речовини, що знаходиться на об'єкті. Адекватний прогноз подій передбачає розгляд усіх можливих варіантів процесу горіння або вибуху, але немає необхідності використовувати метод дерева рішень, оскільки кількість можливих локальних сценаріїв є обмеженою.

Найбільш поширеними є наступні *локальні сценарії*:

- витікання рідини з резервуара в обвалування;
- розтікання горючої рідини під час повного руйнування резервуара;
- пожежа (горіння) розливу горючої рідини;
- факельне горіння струменя рідини;
- утворення небезпечної пароповітряної хмари та її поширення;
- вибух ємності з ЛЗР або ГР;
- пожежа у режимі спалаху;
- виникнення вогненної сфери.

Різноманіття особливостей розташування та конструкцій об'єктів на конкретному підприємстві, атмосферних умов, рельєфу місцевості у більшості випадків у межах математичних моделей не враховується. Під час добору показників, які включаються до сфери локального сценарію, робиться акцент на ті сторони процесу, які стосуються небезпек розвитку та поширення пожежі. У межах *прогнозування локального сценарію* горіння локального об'єкта розуміють розрахунок зміни певних *величин у просторі та часі*: а) температура  $T(X, Y, Z, t)$ , К; б) густина теплового потоку випромінювання  $q(X, Y, Z, t)$ , Дж/(м<sup>2</sup>с); в) концентрація небезпечних хімічних речовин (НХР) у повітрі  $\phi(X, Y, Z, t)$ , кг/м<sup>3</sup>; г) перепад тиску в ударній хвилі  $\Delta P(X, Y, Z)$ , Па; д) площа та розташування ділянки поверхні землі, на яку можуть потрапити рідкі НХР, ЛЗР та ГР (ЛЗР або ГР може одночасно бути й НХР); е) характеристики зон впливу небезпечних факторів пожежі у кожний момент часу, наявність яких може призвести до займання нових об'єктів та до ефекту «доміно». Під зонами впливу небезпечних факторів пожежі розуміють геометричне місце точок, де є небезпека для життя та здоров'я людей.

### 4.3 Математичний опис локальних процесів під час пожеж класу «В»

#### 4.3.1 Витікання горючої рідини з резервуара в обвалування

Висота рідини в резервуарі описується виразом:

$$h(t) = h_0 - \frac{G_0}{\rho S_p} t + \frac{g\mu^2 S_0}{2S_p^2} t^2, \quad (4.1)$$

де  $h_0$  – початкова висота;  $\rho$  – густина рідини;  $S_p$ ,  $S_0$  – площа перерізу резервуара та отвору;  $\mu$  – коефіцієнт потоку витікання;  $G_0$  – масова витрата рідини у початковий момент часу,  $G_0 = \rho\mu S_0 \sqrt{g(h_0 - h_{o1})}$ ;  $h_{o1}$  – висота отвору витікання над поверхнею землі.

Переливання рідини через край обвалування є можливим, якщо:

$$h \geq H + \frac{L}{\mu}, \quad (4.2)$$

де  $H$  – висота обвалування;  $L$  – відстань від резервуара до обвалування.

Тоді маса рідини, яка перетече через обвалування, буде становити:

$$m = \int_0^{t_k} G(t) dt; G(t) = G_0 + \frac{\rho g \mu^2 A_0^2}{A_p} t. \quad (4.3)$$

#### 4.3.2 Розтікання горючої рідини за повного руйнування резервуара

На відміну від процесу повільного розливу рідини, під час повного руйнування резервуара відбуватиметься більш інтенсивне перетікання рідини через обвалування, оскільки додаються гідродинамічні хвилі, які виникають під час руйнування резервуара. За таких умов рух рідини описують рівнянням:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial((h - h_1)u)}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial\left(\frac{u^2}{2} + gh\right)}{\partial x} = 0 \quad (4.4)$$

із граничними умовами:

$$\left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=0} = 0; \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=L} = 0; u|_{x=0} = 0; u|_{x=L} = \begin{cases} 0: & h \leq H \\ g^{0.5}(h - H)^{1.5}: & h > H, \end{cases} \quad (4.5)$$

де  $h_1$  – висота поверхні;  $u$  – середнє значення швидкості руху рідини.

Тоді маса рідини, що переливається через обвалування, буде становити:

$$M = (h_o R)^{-1} \int_0^{t_k} u(h - H) dt . \quad (4.6)$$

Відповідно виникає аварійний розлив рідини певної площі поза обвалуванням. Для горизонтальної поверхні асфальту питома площа розливу бензину або дизельного палива становить близько 0,15 м<sup>2</sup>/л. На підставі обробки статистичних даних площа аварійного розливу буде становити:

$$y = 0,3326(x_1 x_2)^2 + 1,552x_1^2 x_2 x_3, \quad (4.7)$$

де  $y = S_p \cdot 10^{-5}/2,6$ ;  $x_1 = d/45,6$ ;  $x_2 = h/18$ ;  $x_3 = i\mu^2/7$ ;  $S_p$  – площа розливу;  $d$  – діаметр резервуара;  $i$  – гідравлічний ухил рельєфу місцевості.

### 4.3.3 Випаровування горючої рідини з вільної поверхні

Для випадку аварійного розливу легкозаймистої рідини за температур, набагато менших, ніж температура кипіння рідини, процес її випаровування визначається законами дифузії. *Інтенсивність випаровування* за таких умов можна визначити за формулами (2.9) або:

$$W = 10^{-6} \eta P_{\text{нп}} \sqrt{M}, \quad (4.8)$$

де  $P_{\text{нп}}$  – тиск насиченої пари, кПа;  $M$  – молярна маса горючої рідини, г/моль,  $\eta$  – коефіцієнт вітрового навантаження залежно від температури, табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Значення коефіцієнта вітрового навантаження  $\eta$

Швидкість вітру, м/с	Значення коефіцієнта $\eta$ за температури $t$				
	10, °C	15, °C	20, °C	30, °C	35, °C
0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,1	3,0	2,6	2,4	1,8	1,6
0,2	4,6	3,8	3,5	2,4	2,3
0,5	6,6	5,7	5,4	3,6	3,2
1,0	10,0	8,7	7,7	5,6	4,8

Якщо випаровування горючої рідини відбувається з резервуара, повітряний простір якого флегматизовано негорючими газами, інтенсивність випаровування описують наступним чином:

$$W = 150 \rho \nu \delta \left( \frac{S_o}{V_o} \right) Re^{0,8} Pr P_{\text{нп}} \mu^{0,5} \theta \left( \frac{h_o}{d} \right)^{0,7}, \quad (4.9)$$

де  $\rho$ ,  $\nu$  – густина та кінематична в'язкість негорючого газу;  $S$  та  $S_o$  – площі випаровування та огорожувальних конструкцій;  $V_o$  – вільний об'єм резервуара;  $Re$  – коефіцієнт Рейнольдса;  $Pr$  – коефіцієнт Прандтля;  $P_{\text{нп}}$  – тиск

насиченої пари;  $\mu$  – відносна молекулярна маса;  $h_o, d$  – висота та діаметр резервуара;  $\Theta$  – температурний фактор.

У промисловості використовують також високотемпературні органічні теплоносії, наприклад, мобільтерм-600, індустріальна олива АМТ-300 та ін. Виробничі процеси за їх участю проводять за високих температур, які перевищують температуру спалаху. Тоді в ситуаціях аварійного розливу в період остигання рідина випаровує з поверхні та утворює вибухонебезпечні суміші з повітрям. Масу рідини, що випарувалась за час її охолодження до температури навколишнього середовища, можна знайти за формулою:

$$m_{\text{п}} = \frac{0,8 \cdot 10^{-7} \text{Nu} \sqrt{M}}{d(273)^2 R} \int_0^{\infty} T \text{P} \ln \frac{P - P_o}{P - P_{\text{нп}}} d\tau, \quad (4.10)$$

де  $\text{Nu}$  – критерій Нуссельта;  $M$  – молярна маса рідини,  $d$  – розмір площі випаровування;  $T$  – температура рідини на поверхні розділу фаз;  $P$  – атмосферний тиск,  $P_{\text{нп}}$  – тиск насиченої пари рідини за температури  $T$ ;  $P_o$  – парціальний тиск парів теплоносія на деякій відстані від межі поділу фаз.

Якщо прийняти  $T$  рівною середньооб'ємній температурі рідини, то охолодження буде відбуватися за законом:

$$T = T_o + (T_k - T_o) \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_o}\right); \quad (4.11)$$

відповідно до зниження температури буде падати й тиск насиченої пари:

$$P_{\text{нп}} = P_{\text{нп}_o} \exp\left(-\frac{Q_{\text{н}}}{RT} + \frac{Q}{RT_{\text{поч}}}\right),$$

де  $T_{\text{поч}}, T_o$  – початкові температури рідини та середовища;  $\tau_o = c \cdot m / (\alpha \cdot S)$ ;  $c$  – питома теплоємність рідини,  $m$  – маса рідини;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні рідини з площею випаровування  $S$ ;  $P_{\text{нп}_o}$  – тиск насиченої пари рідини за  $T = T_o$ ;  $Q$  – молярна теплота випаровування рідини.

Маса рідини, що випарувалася, буде становити:

$$m_{\text{п}} = A \sqrt{MP_{\text{нп}}} \frac{C \cdot m}{S \cdot Q} \frac{T_{\text{н}}^3}{T_k - T_o} \left(1 - \exp\left(-BM \frac{Q T_{\text{н}} - T_o}{R T_{\text{н}}^2} \frac{S}{C \cdot m} \tau\right)\right), \quad (4.12)$$

що за умови  $\tau \rightarrow \infty$  дає:  $m_{\text{нп}} = A \sqrt{MP_{\text{нп}}} \frac{C \cdot m}{S \cdot Q}, \quad (4.13)$

де  $A, B$  – сталі розрахунку.

#### 4.3.4 Випромінювання під час полум'яного горіння на поверхні рідини

Інтенсивність теплового випромінювання можна визначити за формулою:

$$q = q_s F \tau, \quad (4.14)$$

де  $q_s$  – середньоповерхнева інтенсивність теплового випромінювання полум'я;  $F$  – кутовий коефіцієнт опромінення;  $\tau$  – коефіцієнт проникнення атмосфери:

$$\tau = \exp \left( -7,0 \cdot 10^{-4} \left( r - 0,5 \left( \frac{4S_p}{\pi} \right)^{0,5} \right) \right); \quad (4.15)$$

де  $r$  – відстань від геометричного центру розливу до об'єкта, що опромінюється. Висота полум'я описується виразом:

$$h_p = 42 \left( \frac{4S_p}{\pi} \right)^{0,56} \left( \frac{\dot{m}}{\rho g^{0,5}} \right)^{0,61}; \quad (4.16)$$

де  $\rho$  – густина повітря;  $\dot{m}$  – питома масова швидкість вигорання рідини.

#### 4.3.5 Факельне горіння рідини, що фонтанує

Інтенсивність теплового випромінювання при вертикальному положенні факела рідини визначається за формулою (4.14), а ефективна висота полум'я  $h_p$  та його діаметр  $d_p$  визначаються за допомогою емпіричних співвідношень:

$$h_p = 220 d_o^{0,8} \left( \frac{u^2}{g} \right)^{0,2}; \quad d_p = 25 d_o^{0,7} \left( \frac{u^2}{g} \right)^{0,3}; \quad (4.17)$$

де  $d_o$  – діаметр отвору, через який відбувається витікання горючої рідини;  $u$  – середня швидкість витікання рідини.

#### 4.3.6 Утворення пароповітряної хмари

Якщо всю пароповітряну хмару розбити на сукупність елементарних пароповітряних об'єктів, то зміну концентрації  $\varphi$  у хмарі можна описати рівнянням дифузії:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = a^2 \Delta \varphi \quad (4.18)$$

де  $a$  – коефіцієнт дифузії;  $n$  – напрямок по нормалі до горизонтальної поверхні для розгляду зміни концентрацій газу або пари; початкові умови  $\varphi(x, y, z, 0) = \varphi_0(x, y, z)$  та граничні –  $\nabla|_n \varphi(S) = 0$ ;  $\varphi(\infty) = 0$ .

Розв'язання рівняння (4.18) за початкових та граничних умов:

$$\varphi(x, y, z, t) = \frac{m}{2\pi \cdot a^3 t^{1,5}} \left\{ \exp\left(-\frac{R_1^2}{4a^2 t}\right) + \exp\left(-\frac{R_2^2}{4a^2 t}\right) \right\}, \quad (4.19)$$

де

$$R_1^2 = (x - v_{\text{вх}} t)^2 + (x - v_{\text{вy}} t)^2 + (z - H)^2;$$

$$R_2^2 = (x - v_{\text{вх}} t)^2 + (x - v_{\text{вy}} t)^2 + (z + H)^2;$$

де  $v_{\text{вх}}, v_{\text{вy}}$  –  $x$ - та  $y$ - компоненти швидкості вітру  $v_{\text{в}}$ ;  $m$  – маса пари,  $m = WS\tau$ ;  $W$  – інтенсивність випаровування – (4.8) або (4.9);  $S$  – площа випаровування;  $\tau$  – час випаровування;  $H$  – висота від поверхні землі.

За результатами розрахунку орієнтуються на найбільше значення  $\varphi(x, y, z, t)$  з усіх можливих варіантів визначення характеристики.

#### 4.3.7 Вибух ємності з легкозаймистою або горючою рідиною

Вибух ємності з легкозаймистою або горючою рідиною розглядають у двох напрямках: вибух герметичної ємності з перегрітою рідиною (*BLEVE*) та вибух пароповітряної суміші над поверхнею рідини в ємності. За умов другого випадку найсильніший вибух станеться за стехіометричної концентрації пари, яка утворюється за певної температури рідини.

Рівняння теплового балансу в першому наближенні має вигляд:

$$(C_v V_o + CV) \frac{dT^*}{dt} = S \left( \varepsilon^* q(t) + \alpha \left( T^* - T(t) - \varepsilon \sigma T^{*4} \right) \right), \quad (4.20)$$

де  $C_o, C$  – питомі теплоємності матеріалу ємності та рідини;  $V_o, V$  – об'єми повітря та рідини в ємності;  $T, T^*$  – температури навколишнього середовища та рідини;  $S$  – площа поверхні рідини;  $\varepsilon^*$  – коефіцієнт поглинання;  $q(t)$  – густина потоку енергії;  $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну;  $\sigma$  – стала Больцмана;  $\varepsilon$  – ступінь чорноти поверхні ємності.

Для квазістаціонарного теплового процесу  $q(t) = q_o = \text{const}$ ;  $T(t) = T_o = \text{const}$ , за умови відсутності випромінювання від ємності, яка нагрівається (приймаємо, що все тепло поглинається), рівняння (4.20) зводиться до вигляду:

$$\frac{dT^*}{dt} = A + BT^*, \quad (4.21)$$

де  $A = S(q_o - \alpha T_o) / (C_o V_o + CV)$ ;  $B = \alpha S / (C_o V_o + CV)$ .

Тоді температура рідини змінюється відповідно до виразу:

$$T^*(t) = T_o - \frac{A}{B} (1 - \exp[Bt]). \quad (4.22)$$

За відомої залежності  $\varphi(T^*)$  зазначена формула визначає найближчий момент, коли буде можливе запалювання пари рідини внаслідок дії джерела запалювання, оскільки концентрація пари досягла нижньої КМПП,  $\varphi_n$ :

$$\varphi\left(T_0 - \frac{A}{B}(1 - \exp Bt)\right) \geq \varphi_n. \quad (4.23)$$

Формула (4.22) дозволяє також оцінити ефективну енергію вибуху:

$$E_e = 500m\left(T^* - T_{\text{кип}}\right), \quad (4.24)$$

де  $m$  – маса ЛЗР або ГР;  $T_{\text{кип}}$  – температура кипіння рідини.

Надлишковий тиск у фронті ударної хвилі на певній відстані від епіцентру вибуху (від ємності) становить:

$$\Delta P = P_0 \left(0,8m_{\text{п}}^{0,33}r^{-1} + 3,0m_{\text{п}}^{0,66}r^{-2} + 5,0m_{\text{п}}r^{-3}\right), \quad (4.25)$$

де  $P_0$  – атмосферний тиск;  $r$  – відстань від епіцентру вибуху;  $m_{\text{п}}$  – приведена маса пари, що бере участь у вибуху,  $m_{\text{п}} = 0,22 \cdot 10^{-6} E_e$ .

З рівняння (4.25) можна визначити критичну відстань  $r$  для відомого критичного тиску  $\Delta P = \Delta P_{\text{кр}}$ , що відповідає певним ступеням руйнування будівель, споруд або виникнення травм людей.

#### 4.3.8 Згоряння пароповітряної хмари у режимі спалаху

Пожежа у режимі *спалаху* (найслабкіший прояв кінетичного згоряння) може виникнути в разі утворення пароповітряної суміші з концентраціями, близькими до нижньої або верхньої КМПП. Згоряння такої суміші відбувається з малими швидкостями фронту полум'я. Зона теплового ураження практично збігається з максимальним розміром хмари продуктів згоряння. Радіус такої хмари визначається виразом:

$$r_0 = \sqrt[3]{E \cdot x_{\text{в}}}, \quad (4.26)$$

де  $E$  – об'ємний коефіцієнт розширення продуктів горіння;  $x_{\text{в}}$  – горизонтальний розмір вибухонебезпечної зони загазованості.

#### 4.3.9 Згоряння пароповітряної хмари у режимі вогненної сфери

Вогненна сфера зазвичай не виникає як первинна подія на пожежі, а відбувається після вибуху зовнішньої оболонки парогазової хмари. Але іншим варіантом її виникнення є велика площа горіння рідини з гігантським факелом, усередині якого не вистачає кисню для згоряння парів, тому вони транспортуються на велику висоту. У разі появи вітру кисень повітря



надходить до цих внутрішніх областей зони загазованості і зі стовпа полум'я вивалюється гігантська вогненна сфера діаметром до 100 м.

Догорання області пароповітряної суміші, де концентрації перевищують верхню КМПП, відбувається у вигляді *вогненної сфери*, що розширюється і підіймається. Інтенсивність її теплового випромінювання визначається виразом (4.14), а величина  $q_s$  – за формулою:

$$q_s = 0,25 \left( \frac{H}{D} + 0,5 \right) \left( \left( \frac{H}{D} + 0,5 \right)^2 + \left( \frac{r}{D} \right)^2 \right)^{-1,5}, \quad (4.27)$$

де  $H$ ,  $D$  – висота центру та діаметр вогненної сфери,  $D=5,33m^{0,33}$ ;  $m$  – маса ЛЗР або ГР, що надійшла у навколишній простір;  $r$  – відстань від об'єкта, що опромінюється, до проєкції центру вогненної сфери на поверхню землі.

Характеристики вогненної сфери визначаються групою формул (2.19–2.21) або їх альтернативними варіантами (4.28–4.31):

радіус вогненної сфери:  $R_{bc} = 29\sqrt[3]{m}$ ; (4.28)

час існування вогненної сфери:  $\tau_{bc} \cong 4\sqrt[3]{m}$ . (4.29)

На певній відстані від центру вогненної сфери на поверхні землі буде утворюватися така *густина теплового випромінювання*, яка буде критичною для певних об'єктів:

$$R_o = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-2} Q_{\text{пож}} m^{0,7}}{q_{\text{кр}}}}, \quad (4.30)$$

де  $Q_{\text{пож}}$  – питома теплота згорання речовини;  $q_{\text{кр}}$  – значення критичної густини теплового потоку для людини або об'єкта.

Тоді, якщо вважати, що вогненна сфера торкається землі, радіус зони ураження від точки проєкції центра сфери на землю буде становити:

$$r_{\text{ур}} = \sqrt{R_o^2 - R_{bc}^2}. \quad (4.31)$$

#### 4.4 Алгоритм визначення основних характеристик пожежі та вибуху

У процесі проєктування підприємства об'єкти намагаються розташувати так, щоб унеможливити як розтікання рідини або зрідженого газу, так і загорання внаслідок безпосереднього впливу підвищеної температури. Тому основними небезпечними факторами пожежі, наявність яких може призвести до каскадного розвитку, є *випромінювання* та *ударна хвиля*. Алгоритм визначення основних характеристик такої пожежі представлено на рис. 4.1.



Рис. 4.1 – Алгоритм розрахунку характеристик каскадного розвитку пожежі

Об'єкт, де почалася пожежа –  $i_0$ , очікувані моменти часу займання інших об'єктів:  $\tau_1, \dots, \tau_i, \dots, \tau_N$ . Об'єкт  $i_0$  може ініціювати каскадний розвиток послідовних вибухів на кількох F-об'єктах, які займаються майже миттєво, в момент  $\tau = 0$  після прямого контакту із середовищем високої температури об'єкта  $i_0$ . Вплив F-об'єктів на C-об'єкти в результаті послідовного впливу обумовлено випромінюванням. Далі виділяється гілка дерева рішень без урахування зворотного впливу. Об'єкт, що знову вступив у каскадний процес, ініціює аналогічний ланцюг. Процес каскадного розвитку пожежі припиняється, якщо: а) всі об'єкти, що є на території підприємства, вступили в цей процес; б) нові об'єкти, що зайнялися, не створюють каскадного продовження розвитку пожежі. Тоді існує сукупність F-об'єктів, здатних вступати у процес каскадного розвитку пожежі внаслідок вибухів:

$$F = \{i: i \in [1; N] \cap ((i \neq i_0) \cap (DP_i > 0))\}. \quad (4.32)$$

Існує певна густина потоку теплового випромінювання від F-об'єктів ( $U_{3i}(X, Y, Z, t)$ ), що виділяється не довше, ніж за час  $\tau_i$ :

$$q(X, Y, Z, t) = \sum_{i \in F} U_{3i}(X, Y, Z) (1 - \theta(t - \tau_i)). \quad (4.33)$$

Тобто, після моменту  $\tau_i$  об'єкт  $j$  перестав горіти, а густина теплового потоку від нього дорівнює «0».

Існує мінімальне значення моменту займання серед моментів займання всіх об'єктів, що не беруть участі у каскадному процесі вибухів:

$$\tau_i^* = \min_{i \in [I \setminus F]} \tau_i. \quad (4.34)$$

Першим долучитися до каскадного розвитку пожежі може С-об'єкт «i\*»:

$$F \rightarrow F \cup \{i^*\}. \quad (4.35)$$

Але для об'єкта «i\*» існує можливість виникнення ланцюгової схеми вибухів за рахунок його впливу на сусідні об'єкти; сукупність F-об'єктів доповнюється об'єктами, що знову вступили у каскадний розвиток пожежі:

$$F \rightarrow F \cup \{i: i \in [1; N] \cap ((i \neq F) \cap (DP_{i^*} > 0))\}. \quad (4.36)$$

Тоді виникає сумарна густина теплового потоку:

$$q(X, Y, Z, t) = \sum_{i \in F} U_{3i}(X, Y, Z)(1 - \theta(t - \tau_{iv} - \tau_i)). \quad (4.37)$$

Процес моделювання каскадного розвитку пожежі повторюється доти, доки стане справедливою одна з критичних умов – або всі об'єкти зайнялися, або є неможливим займання нових об'єктів:

$$F = I \text{ або } \forall i \in I: \Phi: \tau_i \otimes \rightarrow \infty. \quad (4.39)$$

#### 4.5 Порядок визначення основних характеристик каскадної пожежі

Всю інформацію, необхідну для оцінки можливого розвитку пожежі або вибуху на підприємстві, можна узагальнити у вигляді табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Система узагальнення інформації, що стосується пожежонебезпечних об'єктів підприємства

Місце об'єкту	Характеристики об'єкта
X, Y- координати точкового об'єкта	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Маса пожежної навантаги (кг).</li> <li>2. Питома теплота згоряння (Дж/кг).</li> <li>3. Основні характеристики можливих локальних сценаріїв.</li> <li>4. Критичне значення надлишкового тиску <math>\Delta P_{кр}</math>, Па, за якого є можливим часткове руйнування об'єкта.</li> <li>5. Сукупність <math>\{\tau_k; q_{k \text{ кр}}\}</math> <math>k=1,2,\dots</math> – час, за який можливе загоряння об'єкта за густини теплового потоку <math>q_{k \text{ кр}}</math>.</li> </ol>

Результати оцінки розвитку найбільш небезпечного варіанту розвитку подій доцільно наводити на плані підприємства, рис. 4.2. Наведення результатів оцінки основних характеристик каскадного розвитку пожежі у графічній формі надає можливість їх подальшого використання при розробці оперативних планів ліквідації наслідків пожежі. У графічній формі показано розташування зон впливу небезпечних факторів пожежі, послідовність вступу об'єктів у каскадний процес, густина потоку теплового випромінювання в контрольних точках, теплота пожежі.

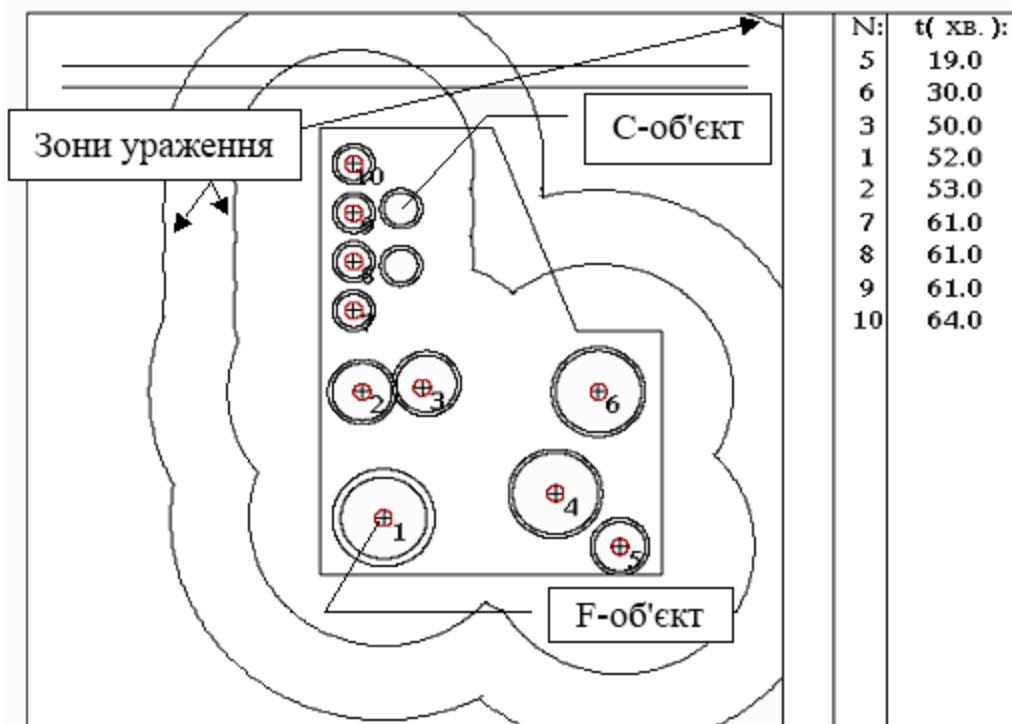


Рис. 4.2 – Зони впливу небезпечних факторів пожежі та послідовність вступу об'єктів у каскадний процес:

N – номер об'єкта; t – час вступу об'єкту «N» у каскадний процес, хв; F-об'єкт – бере участь у каскадному процесі; С-об'єкт – не бере участі в каскадному процесі

## 4.6 Приклад захисту підприємства від каскадного розвитку пожежі

### 4.6.1 Характеристика небезпечних об'єктів хімічного підприємства

На рис. 4.3 наведено розташування найбільш небезпечних об'єктів типового підприємства, схематично показано взаємний вплив об'єктів один на одного, зазначено характерні відстані їх розташування.

Розглянемо наступні проблеми: 1) ступінь небезпеки пожежі на даному об'єкті для персоналу підприємства або людей, які перебувають у даному населеному пункті чи прилеглому до підприємства регіоні; 2) можливість для пожежі на даному підприємстві перерости в каскадний процес.

Найбільш пожежонебезпечним об'єктом для підприємства є склад із вінілхлоридом, позиція 4. Пари вінілхлориду з газового простору ємності подаються на всмоктування компресорів через збірник конденсату та теплообмінник. За досягнення критичного рівня відбувається автоматична зупинка компресорів. Але цей технологічний процес є небезпечним внаслідок можливої аварійної ситуації, оскільки важко забезпечити повну герметичність всіх каналів руху речовини. Тому під час транспортування вінілхлориду вживаються підвищені заходи безпеки – автоматичне блокування, сигналізація, зупинка компресора у випадках: зниження тиску нижче критичного (оливи, вінілхлориду на вході, в ресивері, в нагнітачі, у

трубопроводі); зниження нижче критичного рівня витрати охолоджувальної оборотної води; підвищення температури вінілхлориду вище заданої критичної; потрапляння рідини у трубопроводи перед ланками компресора; досягнення максимального рівня рідини у збірнику конденсату; наявність рідкого вінілхлориду у трубопроводі газоподібного вінілхлориду після випарника; вимкнення вентиляційної установки.

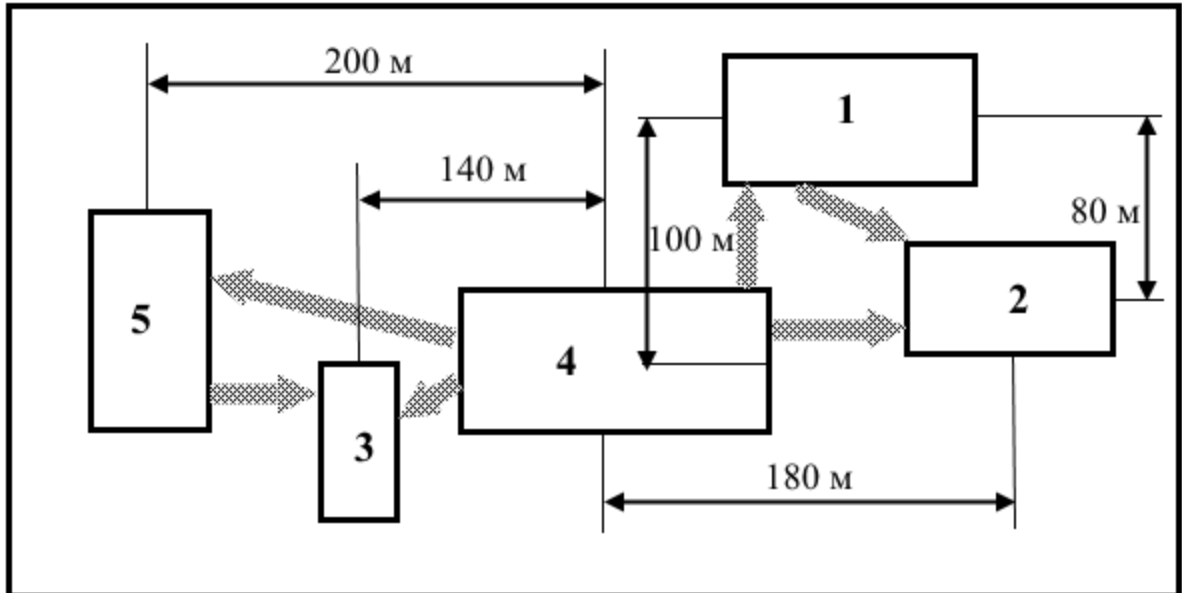


Рис. 4.3 – Розташування найбільш небезпечних об'єктів на території підприємства:  
 1 – ємності з хлором; 2 – гальванічний цех (ємності з воднем); 3 – склад ПММ;  
 4 – резервуари з вінілхлоридом; стрілками показано вплив на С-об'єкти

У цьому технологічному процесі застосовано запобігання потенційним аварійним ситуаціям:

- тиск у трубопроводі газоподібного вінілхлориду на виході з випарника не повинен перевищувати заданого критичного;
- рівень продукту у складських ємностях контролюється автоматично (автоматичне закриття засувки на лінії прийому рідкого вінілхлориду);
- тиск у ємностях підтримується в заданому інтервалі та спрацьовує сигналізація у разі досягнення мінімально можливого тиску;
- контролюються температури у всіх ємностях у заданому інтервалі;
- потрапляння газоподібного вінілхлориду на свічку під час ремонтних робіт.

Варіантом виникнення переливу вінілхлориду є його передавлювання рідким азотом (у разі несправних компресорів та випарників). Навіть незначні відхилення від нормативного режиму можуть призвести до витoku вінілхлориду та контакту із джерелом запалювання.

На об'єкті можлива реалізація таких *локальних сценаріїв* розвитку пожежі: горіння хмари газу в детонаційному або дефлаграційному режимі, внутрішній вибух. Більш небезпечним варіантом розвитку подій є виникнення вогненної сфери з попереднім вибухом, оскільки у процесі горіння може взяти участь уся пожежна навантага на об'єкті. Крім того,

практично будь-який з режимів локальної пожежі може призвести до розгерметизації однієї з ємностей-цистерн, а отже до каскадного розвитку процесу всередині сховища і далі до утворення вогненної сфери.

Виробництво хлору, водню та електролітичного лугу здійснюють методом діафрагмового електролізу водного розчину NaCl (кухонної солі). Тоді хлор у невеликих кількостях може контактувати з воднем та повітрям, що характеризується небезпекою вибуху та можливістю ініціювання каскадного розвитку пожежі. Суміш хлору з воднем може запалитися від джерела запалювання, наприклад, електричної іскри; за підвищеного тиску в апараті може статися самоспалахування починаючи з 200 °С, а за атмосферного тиску – починаючи з 430–440 °С.

Тобто розгерметизація ємностей із хлором або воднем може значно погіршити розвиток аварійної ситуації на підприємстві, а тим більше – за одночасної розгерметизації. У разі вибухонебезпечної концентрації водню можливий вибух у детонаційному або дефлаграційному режимі. Аналіз показав, що пожежа на підприємстві може спричинити вибухи та супроводжуватися каскадним розвитком аварійної ситуації.

#### 4.6.2 Розташування та визначення розмірів захисного екрана

Аналіз особливостей об'єктів підприємства показав, що *найбільш небезпечним варіантом* (ННВ) розвитку аварійної ситуації є повне руйнування однієї з ємностей з утворенням пароповітряної хмари, виникнення вибуху внаслідок дії джерела запалювання на зовнішню частину зони загазованості та наступне утворення вогненної сфери. Після вибуху до внутрішніх частин хмари, де сформувалися пожежонебезпечні концентрації – більші, ніж верхня КМПП, надходить повітря, і починається їх догорання в дифузійному режимі. На цій стадії основним небезпечним чинником пожежі стає випромінювання вогненної сфери. Як захисні заходи для обмеження каскадного розвитку пожежі можна застосувати додаткові огорожувальні конструкції – захисні екрани, які ізолюють певні об'єкти від впливу теплового випромінювання. Тобто, необхідно вирішити задачу зменшення опромінення об'єкту тепловим потоком нижче критичного рівня:

$$\Theta(i,j)=0, \text{ якщо } q=q(x_j, y_j, z_j) < q_{\text{кр}}, \quad (4.40)$$

де  $q$  – густина потоку теплового випромінювання;  $q_{\text{кр}}$  – критичне значення густини теплового потоку, за якого може спалахнути  $j$ -й об'єкт;  $\Theta(i,j)=0$  – умова неможливості реалізації одного з варіантів сценарію для змінних параметрів  $m_i$  за  $i=1, \dots, N$ .

Поверхню об'єкта  $O_j$  можна представити у вигляді геометричного місця точок, що задовольняють умові  $(x, y, z) \in S_j$ , а огорожу – у вигляді тонкої вертикальної стіни з поверхнею  $S_o$ . Захист об'єкта буде ефективним, якщо огорожа повністю закриває об'єкт від впливу випромінювання, тоді:

$$\forall (x,y,z) \in S_j \exists \lambda \in [0,1]: x-\lambda(x-x_c), y-\lambda(y-y_c), z-\lambda(z-z_c) \in S_o; \quad (4.41)$$

$$\forall (x,y,z) \in S_o, z^* < z : (x,y,z^*) \in S_o,$$

де  $(x_c, y_c, z_c)$  – геометричний центр джерела випромінювання.

Якщо умова (4.41) не виконується, то необхідно будувати додатковий захисний екран, щоб забезпечити надійну ізоляцію об'єкта  $O_j$  від впливу пожежі або вибуху, які є можливими на об'єкті  $O_i$ . Розташування екрана в певних межах може бути довільним та пов'язане з особливостями технологічного процесу підприємства та розташування об'єктів.

Поверхню  $S_j$  можна замінити набором контрольних точок:  $(x_k, y_k, z_k) \in S_j, k=1, \dots, K$ . Поверхню екрана можна описати кінцевою сукупністю  $L$  плоских сегментів прямокутної форми:

$$S_o = \bigcup_{l=1}^L S_{o1};$$

$$S_{o1} = \{(x,y,z) : z < H_1; y - y_1 = \operatorname{tg}\gamma_1(x - x_1); \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} < \frac{\Delta_1}{2}\},$$

де  $\Delta_1$  – довжина сегмента «1», м;  $x_1, y_1$  – координати центра відрізка-проекції поверхні сегмента на площину  $XOY$ , м;  $\gamma_1$  – кут орієнтації сегмента на площині  $XOY$ ;  $H_1$  – висота сегмента «1», м (рис.4.4).

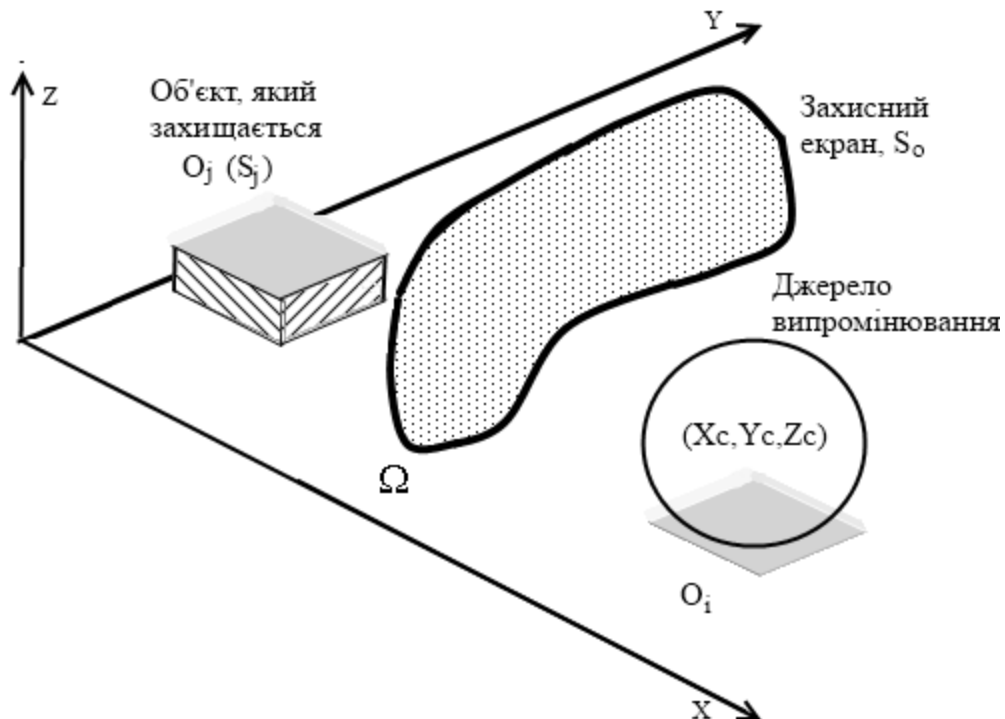


Рис. 4.4 – Вплив випромінювання на С-об'єкт та розташування захисного екрана:  $\Omega_{xy}$  – ділянка для захисного екрана;  $X_c, Y_c, Z_c$  – центр вогненної сфери;  $O_i$  – об'єкт, який горить;  $O_j$  – об'єкт, який захищається

Для вибору місця розташування сегментів захисту необхідно виконати умову неперетину плоских сегментів захисного екрана:

$$\forall l_1 \in [1, L]; l_2 \in [1; L]; l_1 \neq l_2: (x', y', 0) \notin S_{l_1} \text{ або } (x', y', 0) \notin S_{l_2}; \quad (4.42)$$

$$(x', y', 0) = \text{Line}(x_{l_2} + \Delta/2 \cos \gamma_{l_2}, y_{l_2} + \Delta/2 \sin \gamma_{l_2}, 0; x_{l_2} - \Delta/2 \cos \gamma_{l_2}, y_{l_2} - \Delta/2 \sin \gamma_{l_2}, 0) \cap \\ \cap \text{Line}(x_{l_1} + \Delta/2 \cos \gamma_{l_1}, y_{l_1} + \Delta/2 \sin \gamma_{l_1}, 0; x_{l_1} - \Delta/2 \cos \gamma_{l_1}, y_{l_1} - \Delta/2 \sin \gamma_{l_1}, 0).$$

При цьому задається  $H$  – максимальна висота сегмента екрана,  $m$ ;  $\gamma$  – кут, що задає орієнтацію сегмента на площині (XOY). Рівняння двох прямих  $\text{Line}(x_{l_2} + \Delta/2 \cos \gamma_{l_2}, y_{l_2} + \Delta/2 \sin \gamma_{l_2}, 0; x_{l_2} - \Delta/2 \cos \gamma_{l_2}, y_{l_2} - \Delta/2 \sin \gamma_{l_2}, 0)$  та  $\text{Line}(x_{l_1} + \Delta/2 \cos \gamma_{l_1}, y_{l_1} + \Delta/2 \sin \gamma_{l_1}, 0; x_{l_1} - \Delta/2 \cos \gamma_{l_1}, y_{l_1} - \Delta/2 \sin \gamma_{l_1}, 0)$  на площині (XOY) мають вигляд:

$$\frac{x - x_{l_2} \cos \gamma_{l_2} / 2}{\Delta \cos \gamma_{l_2}} = \frac{y - y_{l_2} \sin \gamma_{l_2} / 2}{\Delta \sin \gamma_{l_2}}; \frac{x - x_{l_1} \cos \gamma_{l_1} / 2}{\Delta \sin \gamma_{l_1}} = \frac{y - y_{l_1} \cos \gamma_{l_1} / 2}{\Delta \sin \gamma_{l_1}}, \quad (4.43)$$

розв’язанням даної системи двох лінійних рівнянь із двома невідомими є шукані координати  $(x', y')$ .

Існує  $N_U^{5L}$  варіантів захисту; так, для 5 сегментів захисту, якщо кожна змінна набуває 10 значень, то загальна кількість варіантів складе  $10^{25}$ , тобто перебрати всі можливі варіанти майже неможливо. Однак дана схема дозволяє знайти раціональне (але не оптимальне) розміщення та розміри захисного екрана.

#### 4.7 Раціональне розташування засобів обмеження каскадної пожежі

Комплексний аналіз наслідків пожежі на підприємстві передбачає як прогноз ситуації для даного розташування об’єктів, так і вирішення завдання щодо розробки раціональних заходів з обмеження можливого розвитку каскадної пожежі. Основними блоками алгоритму розв’язання задачі є визначення: параметрів зон ураження у разі *найбільш небезпечного варіанта* (ННВ); матриці зв’язків між об’єктами для даної конфігурації підприємства; раціонального розташування та розмірів захисних екранів; раціональної схеми захисту підприємства від каскадної пожежі; а також – розрахунок каскадного розвитку пожежі у разі ННВ. Можливі *локальні сценарії* пожежі та радіуси зон впливу небезпечних факторів пожежі у разі ННВ для більш небезпечних об’єктів базового підприємства наведено у табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Локальні сценарії розвитку пожежі на підприємстві

№	Об’єкт	Локальний сценарій ННВ	Кількість постраждалих	Радіус впливу, м	
				(1)	(2)
1	Ємності з рідким хлором по 150 т	Вогненна сфера (1), викид НХР (2)	~20000	240	15300
2	Водневі свічки	Горіння хмари	23	50	
3	Склад ПІММ	Внутрішня пожежа резервуара	4	35	
4	Реактори	Вогненна сфера	125	445	
5	Ємності з винілхлоридом	Вогненна сфера	210	2300	



Також прийнято, що для об'єкта № 3 є неможливим аварійний розлив паливно-мастильних матеріалів (ПММ), оскільки ємності розташовані нижче рівня землі (крім сценарію спінування).

Для основних об'єктів базового підприємства можна сформувати

$$\text{матрицю зв'язків: } \theta(N, N) = \theta(5, 5) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \text{ Виходячи з цього:}$$

- об'єкти № 4, 5 є небезпечними для решти об'єктів, що знаходяться на території підприємства, тому слід передбачити можливість захисту від впливу ННВ на цих об'єктах у першу чергу;
- ННВ для підприємства за даного розподілу пожежної навантаги виникає у разі практично миттєвого вступу в каскадний розвиток усіх об'єктів, якщо  $i_0=4$  або  $i_0=5$  (два останні рядки матриці зв'язків повністю складаються з елементів «1»), тому немає необхідності визначення ННВ пожежі.

З табл. 4.3 випливає, що серед усіх об'єктів, що знаходяться на території підприємства, найбільш небезпечними є ємності з хлором ( $O_1$ ) (внаслідок можливості викиду небезпечних хімічних речовин – НХР), цистерни з вінілхлоридом ( $O_5$ ) та реактори ( $O_4$ ). Але якщо цистерни з вінілхлоридом знаходяться високо над землею, будівництво захисного екрана для них практично є неможливим. Для даної задачі можна врахувати наявність трьох сегментів захисту (можливий перехід до більшої кількості сегментів у алгоритмі на рис. 4.3) з максимальною шириною сегмента  $\Delta_{\max} = 30$  м, максимальною висотою –  $H_{\max} = 20$  м та параметром дискретизації –  $N_u = 100$ . Значення координат  $\Delta X_p$  та  $\Delta Y_p$  рахують від геометричного центру об'єкта, що захищається. Застосування алгоритму пошуку раціональних характеристик захисних екранів дає змогу знизити вартість екрана без зниження надійності захисту для об'єктів підприємства в 1,3–1,8 разу за рахунок раціонального розміщення та зменшення його площі за сталої товщини та однакового матеріалу екрана.

Важливою характеристикою локального сценарію є кількість постраждалих від пожежі на об'єкті (рис. 4.5). Попередній аналіз даного підприємства показав, що є необхідність у забезпеченні надійного захисту ємностей із хлором від впливу такого небезпечного фактора пожежі, як вогненна сфера, яка може виникнути на об'єктах №№ 4 і 5, оскільки пожежа в цьому випадку може призвести до катастрофи регіонального масштабу. Реалізація ННВ на інших об'єктах є небезпечною лише для персоналу підприємства.

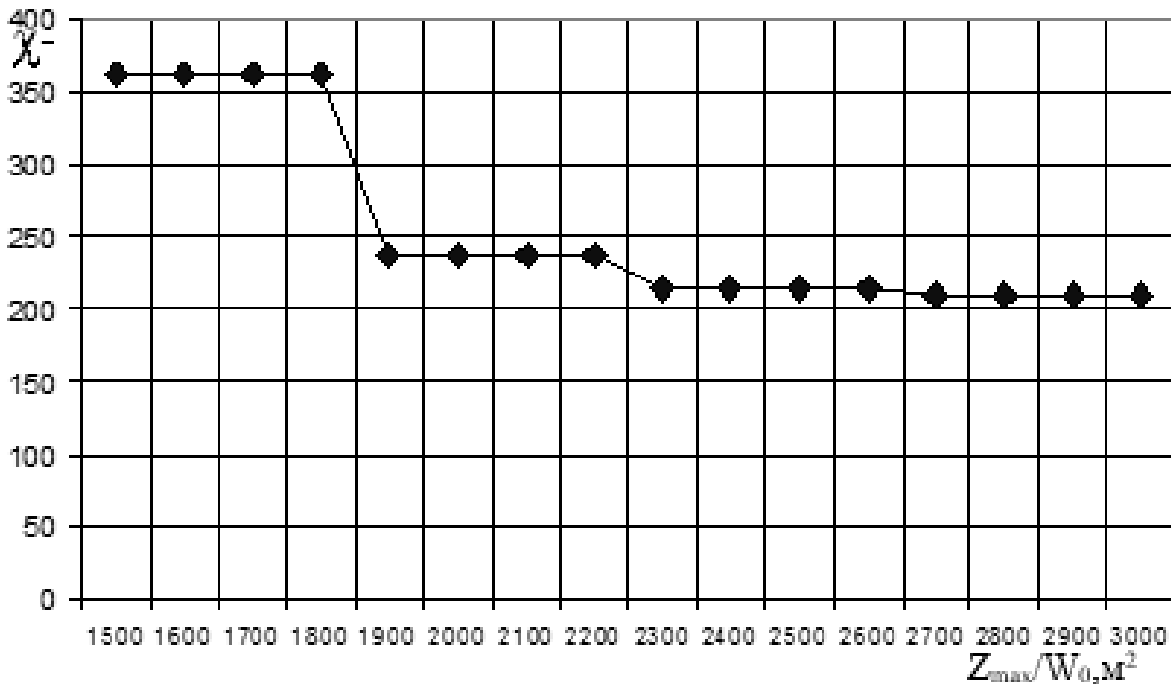


Рис. 4.5 – Залежність кількості постраждалих  $\chi$  від співвідношення максимальних витрат на будівництво екранів до вартості одного квадратного метра екрана

Часто технологія підприємства передбачає можливості зміни пожежної навантаги на об'єктах. Як цільову функцію обирають мінімізацію шкоди для життя та здоров'я людей (функція  $\chi$ ), яка у цьому випадку залежить від значень елементів матриці  $\Psi_1(5;5)$ , які можуть набувати значень 0 або 1, що відповідає наявності або відсутності захисного екрана відповідно. На рис. 4.5 наведено результати оцінки раціонального захисту базового підприємства з урахуванням забезпечення мінімуму кількості постраждалих із числа персоналу підприємства. Кожному значенню  $Z_{\max}/W_0$  відповідають значення елементів  $\Psi_1(i; j)$ ,  $i=1, \dots, 5$ ;  $j=1, \dots, 5$ , роботи, які потрібно виконати для унеможливлення каскадного розвитку процесу та для зниження ризику життя і здоров'я людей. Кожен елемент матриці  $\Psi_1(i; j)$  відповідає певному типу робіт. Якщо  $\Psi_1(i; j)=1$ , то проводити цю роботу із захисту об'єкта доцільно.

#### 4.8 Рекомендації керівнику гасіння пожежі щодо використання сил та засобів за наявності захисних екранів для обмеження каскадної пожежі

Результати вирішення задачі щодо раціонального розподілу захисних екранів на території підприємства можна застосувати для розробки рекомендацій керівнику гасіння пожежі (КГП). Наявність захисних екранів додатково визначає, які об'єкти можуть брати участь у каскадному процесі, тому існує можливість зменшити кількість запланованих сил та засобів для гасіння каскадної пожежі загалом. Можливість зменшення необхідних сил та засобів залежить від максимальних витрат на будівництво захисту.

Наприклад, за розрахунками сил та засобів для гасіння і-го об'єкта потрібно  $L_i$  відділень пожежної охорони ( $i=1, \dots, N$ ). Тоді на підставі величини  $Z_{\max}$  (максимальних витрат на будівництво захисних екранів) визначається конфігурація захисту та можливі варіанти найбільш небезпечного варіанта (ННВ) каскадної пожежі на підприємстві загалом. З усіх результатів нас цікавить сукупність об'єктів  $\{F\} \in I_0$ , які можуть брати участь у процесах ННВ, тоді кількість відділень, необхідних для гасіння пожежі:

$$L_o = \sum_{I \in \{F\}} L_i . \quad (4.44)$$

Якщо пожежа почалася на об'єкті №1, то можливість або неможливість для інших об'єктів включитись у каскадний процес розвитку пожежі визначається величиною  $Z_{\max}$  (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 – Визначення об'єктів, що можуть брати участь у каскадному розвитку пожежі за наявності захисних екранів

1	+	+	+	+	+	+	+
2	+	+	+	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-
4	+	+	-	-	-	-	-
...	...	...	...	...	...	...	...
N	+	+	+	-	-	-	-
	$Z_{\max 1}$	$Z_{\max 2}$	$Z_{\max 3}$	$Z_{\max 4}$	$Z_{\max 5}$	...	$Z_{\max M}$

«+» або «-» – об'єкт може або не може вступити в каскадний процес;

1, 2, ..., N – номери об'єктів, на яких почалася пожежа;

$Z_{\max 1}, Z_{\max 2}, \dots, Z_{\max M}$  – витрати на будівництво захисних екранів.

Розрахунок сил та засобів виконується КГП на основі даних табл. 4.4 простим додаванням засобів, необхідних для гасіння об'єктів, позначених знаком «+». Необхідна кількість сил та засобів для гасіння кожного об'єкта розраховується за стандартними методиками розрахунку сил та засобів для гасіння об'єктів, що знаходяться на території підприємств. КГП може скористатися розширеними схемами визначення сил та засобів, призначених для гасіння каскадної пожежі на базовому підприємстві (табл. 4.5).

Блоки  $I_0$  у табл. 4.5 відповідають ситуаціям, коли першим у каскадний процес вступає відповідний об'єкт; стовпець «N» характеризує сили та засоби, необхідні для гасіння кожного об'єкта. Загальна кількість сил та засобів визначається додаванням елементів стовпця «N», для яких відзначено можливість участі у каскадному процесі «+». Ланцюжок «-» показує відсутність каскадного розвитку пожежі.

Таблиця 4.5 – Визначення сил та засобів, необхідних для гасіння каскадної пожежі на підприємстві за наявності захисних екранів

I <sub>0</sub> -1							«N» – сили та засоби
1	+	+	+	+	+	+	5 відділень пожежної охорони
2	+	-	-	-	-	-	6 відділень пожежної охорони
3	-	-	-	-	-	-	
4	-	-	-	-	-	-	
5	-	-	-	-	-	-	
I <sub>0</sub> -2							«N» – сили та засоби
1	+	+	+	-	-	-	5 відділень пожежної охорони
2	+	+	+	+	+	+	6 відділень пожежної охорони
3	-	-	-	-	-	-	
4	+	-	-	-	-	-	4 відділення пожежної охорони
5	-	-	-	-	-	-	
I <sub>0</sub> -3							«N» – сили та засоби
1	-	-	-	-	-	-	
2	-	-	-	-	-	-	
3	+	+	+	+	+	+	1 відділення пожежної охорони
4	-	-	-	-	-	-	
5	-	-	-	-	-	-	
I <sub>0</sub> -4							«N» – сили та засоби
1	-	-	-	-	-	-	
2	+	+	+	+	+	-	6 відділень пожежної охорони
3	+	+	+	+	-	-	1 відділення пожежної охорони
4	+	+	+	+	+	+	4 відділення пожежної охорони
5	+	+	+	-	-	-	6 відділень пожежної охорони
I <sub>0</sub> -5							«N» – сили та засоби
1	-	-	-	-	-	-	
2	+	+	+	-	-	-	6 відділень пожежної охорони
3	+	+	+	+	-	-	1 відділення пожежної охорони
4	+	+	-	-	-	-	4 відділення пожежної охорони
5	+	+	+	+	+	+	6 відділень пожежної охорони
Z <sub>max</sub> /W <sub>0</sub>	1750	2000	2250	2500	2750	3000	

N – кількість відділень на основних пожежних автомобілях;

Z<sub>max</sub>/W<sub>0</sub> – площа захисних екранів, м<sup>2</sup>.

#### 4.9 Оцінка ефективності прогнозування заходів з обмеження каскадного розвитку пожежі на прикладі пожежі на типовому підприємстві

Однією з найбільших пожеж на промислових підприємствах можна назвати пожежу на хімічному заводі в Тулузі 21 вересня 2001 р. Вибухом було повністю зруйновано дві заводські будівлі, довжиною по 100 м (рис. 4.6). Завод «Grand Paroisse» промислової групи «Atofina» спеціалізувався на виробництві аміаку, азотної кислоти, сечовини та її похідних для подальшого виробництва добрив під маркою AZF. На заводі працювало 450 людей. Число жертв вибуху склало 22 особи, було важко поранено близько 100 осіб. Усього медична допомога була надана понад 2200 особам, тобто постраждали й люди, які знаходились поза межами території заводу.

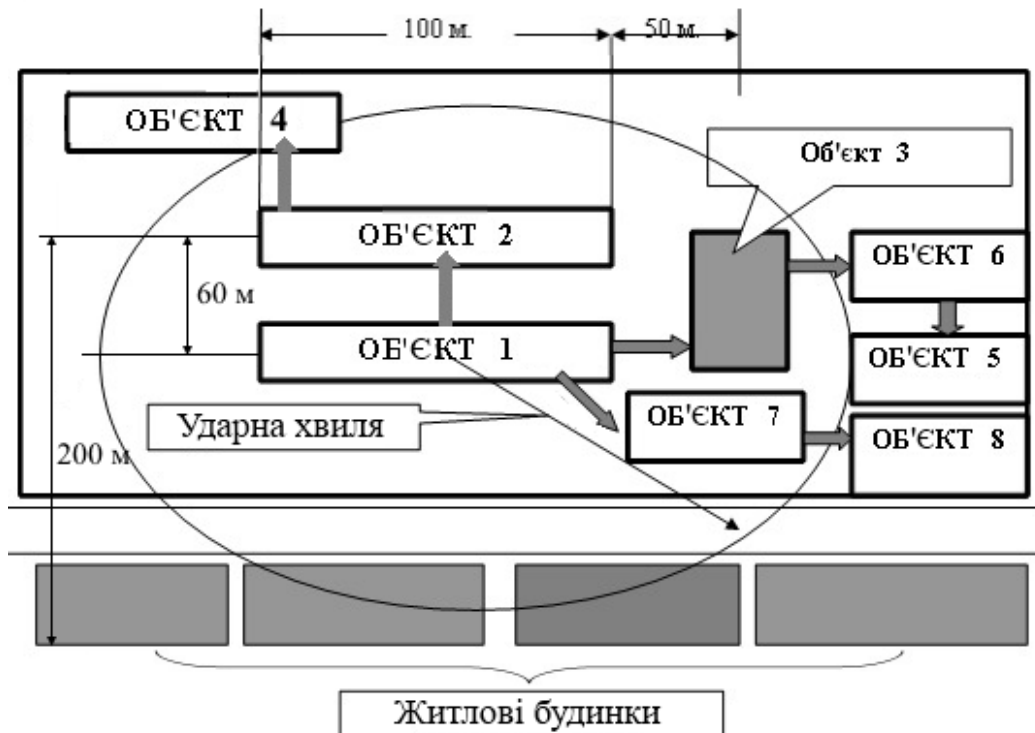


Рис. 4.6 – Взаємний вплив об'єктів у разі каскадної пожежі на підприємстві

На місці вибуху утворилася вирва глибиною 50 м. Під час пожежі виникла паро-газоповітряна хмара, яка містила отруйні гази, тому мешканцям будинків, що знаходяться поблизу, рекомендували щільно зачинити вікна. Вибух стався в одній з повністю зруйнованих будівель (за свідченнями, вибух був один). У каскадному розвитку пожежі брали участь й інші об'єкти на території підприємства, зокрема адміністративні будівлі. Схема підприємства та можливого розвитку пожежі на ній наведена на рис. 4.6.

Виділимо три основні об'єкти, що беруть участь у пожежі:

- об'єкт 1 (будівля), де розпочалася пожежа та мав місце потужний вибух, внаслідок якого будівля була зруйнована;
- об'єкт 2 (будівля), який було зруйновано внаслідок дії ударної хвилі;
- об'єкт 3 – має хімічну небезпеку та був частково зруйнований вибухом.

Для даного промислового підприємства матриця зв'язків між об'єктами матиме вигляд:

$$\Theta(7,7) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

ННВ пожежі приймаємо той, що мав місце під час реальної пожежі (з об'єкта 1). Як цільову функцію приймаємо кількість серйозно постраждалих під час пожежі. Тому необхідно забезпечити захист об'єкта 3 (як хімічно небезпечного із загрозою виникнення надзвичайної ситуації регіонального масштабу). Більш актуально забезпечити захист від впливу ударної хвилі, а не випромінювання (як у разі розглянутої раніше пожежі).

Об'єкти 1 та 2 є найбільшими, тому приймаємо, що на них зосереджено весь персонал, причому порівну. Тоді загальну кількість загиблих і важкопоранених на кожному з них оцінимо як  $(100+22)/2=61$  людина (~60 за кожен об'єкт). Тоді мінімальна кількість тяжко постраждалих матиме місце, якщо у разі ННВ буде захищено об'єкти 2 (персонал підприємства) та 3 (об'єкт, що становить хімічну небезпеку).

Якщо запропоновані заходи будуть вжиті, то кількість постраждалих, у разі ННВ на модельному підприємстві, зменшиться майже удвічі, а матриця зв'язків набуде вигляду:

$$\Theta(7,7) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.46)$$

### Запитання для самостійної перевірки знань

1. Опишіть способи зберігання горючих рідин.
2. Охарактеризуйте типові пожежонебезпечні об'єкти для підприємства з обігом горючих рідин.
3. Охарактеризуйте типові локальні процеси та сценарії каскадної пожежі для підприємства з обігом горючих рідин.
4. З яких елементів складається структурна схема алгоритму розрахунку розвитку каскадного пожежі?
5. Розкрийте основні розрахункові характеристики каскадної пожежі
6. Розкрийте зміст поняття «найбільш пожежонебезпечний об'єкт».
7. Укажіть раціональні параметри захисного екрана.
8. Розкрийте зміст поняття «найбільш небезпечний варіант розвитку пожежі».
9. Опишіть спосіб оцінки сил та засобів для гасіння каскадної пожежі на підприємстві з обігом горючих рідин.

### Література для самопідготовки та поглибленого вивчення розділу:

7, 9, 11, 13, 21, 23, 25, 41, 44, 46, 50, 51, 59, 60, 61, 62, 63, 71, 72, 74.

## РОЗДІЛ 5. ОСНОВИ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ ГОРЮЧИХ РІДИН

Одним з основних завдань цивільного захисту є попередження пожеж, що забезпечується виконанням таких глобальних заходів: 1) запобіганням виникненню пожежі (виконання умов безпечного використання горючих речовин) шляхом виключення можливості виникнення горючого середовища або шляхом виключення можливості виникнення джерел запалювання в горючому середовищі; 2) використанням заходів протипожежного захисту; 3) реалізацією організаційно-технічних заходів.

*Запобігання виникненню горючого середовища* досягається шляхом підтримання концентрацій горючої речовини, кисню або флегматизатора (негорючого газу або інгібітора) в повітряному просторі апаратів у безпечних межах та дотриманням безпечних температур експлуатації й зберігання. Ступінь небезпеки фактичної концентрації й температури рідини визначають шляхом їх порівняння з концентраційними межами поширення полум'я (КМПП), мінімальним вибухонебезпечним вмістом кисню, температурними межами поширення полум'я (ТМПП), температурою спалаху.

*Запобігання запалюванню горючого середовища* буде досягнуто, якщо температура поверхні нагрітого тіла буде меншою за максимальну безпечну (для неможливості самоспалахування), енергія електричного розряду буде меншою за максимальний безпечний рівень (для неможливості вимушеного запалювання), температура середовища буде меншою, ніж температура самонагрівання (для неможливості самозаймання куп матеріалів).

Але системи запобігання пожеж не завжди спрацьовують. Це пов'язано як з людським фактором, так і з об'єктивними випадковими обставинами. Частими причинами пожеж є порушення правил техніки безпеки та зношеність обладнання.

Виникнення пожежі потребує оперативного втручання пожежних підрозділів, яке полягає в організації пожежогасіння та захисті сусідніх об'єктів від поширення пожежі (система заходів із запобігання виникнення пожежі на сусідній ділянці з тією, що горить).

### 5.1 Загальні поняття про гасіння пожеж

Загасити пожежу – це означає припинити процес горіння в усіх його проявах, тобто створити в зоні реакції умови, що виключають можливість швидкого хімічного перетворення, виділення та накопичення тепла. Відповідно до *теплової теорії погасання* – припинення горіння відбудеться, якщо тепловиділення в зоні хімічної реакції стане меншим від теплових втрат від системи в навколишній простір.

*Інтенсивність виділення тепла* у фронті полум'я залежить від виду горючої речовини, концентрації реагуючих компонентів і температури полум'я згідно з рівнянням:

$$q(+)=Q_{\text{н}}V_{\text{гс}}\varphi_{\text{гр}}^m\varphi_{\text{ок}}^n k_0 \exp\left(-\frac{E_{\text{акт}}}{RT}\right),$$

де  $Q_{\text{н}}$  – нижча теплота згоряння горючої речовини;  $\varphi_{\text{гр}}$ ,  $\varphi_{\text{ок}}$  – концентрації горючої речовини та окисника;  $m$ ,  $n$  – відповідні стехіометричні коефіцієнти у реакції горіння;  $k_0$  – константа швидкості хімічної реакції;  $E_{\text{акт}}$  – енергія активації;  $R$  – універсальна газова стала;  $T$  – температура системи.

За температур, більших за температуру самоспалахування, поступово відбувається зниження концентрації реагентів унаслідок їх вигорання. Тому швидкість хімічної реакції та інтенсивність тепловиділення за температури горіння збільшується не до нескінченності, а наближаються до деякого максимального значення і функція  $q(+)=f(T)$  має точку перегину (рис. 5.1).

Інтенсивність тепловтрат від полум'я визначається передачею тепла конвекцією та випромінюванням:

$$q(-)=\alpha_{\text{к}}S_{\text{тв}}(T_{\text{гор}}-T_0)+\sigma\cdot\varepsilon\cdot S_{\text{тв}}(T_{\text{гор}}^4-T_0^4),$$

де  $\sigma$  – стала Больцмана;  $\alpha_{\text{к}}$  – коефіцієнт теплопередачі конвекцією;  $S_{\text{тв}}$  – площа поверхні тепловіддачі;  $\varepsilon$  – ступінь чорноти полум'я;  $T_{\text{гор}}$  – температура у фронті полум'я;  $T_0$  – температура навколишнього середовища.

Зниження температури системи відбувається, якщо в зоні горіння тепла виділяється менше, ніж віддається в

навколишній простір. Протікання швидкої реакції окиснення за низьких температур стає неможливим і горіння припиняється. Температуру зони реакції, нижче якої горіння стає неможливим, називають *температурою погасання*. За умови зниження з будь-якої причини температури у зоні реакції нижче за температуру погасання, горіння припиняється навіть за наявності горючої речовини та окисника, оскільки зона реакції перестає бути постійно діючим джерелом запалювання для вихідної горючої суміші.

Співвідношення між інтенсивністю тепловиділення в системі  $q(+)$  та інтенсивністю тепловіддачі від зони горіння  $q(-)$  під час нестійкого горіння за температури погасання можна навести у вигляді графіка (рис. 5.1).

Припинення горіння в системі відбудеться за умови зниження температури в зоні горіння на критичну величину  $\Delta T$ . Тоді момент погасання визначається умовою:  $T_{\text{пог}}=T_{\text{ад}}-\Delta T$ . Мінімальне необхідне зниження температури зони горіння  $\Delta T$  для досягнення ефекту погасання відрізняється для дифузійного та кінетичного режимів горіння та становить:

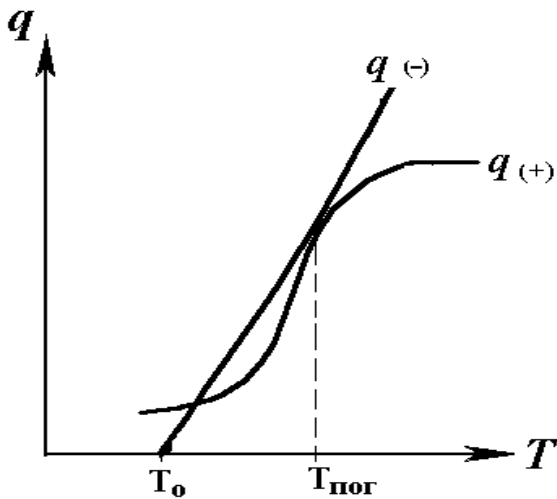


Рис. 5.1 – Критичні теплові умови припинення горіння



для дифузійного полум'я: 
$$\Delta T = \frac{3RT_{ад}^2}{E_{акт}}, \quad (5.1)$$

для кінетичного полум'я: 
$$\Delta T = \frac{RT_{ад}^2}{E_{акт}}, \quad (5.2)$$

де  $T_{ад}$  – адіабатична температура горіння;  $E_{акт}$  – енергія активації реакції горіння для даної горючої речовини;  $R$  – універсальна газова стала.

На практиці для припинення горіння (тобто для зниження температури зони горіння до температури погасання) використовують різні методи, способи і прийоми пожежогасіння.

Порушення теплової рівноваги у зоні горіння можна здійснити за рахунок трьох методів: 1) зниження інтенсивності тепловиділення в зоні реакції; 2) підвищення інтенсивності тепловіддачі від системи в навколишній простір; 3) одночасного зниження інтенсивності тепловиділення і підвищення інтенсивності тепловіддачі. Якщо внаслідок дії будь-яких з цих методів температура у зоні реакції знизиться до критичного значення (до температури погасання), то відбудеться припинення горіння.

Для реалізації цих методів припинення горіння використовують певні *способи пожежогасіння*:

- зниження концентрацій реагентів за рахунок обмеження або повного припинення надходження окисника або горючої речовини у зону горіння, а також шляхом додавання в систему негорючих компонентів;
- збільшення енергії активації горючої системи введенням інгібіторів;
- зниження температури середовища біля зони горіння шляхом використання речовин, що мають низьку початкову температуру, високу теплоємність або теплоту фазового переходу;
- збільшення коефіцієнту тепловіддачі шляхом збільшення швидкості припливу холодного компонента горючої суміші в зону горіння (зривання полум'я) або підвищення ступеня чорноти полум'я (введення в зону горіння спеціальних добавок з більшою здатністю до випромінювання);
- збільшення площі тепловіддачі шляхом застосування спеціальних пристроїв, вогнеперешкоджувачів або внесення в зону горіння вогнегасних речовин з великою теплоємністю та розвиненою поверхнею.

Способи пожежогасіння реалізують із використанням певних тактичних прийомів припинення горіння:

1. *Охолодження*: а) зони горіння до температури, меншої за температуру погасання (наприклад – розпиленою водою); б) поверхні конденсованої горючої речовини до температури, меншої за критичну (для рідин – до температури спалаху, для твердих горючих матеріалів – до температури піролізу, наприклад, твердим діоксидом карбону).

2. *Розбавлення*: зони горіння, повітря або горючої речовини негорючими розріджувачами (наприклад, азотом); горючих рідин взаєморозчинними

негорючими домішками (наприклад, спиртів водою).

3. *Ізоляція*: а) ізоляція горючої речовини від зони горіння (наприклад, покриття піною горючої рідини); б) ізоляція окисника від зони горіння (наприклад, накривання невеликої зони горіння негорючим покривалом); в) ізоляція зони горіння як джерела запалювання від горючої суміші (наприклад, гасіння вибухом факела газового фонтана).

4. *Хімічне гальмування реакції горіння*: використання речовин, які *інгібують* ланцюгову реакцію горіння: хладони, порошки загального призначення, вогнегасні аерозолі.

*Охолоджувати* можна зону горіння розпиленою водою або поверхню речовин компактним струменем води. Охолодження водою або твердою вуглекислотою частіше використовують для гасіння пожеж класу А.

*Розбавляти* можна негорючим газом зону горіння або пароповітряний простір апарата, а також горючі рідини негорючими (наприклад, спирти водою). Розбавлення негорючими газами повітряного простору приміщення на першій стадії пожеж класів А, В, С та електроустаткування під напругою в деяких країнах є головним прийомом пожежогасіння.

*Ізоляція* досягається завдяки усуненню однієї з умов, необхідних для горіння. Піною під час горіння рідин ізолюють (відокремлюють) пару від надходження до зони горіння. Негорючою ковдрою ізолюють окисник від зони горіння. Ізоляція піною є головним прийомом гасіння пожеж класу В. Ізоляція порошками спеціального призначення є головним способом гасіння пожеж класів D (метали) та A1 у режимі гетерогенного горіння (тління).

*Інгібування* – це гальмування хімічної реакції горіння за рахунок введення в зону горіння інгібіторів, які збільшують енергетичні витрати на початок хімічної реакції. Для цього використовують хладони, порошки загального призначення, вогнегасні аерозолі.

Поняття способу пожежогасіння містить у собі не тільки механізм припинення горіння, а й тактичні *особливості подачі вогнегасної речовини* в зону горіння. Розрізняють *об'ємний і поверхневий способи гасіння*.

У разі пожежі в огороженні з обмеженим повітрообміном можна використовувати *спосіб об'ємного гасіння*, за якого вогнегасні засоби подають всередину об'єму, що захищається, і при цьому вони розбавляють горюче середовище або витісняють повітря із приміщення або апарата.

Для гасіння пожежі на відкритому просторі застосування вогнегасних засобів об'ємного гасіння є малоефективним, тому в цьому випадку використовують переважно *поверхневий спосіб гасіння*, коли вогнегасний засіб подають на поверхню горючого матеріалу. Це можливо тільки в тому випадку, коли горюча речовина перебуває в конденсованому стані.

*Засіб пожежогасіння* – це речовини або пристрої, які використовують для припинення горіння під час пожежі. Основними засобами гасіння пожеж є вогнегасні речовини. Технічними засобами пожежогасіння можуть бути рукав, ствол тощо.

Під *вогнегасними речовинами* розуміють такі речовини, які можуть безпосередньо впливати на процес горіння та створювати умови для його припинення або запобігати процесу виникнення горіння.

Під час подавання вогнегасних речовин у зону горіння вони, як правило, здійснюють комбінований вплив: охолоджують зону реакції, розбавляють горючу суміш, частково ізолюють компоненти горючої суміші від зони горіння та, в деяких випадках, навіть безпосередньо впливають на швидкість хімічної реакції між компонентами. Але при цьому одна з цих дій переважає усі інші. *За домінуючим впливом*, який створює вогнегасна речовина на горючу систему у процесі припинення горіння, всі вогнегасні речовини умовно поділяють на чотири класи: *вогнегасні речовини, що розбавляють, ізолюють, охолоджують та інгібують*.

Вибір вогнегасної речовини залежить від типу пожежі та визначається:

- властивостями та агрегатним станом речовини, яка горить;
- параметрами пожежі (площею пожежі, температурою горіння тощо);
- умовами тепло- та газообміну під час пожежі (в огороженні або на відкритому просторі);
- наявністю та запасами вогнегасних речовин;
- ефективністю даного способу гасіння пожежі.

Визначальним чинником вибору вогнегасної речовини (ВР) є клас пожежі (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Принцип вибору вогнегасної речовини за класом пожежі

Клас пожежі	Режим горіння	Тип ВР	Ефективна ВР	Заборона застосування або відсутність дії ВР
А	ГМ, ГТ*	усі	вода, водні розчини	реагують у зоні гасіння
В	ГМ	усі	піни, піноскло із іншим засобом	компактний струмінь води не подають на поверхню водонерозчинних рідин
С	ГМ	розбавлення, інгібування, ізоляція	зрив факела; у приміщенні – флегматизація	піни, порошки спеціального призначення
Д	ГМ, ГТ	ізоляція, негорючий газ – аргон	порошки спеціального призначення	азот, вода, СО <sub>2</sub> реагують у зоні гасіння з металами або розкладаються
Електр. напруга	ГМ, ГТ	усі, крім водовмісних	порошки, негорючі газ, твердий СО <sub>2</sub>	вода, водні розчини, піни

\* ГМ - гомогенне горіння; ГТ - гетерогенне горіння.

Для визначення показників роботи підрозділів під час гасіння пожежі, вибору вогнегасної речовини, вирішального напрямку, прийомів і способів подачі вогнегасної речовини використовують *параметри пожежогогасіння*. Такими показниками є час гасіння, вогнегасна ефективність та інтенсивність

подачі вогнегасної речовини, питома витрата та загальна витрата вогнегасної речовини. Усі параметри пожежогасіння взаємопов'язані між собою.

*Час гасіння*  $\tau_{\text{гас}}$  – час від початку подачі вогнегасної речовини до припинення горіння.

*Ефективність застосування вогнегасного засобу*  $E$  – величина, обернено пропорційна часу гасіння або найменшій концентрації вогнегасної речовини, за якої процес горіння припиняється:

$$E = \frac{1}{\tau_{\text{гас}}} \quad \text{або} \quad E = \frac{1}{\Phi_{\text{вог}}}. \quad (5.3)$$

Менша концентрація речовини, за якої досягається припинення горіння, говорить про її більшу ефективність. Для речовин з меншою вогнегасною ефективністю є властивим більший час гасіння і загальні витрати речовини.

*Загальна кількість*  $m$  – кількість вогнегасної речовини, яку подають за час гасіння пожежі або на загальну площу пожежі, або в об'єм приміщення.

*Загальна витрата*  $G$  – кількість вогнегасної речовини, яку витрачено під час гасіння пожежі на одиницю розрахункового параметра пожежі:

$$G = \frac{m}{\Pi_{\text{пож}}}, \quad (5.4)$$

де  $\Pi_{\text{пож}}$  – величина параметра пожежі (периметр або площа пожежі, об'єм приміщення, що захищається).

*Питома витрата*  $g$  – кількість вогнегасного засобу, яку витрачають за одиницю часу на гасіння пожежі:

$$g = \frac{m}{\tau_{\text{гас}}}. \quad (5.5)$$

*Інтенсивність подачі*  $I$  – кількість вогнегасного засобу, яку подають за одиницю часу на одиницю розрахункового параметра пожежі:

$$I = \frac{m}{\Pi_{\text{пож}} \tau_{\text{гас}}}. \quad (5.6)$$

З урахуванням співвідношень (5.4) та (5.5) інтенсивність подачі вогнегасного засобу можна визначити через витрату:

$$I = \frac{G}{\tau_{\text{гас}}} \quad \text{або} \quad I = \frac{g}{\Pi_{\text{пож}}} \quad (5.7)$$

$$G = I \cdot \tau_{\text{гас}} \quad \text{або} \quad g = I \cdot \Pi_{\text{пож}}. \quad (5.8)$$

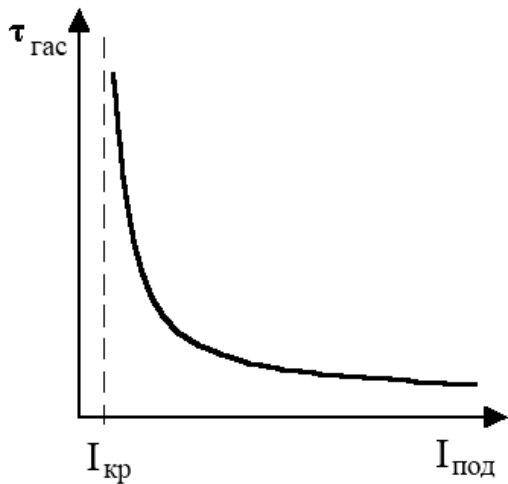


Рис. 5.2 – Зміна часу гасіння від інтенсивності подавання вогнегасного засобу

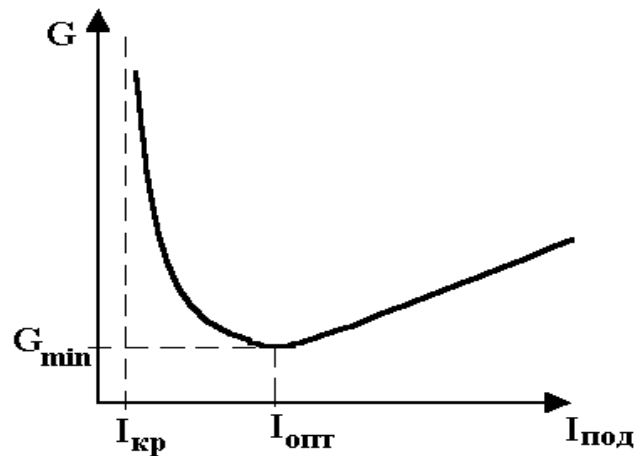


Рис. 5.3 – Зміна загальної витрати вогнегасного засобу від інтенсивності його подавання

Витрата вогнегасного засобу залежить від часу гасіння та інтенсивності його подачі (рис. 5.2). За малої інтенсивності подавання час гасіння збільшується; за більшої – зменшується. Існує така мала, *критична інтенсивність подачі* – за якої гасіння вже не відбудеться, а час гасіння наближається до нескінченності.

Більш складний характер має зміна загальної витрати вогнегасної речовини від інтенсивності її подавання (рис.5.3). Встановлення такої залежності необхідне для визначення найбільш ефективного режиму подавання будь-якої вогнегасної речовини.

Дані рис. 5.2 та 5.3 показують, що за критичної інтенсивності подавання час гасіння, а тому і витрата вогнегасної речовини прагнуть до нескінченності (гасіння неможливе). Збільшення інтенсивності подавання спочатку істотно зменшує час гасіння та витрату. За значного збільшення інтенсивності подавання вогнегасної речовини час гасіння перестає суттєво зменшуватися, а загальна витрата починає зростати, оскільки надлишок вогнегасної речовини вже не бере участі у процесі гасіння. Тобто існує *оптимальна інтенсивність* подачі вогнегасного засобу та відповідний час гасіння пожежі, за яких витрата вогнегасної речовини буде мінімальною. Для різних видів вогнегасних засобів характер зміни питомої витрати від інтенсивності подачі зберігає подібну залежність.

Інтенсивність подачі вогнегасного засобу можна визначити виходячи з теоретичного аналізу умов припинення горіння, за даними модельних досліджень та шляхом аналізу гасіння реальних пожеж. Інтенсивність подачі вогнегасного засобу, отриману під час розрахункового врахування теоретичних умов припинення горіння, називають *теоретичною*. На основі вивчення даних стосовно гасіння реальних пожеж отримано узагальнені значення інтенсивності подачі вогнегасної речовини, які зведені в таблицях

нормативних документів і довідників (наприклад, у «Довіднику керівника гасіння пожежі»). Таку інтенсивність подачі вогнегасної речовини називають *нормативною*.

Відношення теоретичної інтенсивності подачі вогнегасної речовини до нормативної (або до фактичної інтенсивності подачі) називають *коефіцієнтом використання*:

$$K_{\text{вик}} = \frac{I_{\text{теор}}}{I_{\text{норм}}} . \quad (5.9)$$

На практиці коефіцієнт використання можна визначити як відношення маси вогнегасної речовини, що бере участь у гасінні, до маси вогнегасної речовини, яку подано на гасіння:

$$K_{\text{вик}} = \frac{M_{\text{под}} - M_{\text{втр}}}{M_{\text{под}}} , \quad (5.10)$$

де  $M_{\text{под}}$ ,  $M_{\text{втр}}$  – маси вогнегасної речовини, що подана на гасіння та втрачена під час гасіння.

Для успішного гасіння пожежі необхідно правильно розрахувати оптимальну інтенсивність подачі вогнегасної речовини  $I$ ; при цьому загальна витрата вогнегасної речовини  $G$  повинна бути мінімальною, а час гасіння  $\tau$  – не більшим за допустимий.

## **5.2 Гасіння пожеж рідин розбавляючими вогнегасними засобами**

Припинення горіння шляхом введення в зону реакції (у полум'я) негорючих речовин є одним із найбільш ефективних способів гасіння. Негорючі гази широко застосовуються під час гасіння пожеж у приміщеннях або для запобігання пожежам в апаратах за рахунок витискання повітря. Однак на відкритому просторі виникають інтенсивні втрати негорючого газу та його змішування з повітрям, що робить таке гасіння неефективним.

Розбавляти можна газову фазу приміщень або апаратів негорючими газами або горючі рідини – негорючими. У результаті знижується інтенсивність горіння та існує концентрація негорючого розріджувача, яка за цих умов перетворює систему на негорючу.

Вогнегасні речовини, що розбавляють, у разі введення в горючу систему знижують концентрації компонентів горючої суміші. Це призводить до зниження швидкості реакції окиснення в зоні горіння, що, у свою чергу, зменшує інтенсивність тепловиділення і температуру в зоні реакції. Крім того, під час введення негорючих газів у систему відбувається втрата частини тепла, що виділяється, на нагрівання самих розріджувачів від початкової

температури до температури зони горіння. Тобто чим більшою є теплоємність негорючого газу, тим більшою є його вогнегасна ефективність. За певної концентрації розріджувача температура в зоні горіння зменшиться до температури погасання, що веде до припинення горіння.

Запобігання утворенню горючого середовища в газовому просторі за допомогою газів-розріджувачів називають *флегматизацією*. Флегматизацію широко використовують для забезпечення безаварійної роботи технологічного обладнання, а також під час пуску і зупинки обладнання, в якому можуть утворюватися вибухонебезпечні концентрації горючих речовин. Тобто якщо в апараті над поверхнею рідини створити флегматизуючу концентрацію негорючого газу, то дія на таку повітряну систему джерела запалювання не спричинить ініціювання горіння.

У разі введення в газоповітряну суміш газів-флегматизаторів область запалювання звужується: нижня концентраційна межа поширення полум'я зростає, а верхня – зменшується. За критичної кількості флегматизатора верхня і нижня межі сходяться, утворюючи точку флегматизації, яка відповідає *флегматизуючій концентрації негорючого газу* (рис. 5.4).

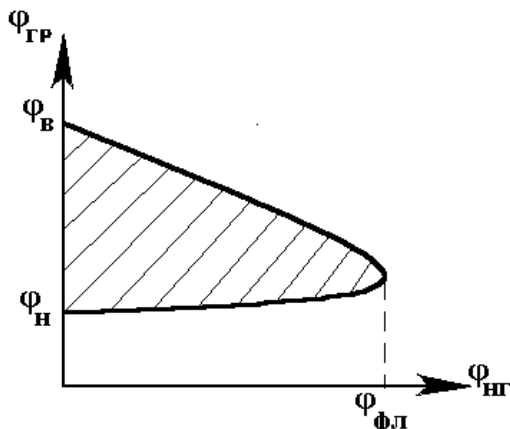


Рис. 5.4 – Область займання суміші «горюча речовина–окисник–негорючий газ» залежно від концентрації негорючого газу

*Флегматизуюча концентрація* – це найменша концентрація негорючого газу в суміші з горючою газоподібною речовиною й окисником, за якої суміш стає нездатною до поширення полум'я за будь-якого співвідношення між горючою речовиною та окисником.

Флегматизуючу концентрацію газових засобів пожежогасіння можна визначити за формулою:

$$\varphi_{\text{фл}} = \frac{100 \cdot F}{F + \gamma \left( 1 + \frac{\varphi_{\text{O}_2}}{100\beta_{\text{CO}}} \right)}, \% \quad (5.11)$$

де  $\varphi_{\text{O}_2}$  – концентрація кисню в окислювальному середовищі, %;  $\beta_{\text{CO}}$  – стехіометричний коефіцієнт для кисню у реакції згоряння горючої речовини до  $\text{CO}$  та  $\text{H}_2\text{O}$  ( $\beta_{\text{CO}} = 0,5 n_{\text{C}} + 0,25 n_{\text{H}} - 0,5 n_{\text{O}}$ , де  $n_{\text{C}}$ ,  $n_{\text{H}}$ ,  $n_{\text{O}}$  – число атомів С, Н, О в молекулі горючої речовини);  $F$  – безрозмірна функція:

$$F = \frac{\varphi_{\text{O}_2}}{100\beta_{\text{CO}}} \left( h_{\text{f}} \Delta H_{\text{f}}^{\circ} + \sum_j h_j n_j \right) - 1, \quad (5.12)$$

де  $\Delta H_{\text{f}}^{\circ}$  – теплота утворення горючої речовини,  $\text{kJ} \cdot \text{моль}^{-1}$ ;  $h_{\text{f}}$  – коефіцієнт теплоти утворення горючої речовини,  $h_{\text{f}} = 2,58 \cdot 10^{-2} \text{ моль} \cdot \text{kJ}^{-1}$ ;  $j$  – тип атома

в молекулі горючої речовини;  $h_j$  – коефіцієнт  $j$ -го типу атома в молекулі горючої речовини ( $h_C = 2,373$ ;  $h_H = 2,757$ ;  $h_O = -0,522$ ;  $h_N = -0,494$ );  $n_j$  – число атомів  $j$ -го типу в горючій речовині;  $\gamma$  – емпіричний параметр (табл. 5.2):

Таблиця 5.2 – Параметр  $\gamma$  формули (5.11)

Флегматизатор	$\gamma$	Флегматизатор	$\gamma$	Флегматизатор	$\gamma$
$N_2$	1,0	$CHF_2Cl$	3,3	$C_2F_4Cl_2$	6,0
$H_2O$	1,2	$SF_6$	3,9	$C_2F_5Cl$	6,0
$CO_2$ ; $CHF_3$	1,6	$CFC_3$	4,0	$C_3F_8$	6,1
$CF_4$	2,4	$C_4F_{10}$	4,3	$CF_3I$	15,5
$C_2HF_5$	2,5	$CF_2Cl_2$	4,5	$CF_3Br$	16,2
$C_4F_8$	2,7	$CCl_4$	4,8	$C_2F_4Br_2$	21,3
$C_3HF_7$	3,0	$C_2F_5I$ ; $C_2F_3Cl_3$	5,6		

Концентрацію горючої речовини у суміші, склад якої відповідає точці флегматизації, розраховують за формулою:

$$\varphi_{ГР_{фл}} = \frac{100 - \varphi_{фл}}{1 + \frac{100\beta_{CO}}{\varphi_{O_2}}}, \% \quad (5.13)$$

У результаті флегматизації концентрація кисню у системі зменшується та досягає критичного значення, *мінімальної вибухонебезпечної концентрації кисню*, яка для суміші «горюча речовина–окисник–флегматизатор» становить:

$$\varphi_{МВКК} = \varphi_{O_2}(100 - \varphi_{фл} - \varphi_{ГР_{фл}})/100, \% \quad (5.14)$$

Для найбільш поширених газів-розріджувачів, таких як азот, водяна пара або оксид карбону (IV), флегматизуючу концентрацію в повітряному середовищі можна розрахувати за формулою:

$$\varphi_{фл} = 100 \frac{h_f \Delta H_f^0 + h'_ф + \sum_j h'_j m_j}{h''_ф - 1 + \sum_j h''_j m_j}, \% \quad (5.15)$$

де  $\Delta H_f^0$  – теплота утворення горючої речовини,  $kJ \cdot mol^{-1}$ ;  $h_f$  – коефіцієнт теплоти утворення,  $mol \cdot kJ^{-1}$ ;  $j$ ,  $m_j$  – атом та його кількість в молекулі горючої речовини;  $h'_ф$  та  $h''_ф$  – коефіцієнти для даного флегматизатора;  $h'_j$  та  $h''_j$  – коефіцієнти для  $j$ -го типу атома для даного флегматизатора (табл. 5.3).



Таблиця 5.3 – Коефіцієнти формули (5.15) для визначення флегматизуючої концентрації негорючих газів

Коефіцієнти	Значення коефіцієнтів у разі розбавлення суміші		
	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O (пар)	CO <sub>2</sub>
h <sub>f</sub>	0,865·10 <sup>-2</sup>	0,802·10 <sup>-2</sup>	0,736·10 <sup>-2</sup>
h' <sub>ф</sub>	1,256	0,780	0,584
h' <sub>с</sub>	2,528	1,651	1,292
h' <sub>н</sub>	0,759	0,527	0,427
h' <sub>о</sub>	0,197	0,446	0,570
h' <sub>н</sub>	-0,151	-0,147	-0,133
h'' <sub>ф</sub>	2,800	2,236	2,020
h'' <sub>с</sub>	5,946	5,000	4,642
h'' <sub>н</sub>	1,486	1,250	1,160
h'' <sub>о</sub>	-2,973	-2,500	-2,321

Якщо флегматизують паро- або газоповітряну суміш кількох горючих речовин, то замість значень ΔH<sub>f</sub><sup>o</sup> та m<sub>j</sub> використовують середню теплоту утворення горючих складових суміші та кількість атомів даного типу.

За стандартних умов (t<sub>o</sub> = 25 °С, P<sub>o</sub> = 101,3 кПа, відносна вологість повітря – 70 %) формулу (5.14) можна навести у вигляді:

$$\varphi_{\text{МВКК}} = \frac{100 - \varphi_{\text{фл}}}{4,86}, \%. \quad (5.16)$$

Водночас зміна зовнішніх умов (збільшення потужності джерела запалювання, підвищення температури або тиску в системі) призводить до зниження мінімальної вибухонебезпечної концентрації кисню, тому для забезпечення гарантованих умов пожежовибухобезпеки розраховують *безпечну концентрацію кисню*:

$$\varphi_{\text{флбезп}} = 1,2 \cdot \varphi_{\text{МВКК}} - 4,2, \%. \quad (5.17)$$

Чим більш ефективним є негорючий газ (має велику питому теплоємність та низький коефіцієнт теплопровідності), тим менше значення має його флегматизуюча концентрація, а тому навіть за більш високого вмісту кисню у системі не може виникнути горіння.

Об'ємну флегматизуючу концентрацію негорючого газу можна перерахувати в масову за формулою:

$$\varphi'_{\text{фл}} = \frac{\varphi_{\text{фл}}}{100} \cdot \frac{\mu_{\text{нГ}}}{V_{\mu}}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}, \text{ або } \varphi'_{\text{фл}} = 10 \varphi_{\text{фл}} \frac{\mu_{\text{нГ}}}{V_{\mu}}, \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (5.18)$$

де μ – молярна маса газу-флегматизатора; V<sub>μ</sub> – об'єм, який займає моль газу за даних умов.

### *Розрахунок параметрів флегматизації негорючим газом*

1. Визначити стандартну теплоту утворення горючої речовини  $\Delta H_f^\circ$  за довідниками або таблицею 1 додатків.
2. Визначити кількість атомів  $j$ -го типу в молекулі горючої речовини та значення коефіцієнтів  $\beta_{CO}$  та  $\gamma$  за таблицею 5.2 або коефіцієнтів  $h'_f$ ,  $h''_f$ ,  $h_f$ ,  $h'_j$ ,  $h''_j$  за таблицею 5.3.
3. Розрахувати об'ємну флегматизуючу концентрацію даного негорючого газу за формулою (5.13) або (5.15).
4. Розрахувати мінімальну вибухонебезпечну концентрацію кисню за формулою (5.14) або (5.16).
5. Розрахувати безпечну концентрацію кисню за формулою (5.17).

### *Приклад розв'язання задачі*

Розрахувати умови, які необхідно створити для запобігання горінню вуглекислим газом ( $CO_2$ ) у паро-повітряному просторі резервуара, в якому зберігається ацетон  $C_3H_6O$ .

### *Розв'язання*

1. За таблицею 1 додатків знаходимо значення молярної теплоти утворення ацетону:  $\Delta H_f = -217,6$  кДж·моль<sup>-1</sup>.
2. Визначаємо кількість атомів  $j$ -го типу в молекулі горючої речовини:  
 $m_C = 3$ ;  $m_H = 6$ ;  $m_O = 1$ .
3. З табл. 5.3 обираємо значення коефіцієнтів  $h_f$ ,  $h'_f$ ,  $h''_f$ ,  $h'_j$ ,  $h''_j$  відповідно до газу-флегматизатора ( $CO_2$ ):  $h_f = 0,736 \cdot 10^{-2}$  моль·кДж<sup>-1</sup>,  $h'_f = 0,584$ ,  $h'_C = 1,292$ ,  $h'_H = 0,427$ ,  $h'_O = 0,570$ ,  $h''_f = 2,020$ ,  $h''_C = 4,642$ ,  $h''_H = 1,160$ ,  $h''_O = -2,321$ .
4. Розраховуємо об'ємну флегматизуючу концентрацію  $CO_2$  за формулою (5.15):

$$\varphi_{фл} = 100 \cdot \frac{0,736 \cdot 10^{-2} (-217,6) + 0,584 + 3 \cdot 1,29 + 6 \cdot 0,427 + 1 \cdot 0,57}{2,02 - 1 + 3 \cdot 4,64 + 6 \cdot 1,16 + 1 \cdot (-2,321)} = 30,6 \%$$

5. Розраховуємо мінімальну вибухонебезпечну концентрацію кисню за формулою (5.16):

$$\varphi_{фл} = (100 - 30,6) / 4,86 = 14,3 \%$$

6. Розраховуємо безпечну концентрацію кисню за формулою (5.17):

$$\varphi_{фл} = 1,2 \cdot 14,3 - 4,2 = 12,9 \%$$

Висновок: для запобігання виникненню горіння в пароповітряному просторі резервуара, в якому зберігається ацетон, необхідно забезпечити флегматизуючу концентрацію вуглекислого газу 30,6 %, що знизить вміст кисню в повітрі до 14,3 %. Для гарантії відсутності запалювання й поширення горіння по парогазовій системі необхідна додаткова подача  $CO_2$  для зниження концентрації кисню в повітряному просторі до 12,9 %.

### 5.3 Гасіння пожеж рідин охолоджуючими вогнегасними засобами

У практиці пожежогасіння найчастіше застосовують припинення горіння з використанням охолоджуючих вогнегасних засобів. Однак найбільш вживаними вони є для пожеж класу «А» (тверді речовини).

Вогнегасною речовиною охолоджуючої дії може бути будь-яка речовина, що відповідає вимогам за високою теплоємністю, великою теплотою фазових переходів, низькою температурою початку фазового переходу і термічною стійкістю в діапазоні температур горіння речовин. Найбільше цим вимогам відповідає вода. Це виправдовує той факт, що майже 90 % усіх пожеж гасять за допомогою води або вогнегасних складів на її основі. Вода є надійним та ефективним засобом для гасіння пожеж, пов'язаних із горінням речовин у всіх агрегатних станах (крім окремих випадків, які будуть перелічені нижче).

Поширеність використання води як вогнегасного засобу визначається її численними перевагами: безпека для природи і людини, доступність і низька вартість, простота зберігання і застосування, легкість транспортування і доставки в зону горіння; термічна стійкість (до 1700 °С), поглинання теплового випромінювання, абсорбційна здатність води під час димоосадження, розведення деяких горючих рідин до негорючого стану, велика теплоємність і теплота випаровування.

Однак практика пожежогасіння свідчить, що ефективність використання води становить 2–10 % (решта води втрачається із зони гасіння). Такий стан пояснюється наявністю у води як вогнегасного засобу недоліків: реакційна здатність, за температур горіння металів вода дисоціює з наступним вибухом, реагує з карбідами з утворенням вибухонебезпечного ацетилену (що під час гасіння спричиняє вибух), електропровідність, мала в'язкість (швидко стікає з поверхонь), високий коефіцієнт поверхневого натягу (вода погано проникає всередину матеріалу крізь мікропори, а під час розпилювання утворює великі краплі), компактний струмінь майже не охолоджує полум'я, висока температура замерзання, псує матеріали (внаслідок ефектів змочування, корозії тощо), має велику густину, тому тоне у більшості нерозчинних з нею горючих рідин (не залишається на поверхні, розподіляється у вигляді крапель в об'ємі або відстоюється на дні резервуара).

Іншим поширеним вогнегасним засобом охолоджуючої дії є твердий діоксид карбону (вуглекислота). Він має, порівняно з водою, деякі переваги і не має багатьох недоліків, тому його використовують у випадках, коли застосування води є неможливим. Переваги CO<sub>2</sub>, порівняно з водою, наступні: не проводить електричний струм; має низьку початкову температуру -78,4 °С; густина CO<sub>2</sub> у вигляді «снігу» є меншою, ніж густина більшості рідин (тому не тоне у них); на відміну від води, повністю переходить у газову фазу; під час фазового переходу не має рідкої фази (сублімує) і тому не змочує матеріалів; газова фаза CO<sub>2</sub> має густину трохи

вищу, ніж у повітря, тому він активно розбавляє зону горіння.

Припинення горіння охолодженням ґрунтується на двох ефектах: зниження температури зони реакції горіння до температури погасання шляхом охолодження полум'я та охолодження поверхні конденсованої горючої речовини (рідкої або твердої) до критичної температури.

### 5.3.1 Гасіння полум'я шляхом охолодження зони горіння

Припинення горіння особливо небезпечних легкозаймистих рідин за рахунок охолодження поверхневого шару рідини до температури меншої за температуру спалаху, за умови подачі вогнегасних засобів з температурою навколишнього середовища, є неможливим (тобто концентрація пари утворюється ще більша, ніж НКМПП). Але ефекту пожежогасіння можна досягти за рахунок охолодження зони горіння розпиленою водою з наступним розбавленням цієї зони парою води, що утворюється при цьому. Успішно гасити розпиленою водою можна тільки рідини, у яких температура спалаху перевищує 100 °С. Розрахунок критичної інтенсивності подачі розпиленої води на гасіння горючих рідин здійснюють за формулою:

$$I_{кр} = 220 \cdot v_m^2 \cdot \sqrt[3]{\frac{v_m \cdot D}{v \cdot \rho_{гр}} \left[ \frac{\rho_{гр} \cdot T_{кип_{гр}}}{\rho_v \cdot (T_{сер} - T_o)} - 2 \right]^{-2}}, \quad (5.19)$$

де  $T_{кип_{гр}}$  – температура кипіння горючої рідини;  $T_o$  – температура води (навколишнього середовища);  $\rho_{гр}$ ,  $\rho_v$  – густини горючої рідини та води;  $v$  – кінематична в'язкість горючої рідини,  $m^2 \cdot s^{-1}$ ;  $v_m$  – масова швидкість вигорання горючої рідини,  $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ;  $D$  – середній розмір крапель розпиленої води, м; (для розпилювача ДП-15  $D=3 \cdot 10^{-3}$  м);  $T_{сер}$  – середня температура поверхневого шару горючої рідини;  $T_{сер} = \frac{T_{кип_{гр}} + T_{сп}}{2}$ ;  $T_{сп}$  – температура спалаху горючої рідини.

Якщо *охолоджують зону горіння* газо- або пароповітряних сумішей, умовою припинення горіння є співвідношення:  $T_{зг} < T_{пог}$ , де  $T_{зг}$  – температура зони горіння, К;  $T_{пог}$  – температура погасання, К. Виконати цю умову можливо, якщо забезпечити певну інтенсивність тепловідведення від зони реакції горіння.

Для вуглеводнів дійсну температуру горіння можна прийняти як 1500 К. Якщо початкова температура горючої системи була 300 К, то це означає, що температура системи підвищилася на 1200 К. На це підвищення температури витрачається близько 60 % теплоти згорання горючої речовини  $Q_H$ , (40 % втрачається в навколишній простір шляхом випромінювання). Температуру погасання вуглеводнів можна прийняти 1300 К, тоді для припинення горіння за рахунок охолодження зони горіння потрібно знизити температуру полум'я на 200 К, для чого необхідно відвести тепла з розрахунку на 1 кг горючої

речовини:

$$Q_{\text{відв}} \approx \frac{200}{1200} 0,6Q'_H = 0,1Q'_H \cdot \text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}, \quad (5.20)$$

тобто необхідно відібрати лише 10 % від тепла, що виділяється у полум'ї.

Гасіння відбудеться, якщо кількість тепла, яка поглинається охолоджуючим вогнегасним засобом у полум'ї або від розжареної поверхні горючої речовини, перевищуватиме кількість тепла, яке необхідно відвести від зони горіння або поверхневого шару матеріалу, що горить:

$$Q_{\text{погл}} \geq Q_{\text{відв}}. \quad (5.21)$$

Питому кількість енергії, що поглинається 1 кг води, можна оцінити, виходячи з того, що вода поглинає тепло в зоні горіння завдяки трьом послідовним процесам – нагрівання до 100 °С, витрати на випаровування, нагрівання до температури полум'я:

$$q_{\text{погл}} = q_{\text{наг}}^{\text{рід}} + \Delta H_{\text{вип}} + q_{\text{наг}}^{\text{пар}}, \text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1},$$

де  $\Delta H_{\text{вип}}$  – теплота випаровування (пароутворення);  $q_{\text{наг}}^{\text{рід}}$  – кількість енергії, що поглинає 1 кг води під час нагрівання від початкової температури до температури кипіння;  $q_{\text{наг}}^{\text{пар}}$  – кількість енергії, що поглинається 1 кг пари води під час нагрівання від температури кипіння до температури зони горіння.

У цьому разі передбачається, що вся вода, що подається на гасіння, потрапляє в полум'я або на поверхню горючих матеріалів, нагрівається до температури кипіння, повністю переходить у пару і нагрівається до температури зони горіння. На практиці такі умови не виконуються через недосконалість техніки подачі та розпилення води, інтенсивне стікання води у вертикального або під кутом положення поверхні, що горить, а також через те, що краплі води встигають випаруватися раніше, ніж нагріються до температури кипіння.

Якщо припустити, що у зону горіння потрапляє не більше, ніж 80 % води, а до температури 80 °С нагрівається близько 90 % цієї кількості, переходить у пару не більше, ніж 75 %, а в зоні горіння залишається і нагрівається до температури зони горіння близько 75 % пари, що утворилася, то питому кількість теплоти, яку поглинає 1 кг води, можна оцінити як:

$$q_{\text{погл}} = 0,7c_p^{\text{рід}}(80 - t_o) + 0,55\Delta H_{\text{вип}} + 0,4c_p^{\text{пар}}(t_{\text{гор}} - 80), \text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}, \quad (5.22)$$

де  $c_p^{\text{рід}}$  – питома масова теплоємність води у рідкому стані, 4,2 кДж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>;  $c_p^{\text{пар}}$  – питома масова теплоємність пари води у діапазоні температур до  $t_{\text{гор}}$ , 1,96 кДж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>.

Якщо врахувати, що густина води дорівнює  $1 \text{ кг}\cdot\text{л}^{-1}$ , теоретичні загальні витрати вогнегасного засобу для припинення горіння можна визначити зі співвідношення:

$$G_{\text{теор}} = \frac{Q_{\text{відв}}}{q_{\text{погл}}}, \text{ л}\cdot\text{кг}^{-1} \text{ або л}\cdot\text{м}^{-3}. \quad (5.23)$$

З урахуванням масової швидкості вигорання горючої речовини теоретично необхідна інтенсивність подачі охолоджуючого вогнегасного засобу на гасіння буде становити:

$$I_{\text{теор}} = \eta \cdot v_m \cdot K_{\text{п}} \cdot G_{\text{теор}}, \text{ л}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}, \quad (5.24)$$

де  $v_m$  – масова швидкість вигорання речовини,  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $K_{\text{п}}$  – коефіцієнт поверхні, що враховує перевищення площі горіння над площею пожежі під час вигорання горючої речовини за рахунок наявності вертикальних і похилих поверхонь (для рідин такого немає, тому  $K_{\text{п}} = 1$ );  $\eta$  – коефіцієнт повноти згорання горючої речовини;  $G_{\text{теор}}$  – теоретична витрата води на гасіння,  $\text{л}\cdot\text{кг}^{-1}$ .

За розрахунком формули (5.22) впливає, що стадія нагрівання води за рахунок її теплоємності визначає близько 10 % від охолоджуючої здатності води, процес випаровування – близько 50 % та нагрів пари до температури зони горіння – близько 40 %. Але пройти усі ці стадії може лише розпилена вода. Вода компактного струменя не встигає випаруватись, тому її ефективність й обмежується 10 %, але у разі подачі теплої води цю ефективність можна підвищити. Крім того, для підвищення вогнегасної ефективності води у воду додають змочувачі (1 % піноутворювача) для більш дрібного розпилення та просочування мікропор твердих речовин, загущувачі – для збільшення дальності компактного струменя та сповільнення стікання води, інгібітори та антифризи.

### 5.3.2 Гасіння шляхом охолодження поверхні конденсованої горючої речовини

Однак охолодити безпосередньо зону горіння, яка під час полум'яного горіння являє собою тонкий рухливий шар газу, досить важко. Тому частіше використовують інший метод гасіння – *охолодження поверхні конденсованої речовини*, що горить, нижче критичної температури. У разі дифузійного горіння рідини надійного ефекту гасіння шляхом охолодження можна досягти у той момент, коли температура поверхневого шару стане меншою за температуру спалаху горючої рідини ( $t_{\text{сп}}$ ), а у разі гасіння твердих горючих матеріалів – меншою за температуру початку піролізу ( $t_{\text{пір}}$ ). При цьому інтенсивність надходження продуктів газифікації (парів або газів розкладання) в зону реакції знизиться, концентрація горючої речовини в

повітрі стане меншою за НКМПП, внаслідок чого полум'яне горіння припиниться.

Для того, щоб під час пожежі охолодити поверхневий шар горючої речовини до критичної температури ( $t_{сп}$  або  $t_{пир}$ ), необхідно відвести не лише те тепло, яке запасено у матеріалі, але й те тепло, яке підводиться протягом гасіння із зони горіння до поверхні речовини, що горить, шляхом випромінювання та конвекції. Ця умова реалізується, якщо буде відведено:

$$Q_{відв} \geq \tau_{гас}(q_{випр} + q_{конв}) + Q_{зап_{пш}}, \text{ кДж}\cdot\text{м}^{-2}, \quad (5.25)$$

де  $Q_{відв}$  – питоме відведення тепла від одиниці площі поверхневого шару горючої речовини,  $\text{кДж}\cdot\text{м}^{-2}$ ;  $\tau_{гас}$  – час гасіння, с;  $q_{випр}$  – інтенсивність променистого теплового потоку від факела полум'я до поверхні горючої речовини,  $\text{кДж}\cdot\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $q_{конв}$  – інтенсивність конвекційного теплового потоку до поверхні горючої речовини,  $\text{кДж}\cdot\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $Q_{зап}$  – питома кількість тепла, накопиченого у прогрітому шарі горючої речовини на одиницю площі його поверхні,  $\text{кДж}\cdot\text{м}^{-2}$ :

$$Q_{зап} = c_{р_{пш}} \rho_{пш} \delta_{пш} (t_s - t_{кр}), \text{ кДж}\cdot\text{м}^{-2}, \quad (5.26)$$

де  $c_{р_{пш}}$  – масова теплоємність поверхневого шару матеріалу,  $\text{кДж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ ;  $\rho_{пш}$  – густина поверхневого шару матеріалу,  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ;  $\delta_{пш}$  – товщина прогрітого шару, м;  $t_{кр}$  – критична температура матеріалу,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_s$  – температура поверхневого шару матеріалу ( $t_{сп}$  або  $t_{пир}$ ),  $^{\circ}\text{C}$ .

Інтенсивність подачі вогнегасної речовини на поверхню, охоплену полум'яним горінням, можна також розрахувати за відомим критерієм гасіння  $K_{гас}$  для даної горючої речовини:

$$I = \frac{K_{гас} \eta v_m Q'_H}{q_{погл}}, \text{ л}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}. \quad (5.27)$$

У процесі охолодження поверхні горючої рідини досягається зниження тиску її парів та інтенсивності випаровування. Залежність тиску пари ( $p$ ) від температури ( $T$ ) для рідин показують рівняння Клаузіуса–Клапейрона й Антуана (1.14 і 1.18).

Під час пожежі поверхня рідини нагрівається від температури навколишнього середовища до температури кипіння, тому потрібно враховувати співвідношення  $dp/dT$  в області температур кипіння. Параметри випаровування й пожежної небезпеки деяких вуглеводневих рідин наведені в табл. 5.4 (температура кипіння ( $t_{кип}$ ), займання ( $t_{зайв}$ ) та самоспалахування ( $t_{сс}$ ), нижня концентраційна межа поширення полум'я (НКМПП), теплота випаровування ( $\Delta H_{вип}$ )).

Таблиця 5.4 – Параметри випаровування та пожежної небезпеки деяких вуглеводневих рідин ряду алканів

Речовина	$t_{\text{кип}},$ °C	$\Delta H_{\text{вип}},$ кДж/моль	$dp/dT,$ Па/К	НКМПП, об.%,	$t_{\text{займ}},$ °C	$t_{\text{сс}},$ °C	$t_{\text{кип}} - t_{\text{займ}},$ °C
пентан	36	26,9	3890	1,47	-34	286	70
гексан	69	31,6	4100	1,24	-23*	233	92
октан	125	41,4	4600	0,9	19	215	106
декан	174	49,7	4700	0,70	66	230	108
додекан	216	61,3	4800	0,68	103	202	113

\* – температура спалаху.

Для припинення процесу горіння рідини методом охолодження її поверхню необхідно охолодити до температури, яка є нижчою за температуру займання, для наведених рідин – на 70–113 °C.

Також важливо, що температура займання багатьох ЛЗР є меншою за типові температури навколишнього середовища за стандартних і навіть нормальних умов. Це означає, що подача охолоджуючого засобу з температурою навколишнього середовища навіть теоретично не надає можливості досягти гасіння цих рідин.

Наприклад, декан та додекан для припинення горіння необхідно охолодити до температур 66 °C та 103 °C відповідно. Тобто необхідно здійснити зниження температури поверхневого шару рідини (що має температуру кипіння) на 108 °C та 113 °C. Якщо охолоджуючою вогнегасною речовиною є вода, то, з урахуванням її теплоємності (без урахування теплоти випаровування), можна розрахувати її витрату на гасіння (розпиленням струменем або іншою системою, яка буде тримати воду на поверхні рідини). Тобто необхідно визначити масу води, яка зможе забрати необхідну кількість тепла від поверхневого шару горючої рідини. Теплоємність індивідуальних вуглеводнів та їх технічних сумішей (бензин, гас, дизельне паливо, мазут) змінюється в межах від 2,0 до 2,25 кДж/(кг·К). Якщо прийняти, що маса води і маса розігрітої горючої рідини є однаковими ( $m$ ), а процес теплообміну відбувся до кінця, тобто температури горючої рідини і води вирівнялися ( $T$ ), то охолодження декану з температурою 174 °C водою з температурою 20 °C буде описуватися рівнянням теплового балансу:

$$c_v m(t - 20) = c_d m(174 - t), \quad (5.28)$$

де  $c_v$ ,  $c_d$  – питомі теплоємності води (4,19 кДж/(кг·К)) та декану (2,12 кДж/(кг·К));  $T$  – кінцева усереднена температура декану та води.

Розв'язання співвідношення (5.28) дає значення кінцевої температури декану  $T = 73,8^\circ\text{C}$ , що вище за його температуру займання. Це означає, що однієї теплоємнісної складової води в даному випадку для досягнення погасання декану виявляється недостатньо.



Однак охолоджуюча дія води значною мірою визначається її високою теплою випаровування (тобто процес випаровування води споживає багато енергії та створює значний охолоджуючий ефект). Якщо вода під час контакту з поверхнею декану нагріється до  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  та повністю випарується, то, виходячи з теплового балансу, можна оцінити її масу, достатню для охолодження поверхні до  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$c_v m_v (100 - 20) + m_v \Delta H_{\text{вип}} = c_d m_d (174 - 100), \quad (5.29)$$

де  $\Delta H_{\text{вип}}$  – теплота випаровування води;  $m_d$  – маса декану (в розрахунку прийнято 1 кг).

У межах такого варіанта охолодження поверхні рідини достатньо витрати 60 г води, це ще не дає змоги загасити декан, але вже дає змогу загасити додекан ( $t_{\text{сп}} = 103\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Таким чином, рідини з температурою займання понад  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  можна загасити за рахунок тільки ефекту охолодження шляхом подачі відносно невеликої кількості води. Цей висновок є справедливим для випадку, якщо вся вода, подана на поверхню рідини, візьме участь у її охолодженні. На практиці цього домогтися важко; дрібні краплі води відносяться конвекційними потоками або випаровуються, а великі швидко занурюються в рідину, не встигнувши охолодити поверхневий шар ГР, та створюють небезпеку спінювання. Таким чином, щоб максимально задіяти механізм охолоджуючої дії води, потрібно задіяти спосіб тривалого її утримання в області верхнього прогрітого шару рідини.

Таким чином, гасіння рідин за рахунок охолодження поверхні не досягається, якщо температура вогнегасної речовини перевищує температуру займання горючої рідини; може бути досягнуто, якщо температура вогнегасної речовини є меншою, ніж температура займання горючої рідини; вогнегасна речовина з температурою навколишнього середовища може охолодити елементи конструкції резервуара нижче за температуру самоспалахування горючої рідини. У загальному випадку вогнегасна речовина з температурою навколишнього середовища, яка має забезпечити гасіння як низько-, так і висококиплячих рідин, не може зробити це тільки за рахунок ефекту охолодження. Тому охолоджуюча дія у внеску у вогнегасні властивості засобів пожежогасіння рідин стоїть нижче за значущість, ніж ізолюючі властивості. Водночас для висококиплячих рідин можна досягти припинення горіння тільки за рахунок охолодження її поверхневого шару.

#### *Розрахунок припинення горіння охолоджуючими вогнегасними засобами*

1. Визначити для горючої речовини за довідником «КГП»: масову швидкість вигорання  $v_m$ , температуру горіння  $T_{\text{гор}}$ , нижчу масову теплоту згорання  $Q'_H$ , коефіцієнт повноти згорання речовини  $\eta$ , нормативну інтенсивність подачі вогнегасного засобу на гасіння  $I_H$ .

2. Розрахувати для даних температурних умов питому охолоджуючу здатність води  $Q_{\text{погл}}$  з урахуванням втрат за формулою (5.22).

3. Розрахувати теоретичну загальну витрату води на гасіння методом охолодження полум'я за формулою (5.23).

4. Розрахувати теоретичну інтенсивність подачі води на гасіння:

а) для зони полум'яного горіння – за формулою (5.24);

б) для поверхні конденсованої горючої речовини, що горить, за відомого коефіцієнта гасіння – за формулою (5.27).

5. Розрахувати коефіцієнт використання води за формулою (5.7).

### *Приклад розв'язання задачі*

Розрахувати теоретичну інтенсивність подавання води розпилим струменем на гасіння бутилового спирту методом охолодження зони горіння, якщо початкова температура води дорівнює 25 °С.

#### *Розв'язання*

1. Визначаємо параметри для бутилового спирту за довідником КГП:  $v_m = 0,0135 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ ; температура горіння  $T_{\text{гор.}} = 1000 \text{ °С}$ ; нижча масова теплота згоряння  $Q'_n = 36805 \text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}$ ; коефіцієнт повноти згоряння  $\eta = 0,93$ .

2. Розраховуємо питому теоретичну охолоджуючу здатність води з урахуванням втрат за формулою (5.22):

$$q_{\text{погл}} = 0,7 \cdot 4,19(80 - 25) + 0,55 \cdot 2260 + 0,4 \cdot 1,96(1000 - 80) = 2126 \text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}.$$

3. Розраховуємо теоретичні загальні витрати води на гасіння методом охолодження зони горіння за формулою (5.23):

$$G_{\text{теор}} = 0,1 \cdot 36805 / 2126 = 1,73 \text{ л}\cdot\text{кг}^{-1}.$$

4. Визначаємо теоретичну інтенсивність подачі води, формула (5.24):

$$I_{\text{теор}} = 1 \cdot 0,0135 \cdot 0,93 \cdot 1,73 = 0,022 \text{ л}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}.$$

Висновок: теоретична інтенсивність подачі води у вигляді розпиленого струменя на гасіння бутилового спирту становить  $0,022 \text{ л}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ .

## **5.4 Гасіння пожеж рідин ізолоючими вогнегасними засобами**

Гасіння пожеж ізолоючими засобами ґрунтується на відокремленні від процесу горіння одного (або більше) з компонентів «трикутника горіння»: окисника, горючої речовини або джерела запалювання.

Усі ізолоючі вогнегасні речовини можна прокласифікувати з урахуванням їх первинного агрегатного стану:

1) рідкі (піна, інколи вода);

2) газоподібні (продукти вибуху під час гасіння газонафтових фонтанів ізолоюють зону горіння від горючої речовини);

- 3) тверді листові (азбоцементні листи, покривала з повсті або негорючих тканин);
- 4) тверді сипучі (пісок, вогнегасні порошки спеціального призначення);
- 5) такі, що змінюють стан (покриття, що спучуються, наносяться рідкими, сохнуть, на пожежі переходять у пластичний стан, піняться, тверднуть; гелі наносяться рідкими, стають в'язкими, тверднуть).

*Вогнегасні порошки спеціального призначення* використовують для ізоляції від окисника осередків гетерогенного горіння (тління) та під час гасіння пожеж класу «D». Порошок плавиться і покриває поверхню горючої речовини плівкою, яка не пропускає продуктів газифікації твердої горючої речовини в зону горіння або окисник до зони горіння.

Одним із способів припинення горіння є сповільнення тепловиділення за рахунок зниження концентрацій компонентів горючої суміші в зоні горіння. Цього можна досягти ізоляцією горючої речовини або окисника від зони реакції. Так, для ізоляції від окисника осередків гетерогенного горіння (тління) та під час гасіння пожеж класу D використовують *вогнегасні порошки спеціального призначення*, які знижують (або повністю припиняють) інтенсивність надходження кисню до поверхні, яка горить. Порошки спеціального призначення подають на поверхню гетерогенного горіння, де порошок плавиться та покриває поверхню горючої речовини плівкою, що не пропускає окисник до зони гетерогенного горіння або леткі продукти розкладання до зони полум'яного горіння. Це дає змогу їх використовувати під час гасіння пожеж класу «A» в режимі тління та під час гасіння пожеж класу «D». Розглядають варіанти нанесення таких порошоків на плавучі негорючі системи, що дозволить припинити й полум'яне горіння рідин.

Під час гасіння полум'яного горіння не потрібно намагатися повністю припинити надходження компонентів реакції до зони горіння – достатньо знизити швидкість надходження одного з компонентів до рівня, за якого інтенсивність тепловиділення стане меншою, ніж інтенсивність тепловіддачі в навколишній простір. Наприклад, можна забезпечити, щоб концентрація продуктів газифікації горючої речовини (під час випаровування, сублімації або розкладання) у зоні горіння знизилася нижче нижньої концентраційної межі поширення полум'я. Найчастіше цього досягають гальмуванням проходження горючих газів крізь шар ізолюючої речовини – вогнегасної піни. Домінуючим механізмом вогнегасної дії пін є *ізоляція* горючих парів від зони горіння (поряд з охолоджуючою дією маси піни та розріджуючою дією на полум'я негорючих парів води з розчину).

*Піна* – це колоїдна система плівково-комірчастої структури, що містить газ як дисперсну фазу, яка розподілена в дисперсному середовищі – рідині. При цьому виникає система з бульбашок газу, розділених стінками у вигляді рідинних плівок. Піни є ліофобними дисперсними системами, тому вони є термодинамічно нестійкими.

Вогнегасна здатність піни зумовлена насамперед її здатністю перешкоджати проходженню крізь неї горючої пари в зону горіння. Плівки рідини між бульбашками піни сильно гальмують надходження горючої пари від поверхні конденсованої речовини в зону полум'яного горіння за рахунок того, що коефіцієнт дифузії пари через рідинні плівки піни є значно меншим, ніж у повітрі. Саме ці плівки й виконують ізолюючу роль, а стан піни – це лише спосіб утримати воду на поверхні іншої рідини. Тому для гасіння необхідно забезпечити наявність на поверхні рідини певного шару піни, який забезпечить певну сумарну товщину горизонтальних водяних плівок. При цьому частина розчину не працює на ізоляцію – та, яка знаходиться у вертикальних водяних плівках.

Стійкі піни утворюються у разі додавання у систему «вода–газ» речовин, які мають низький коефіцієнт поверхневого натягу. Такі речовини називають *поверхнево-активними (ПАР)*, вони здатні під час розчинення у воді накопичуватися на поверхні розділу фаз і зменшувати поверхневий натяг розчину залежно від концентрації. ПАР зменшують енергію, необхідну для утворення нових поверхонь розділу, і частково збільшують стійкість плівок, що утворюються. Залежно від типу використовуваного ПАР розрізняють *катіонні, аніонні та неіонні* піноутворювачі. Нині переважно використовують аніонні піноутворювачі.

*Піноутворювачі (ПУ)* є складними розчинами, які містять, крім ПАР, стабілізатори, загусники та інші спеціальні добавки. *Піноутворювач*, за умови змішування з водою у встановлених співвідношеннях, утворює робочий розчин, що дає змогу на спеціальному обладнанні одержувати піну або змочуючий розчин для покращення охолоджуючого ефекту води у разі її подачі на тверді поверхні. *Робочий розчин піноутворювача* забезпечує отримання піни відповідної кратності та вогнегасної здатності у разі використання відповідного обладнання в умовах спеціальних випробувань.

Залежно від поверхнево-активної основи, ПУ поділяють на: *протеїнові* (Р, містять продукти гідролізу білкових речовин, наприклад, крові тварин), *фторпротеїнові, синтетичні-вуглеводневі* (S, отримані внаслідок синтезу), *фторсинтетичні* (АFFF) та *фторпротеїнові плівкоутворюючі* (FFFP), *стійкі до дії полярних рідин* (AR, гасіння спиртів та ін.).

Піноутворювачі, залежно від сфери застосування для гасіння пожеж, поділяють на ПУ *загального та спеціального* (цільового) призначення.

*Піноутворювачі загального призначення* для гасіння пожеж – це піноутворювачі, здатні створювати піну низької, середньої та високої кратності з робочих розчинів, а також змочуючі розчини для гасіння пожеж класів А і В (підкласи А1, А2, В1).

*Піноутворювачі спеціального призначення* для гасіння пожеж – піноутворювачі, здатні утворювати робочі або змочуючі розчини для гасіння пожеж класу А та В (підкласи А1, А2, В1, В2), або придатні до застосування з морською водою як розчинником.

*Плівкоутворюючий піноутворювач спеціального призначення* для гасіння пожеж – піноутворювач, виготовлений на основі фторованих та інших ПАР та здатний утворювати на поверхні горючих рідин плівку з водного розчину ПУ, яка характеризується здатністю до самовідновлення після механічного руйнування та зменшеною швидкістю дифузії парів горючої рідини крізь неї.

За здатністю розкладатися під дією мікрофлори водою та ґрунтів піноутворювачі поділяють на *біологічно «м'які»* (біологічна здатність до розкладання понад 80 %) та *біологічно «жорсткі»* (біологічна здатність до розкладання менше 80 %).

За сучасними технологіями у більшості випадків як газ-наповнювач для піни використовують повітря. Використання замість повітря негорючих газів призводить лише до незначного покращення вогнегасних характеристик піни. Але, разом з цим, стає помітно більш складним процес їх отримання та застосування, а також зростає вартість відповідних засобів пожежогасіння.

*Класифікація вогнегасних піни за способом отримання.*

1. *Хімічну піну* отримують «мокрим» або «сухим» способом. У першому випадку змішують лужний та кислотний розчини, під час реакції виділяється  $\text{CO}_2$ , який спінює розчин ПУ. У другому випадку в піногенераторі з потоком води змішують порошок, який містить лужні, кислотні солі та ПУ; під час реакції виділяється  $\text{CO}_2$ , який спінює розчин піноутворювача. Однак піни в такому випадку мають низьку вогнегасну здатність; при цьому спостерігається велика витрата порошку або розчинів, фасування реагентів у вогнегаснику потребує надійного та герметичного пакування; крім цього, кращі результати досягаються за умови використання теплої води.

2. *Піни, що піняться за умови нагрівання:* на гасіння подають розчин піноутворювача з добавками-пропілентами, які у зоні горіння розкладаються, а гази, що утворюються, спінюють розчин. Перевага такого подавання полягає в тому, що розчин можна подавати на більшу відстань, ніж піну, – у вигляді компактного струменя.

3. *Піни, що швидко тверднуть,* використовують для запобігання виникненню горіння. У розчин піноутворювача додають формальдегідні смоли та затверджувач, які у плівці бульбашки піни утворюють полімер, що швидко застигає та формує тверду плівку.

4. *Повітряно-механічну піну* отримують за допомогою пінних стволів або генераторів піни. У *повітряно-пінних стволах* розчин піноутворювача подають під тиском, а на ділянці спеціальних прорізів у стволі цей потік, завдяки інжекції, захоплює повітря й утворюється полідисперсна піна низької кратності з великою дальністю струменя. У *піногенераторі* розчин піноутворювача видують повітрям крізь сітку. Утворюються бульбашки, які на виході об'єднуються у піну.

*Вогнегасні властивості піни* визначаються її кратністю, дисперсністю, стійкістю та ізолюючою здатністю.

*Кратність піни* – відношення її об’єму  $V_{\text{пін}}$  до об’єму робочого розчину піноутворювача, з якого вона отримана  $V_{\text{розч}}$ :

$$K_{\text{пін}} = \frac{V_{\text{пін}}}{V_{\text{розч}}}. \quad (5.30)$$

Розрізняють піни низької кратності ( $K_{\text{пін}} < 20$ ), середньої ( $K_{\text{пін}} = 2 \div 200$ ) і високої ( $K_{\text{пін}} > 200$ ). Залежно від способу отримання піни, утвореної з одного і того ж розчину, значення її кратності може відрізнятись на кілька порядків. Однак піна навіть за однакової кратності може мати різну структуру, яку характеризують параметрами «дисперсність» та «товщина рідинних оболонок». Найменша можлива кратність – 1,7, тобто до 100 % розчину додали 70 % газової фази за об’ємом; при цьому весь розчин перетворився на піну. За умови додавання меншої кількості газової фази частина розчину не зможе перейти у стан піни.

*Дисперсність піни* – величина, обернено пропорційна середньому діаметру бульбашок газу. Визначає якість піни: чим більшою є дисперсність, тим більшою є стійкість та вогнегасна ефективність піни.

*Стійкість піни* – здатність піни до збереження своєї структури у часі:

$$S_{\text{пен}} = \frac{V_{\text{пін}} \Delta \tau}{V_{\text{руйн}}} \text{ м, с}, \quad (5.31)$$

де  $V_{\text{пін}}$  – початковий об’єм піни;  $V_{\text{руйн}}$  – об’єм піни, що руйнується за встановлений проміжок часу  $\Delta \tau$ .

*Стійкість* характеризує опір піни руйнуванню (як величина зворотна інтенсивності руйнування) та може визначатися *часом напіврозкладу піни*, тобто часом, протягом якого з піни виділиться половина рідини. Стійкість піни залежить від її кратності, виду піноутворювача, його концентрації в розчині та структури піни. Так, стійкість піни є максимальною за кратності 80–150, а підвищення кратності піни понад 500 призводить до зниження її стійкості, оскільки рідинні плівки стають настільки тонкими, що міцність піни різко зменшується, піна легко руйнується, здувається вітром або висхідними потоками продуктів горіння. Фторовані ПУ утворюють піну, яка майже не руйнується на поверхні вуглеводнів і погано руйнується на поверхні водорозчинних рідин.

*Ізолююча здатність піни* – здатність гальмувати випаровування горючої рідини. Її виражають часом, протягом якого пара горючої рідини (зазвичай бензол, нагрітий до 70 °С) проходить крізь певний шар піни та утворює над ним пароповітряну суміш (НКМПП), здатну запалюватися від джерела запалювання. Іноді ізолюючу здатність визначають за товщиною шару піни, який забезпечує на поверхню піни концентрацію парів, меншу за НКМПП.

*Вогнегасна дія* повітряно-механічної піни полягає в ізоляції поверхні горючої рідини від факела полум'я, в охолодженні її поверхні, у зниженні внаслідок цього швидкості випаровування горючої рідини та, як наслідок, кількості горючої пари, що надходить у зону горіння. Під час подачі піни відбувається її руйнування під дією факела полум'я та гарячої поверхні рідини, що горить. Накопичений шар піни захищає частину поверхні горючої рідини від променистого теплового потоку полум'я, зменшує кількість пари, що надходить у зону горіння, знижує інтенсивність горіння. Швидкій ізоляції піною поверхні горючої рідини сприяє водяна плівка, що утворюється з робочого розчину піноутворювача під час руйнування піни в процесі її розтікання по поверхні нафтопродукту. Одночасно розчин піноутворювача, що виділяється з піни, охолоджує нагрітий поверхневий шар горючої рідини. Крім цього, під час гасіння в об'ємі горючої рідини має місце конвекційний тепломасообмін: під місцем накопичення піни рідина охолоджується та опускається, біля прогрітих стінок резервуара – підіймається, що вирівнює температуру рідини за об'ємом (за винятком «кишень», у яких тепломасообмін відбувається незалежно від основної маси рідини).

На вогнегасні властивості піни впливають природа горючого матеріалу та піноутворювача, температура та хімічний склад домішок води, яку використано для приготування робочих розчинів ПУ, висота шару горючої рідини та тривалість вільного горіння до початку подавання вогнегасних речовин в осередок горіння (особливо під час гасіння пожеж у резервуарах із нафтою та важкими нафтопродуктами), умови перебігу пожежі, вид устаткування, що застосовано для одержання піни та її подавання на гасіння.

*Піни низької кратності застосовують* для гасіння пожеж поверхневим способом, тобто шляхом подачі на поверхню рідини або матеріалу, що горить. *Піни середньої кратності застосовують* для гасіння пожеж як поверхневим, так і об'ємним способом, тобто шляхом заповнення піною всього об'єму закритих приміщень (наприклад, підвалів, горищ, кабельних тунелів), у яких сталася пожежа. *Піни високої кратності застосовують* для гасіння пожеж об'ємним способом, а також для перекривання коридорів по всій висоті для запобігання поширенню диму на сусідні приміщення. Піни найчастіше застосовують під час гасіння пожеж нафтопродуктів; для *пін середньої кратності* визначено нормативну інтенсивність подачі робочих розчинів піноутворювачів загального призначення у залежності від температури спалаху нафтопродукту:

- $0,08 \text{ л}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ , якщо температура спалаху рідини не перевищує  $28 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- $0,05 \text{ л}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ , якщо температура спалаху рідини перевищує  $28 \text{ }^\circ\text{C}$ .

*Піноутворювачі загального призначення* зазвичай застосовують для отримання пін середньої кратності, оскільки піни низької кратності, що утворюються з робочих розчинів, менш ефективні під час гасіння горючих та легкозаймистих рідин. Це пояснюється тим, що гасіння такими пінами досягається лише після того, як на поверхні рідини накопичиться шар піни,

товщина якого є достатньою для зниження концентрації горючої пари над поверхнею до значень, за яких горіння стає неможливим. Але піни низької кратності мають більшу довжину струменя подачі, тому їх використовують на першому етапі гасіння – більше не для ізоляції, а для охолодження осередку пожежі. Надалі вже гасіння проводять піною середньої кратності.

*Плівкоутворюючі піноутворювачі спеціального призначення* є більш ефективними у разі їх застосування з обладнанням, призначеним для генерування піни низької кратності. Але роль піни полягає у тому, щоб доставити «легку воду» на поверхню рідини. Низьократна піна швидко руйнується, але ПАР піноутворювача формує плівку води, яка не тоне. При цьому гасіння досягається як за рахунок ізоляції пари рідини від зони горіння тонкою плівкою робочого розчину на поверхні рідини, яка горить, так і за рахунок додаткового охолодження поверхні, що горить, водним розчином, який виділяється під час руйнування піни. У разі подавання на поверхню рідини піни середньої кратності, отриманої з такого робочого розчину, утворення захисної плівки також є можливим, але її стійкість є меншою, ніж у разі утворення плівки з піни низької кратності. Крім високої вогнегасної ефективності такої водяної плівки, піна низької кратності має ще одну суттєву перевагу – її можна подавати на кілька десятків метрів, тоді як стандартні генератори піни середньої кратності здатні подавати піну не далі, ніж на 5–6 м. Можливість подавання піни на великі відстані є найбільш важливою в тих випадках, коли важко дістатися до осередка пожежі або якщо перебування у безпосередній близькості від нього є небезпечним.

*Піни заборонено застосовувати* для гасіння електрообладнання, що перебуває під напругою, через високу електропровідність водного розчину, а також для гасіння речовин і матеріалів, що вступають у хімічну взаємодію з водою у складі піни. Наприклад, піну не можна використовувати для гасіння лужних і лужноземельних металів (пожежі класу D), карбідів, нітридів металів тощо. Піна також не є ефективною для гасіння газоподібних речовин (пожежі класу C).

## **5.5 Моделювання ізолюючих властивостей шарів речовини для обмеження випаровування горючих рідин у навколишній простір**

Практична ситуація, яка потребує моделювання, передбачає наявність послідовних шарів трьох середовищ (рис. 5.4): горючої рідини, шару речовини з ізолюючими властивостями та повітря. Припускають, що впритул до поверхні рідини розташовано ізолюючий шар, тому утворюються дві поверхні розділу фаз: «рідина–шар» і «шар–повітря». Газоізолююча дія будь-якого шару визначається значенням стаціонарного потоку пари рідини крізь цей шар. Якщо шар має малу текучість, то перенесення пари рідини крізь нього має тільки дифузний характер; тоді рівняння стаціонарного масопереносу крізь цей шар має вигляд:



$$J_{\mu,w} = \frac{D_w}{h} (c_{w,1} - c_{w,2}), \quad (5.32)$$

де  $J_{\mu,w}$  – поверхнева густина молярного потоку пари рідини крізь шар, моль·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>;  $D_w$  – коефіцієнт дифузії парів у шарі, м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>;  $h$  – товщина шару, м;  $c_{w,1}$  та  $c_{w,2}$  – концентрації пари рідини, яка дифундує, на рівні «0» ізолюючого шару (на поверхні горючої рідини) та на рівні « $h$ » (на його зовнішній поверхні), моль·м<sup>-3</sup> (рис. 5.5; рис. 5.6 демонструє систему, коли частина ізолюючого шару притоплюється).

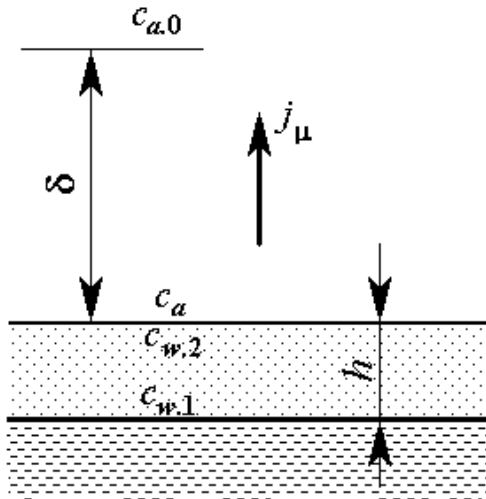


Рис. 5.5 – Схема дифузії пари рідини у повітряний простір крізь шар речовини

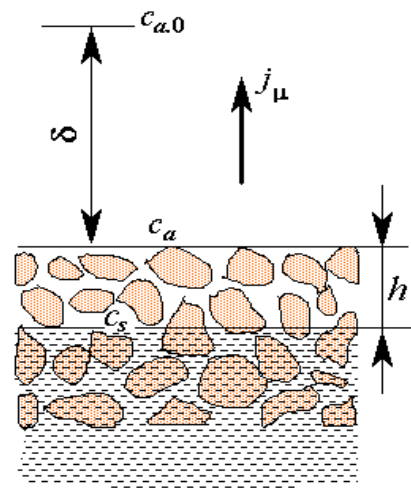


Рис. 5.6 – Схема дифузії пари рідини крізь шар з притопленою частиною

Ця умова змінюється, якщо ізолюючий шар (наприклад, піноскло, що плаває на поверхні горючої рідини, або негорючий гель, нанесений на носій впритул до поверхні горючої рідини) своєю вагою притоплюється (рис.5.6). Оскільки на межі між рідиною та ізолюючим шаром існує рівновага фаз, то концентрація  $c_{w,1}$  пов'язана з рівноважною концентрацією пари поблизу поверхні рідини  $c_s$  пропорцією:

$$c_{w,1} = \frac{c_s}{k_1}, \quad (5.33)$$

де  $k_1$  – коефіцієнт розподілу на межі фаз.

Аналогічна умова рівноваги фаз виконується і для концентрації пари рідини на межі між ізолюючим шаром та повітрям:

$$c_{w,2} = \frac{c_a}{k_2}, \quad (5.34)$$

де  $c_a$  – концентрація пари рідини у повітрі на межі з ізолюючим шаром, моль·м<sup>-3</sup>;  $k_2$  – коефіцієнт розподілу на межах розділу фаз (для ізотермічної

дифузії можна прийняти  $k_1 = k_2 = k$ ). Поверхнева густина молярного потоку пари рідини в повітрі задовольняє рівнянню масовіддачі:

$$J_{\mu,a} = \beta(c_a - c_{a,0}), \quad (5.35)$$

де  $c_{a,0}$  – концентрація пари рідини в повітрі на відстанях, більших за ширину перехідної області  $\delta$ , моль·м<sup>-3</sup>;  $\beta$  – коефіцієнт масовіддачі пари рідини в повітрі, м·с<sup>-1</sup>, який залежить від ширини перехідної області  $\delta$ :

$$\beta = \frac{D_0}{\delta}, \quad (5.36)$$

де  $D_0$  – коефіцієнт дифузії пари рідини в повітрі, м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>. Ширина перехідної області є обернено пропорційною критерію Нуссельта:

$$\delta = \frac{l}{Nu_D}, \quad (5.37)$$

де  $l$  – характерний просторовий розмір задачі, м;  $Nu_D$  – дифузний критерій Нуссельта (Шервуда,  $Sh$ ).

У нестационарному режимі виконується умова  $J_{\mu,w} \leq J_{\mu,a}$ , а рівність між ними досягається після виходу процесу масопереносу на стаціонарний режим. Розв'язання попередніх рівнянь дає загальний вираз для поверхневої густини молярного потоку рідини для ізотермічної дифузії  $J_{\mu,w} = J_{\mu,a} = J_{\mu,w}$ :

$$J_{\mu}(h) = \frac{\beta(c_s - c_{a,0})}{1 + \frac{\beta \cdot h \cdot k}{D_w}} = \frac{J_{\mu}(0)}{1 + k \cdot \frac{h}{\delta} \cdot \frac{D_a}{D_w}} \quad (5.38)$$

Тоді нанесення ізолюючого шару зменшить потік пари рідини у  $K$  разів:

$$K = 1 + k \cdot \frac{h}{\delta} \cdot \frac{D_a}{D_w}. \quad (5.39)$$

З часом потік інтенсифікується й виходить на максимальне значення у стаціонарному режимі, який встановлюється за час, що перевищує характерний час дифузії пари рідини через шар:

$$\tau_D = \frac{h^2}{D_w}. \quad (5.40)$$

Коефіцієнт дифузії можна оцінити за формулою для коефіцієнта дифузії броунівської частинки (молекули горючої речовини) у рідині (у воді – як основній рідкій складовій ізолюючого шару піни або гелю):

$$D_w = \frac{k_B T}{6\pi r_w \nu_w r_o}, \quad (5.41)$$

де  $k_B$  – стала Больцмана,  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-3}$  Дж·К<sup>-1</sup>;  $\nu_w$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості води, м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>;  $r_o$  – ефективний радіус частинки, що дифундує, м.

Для оцінки коефіцієнта дифузії парів у повітрі  $D_a$  існує спрощене емпіричне співвідношення:

$$D_a = D_{a,0} \left( \frac{T}{T_o} \right)^2, \quad (5.42)$$

де  $T_o$  – температура середовища за нормальних умов, К;  $D_{a,0}$  – коефіцієнт дифузії за температури  $T_o$ .

Коефіцієнт дифузії пари у повітрі через зернистий шар гранул ( $D_g$ ) є пропорційним коефіцієнту дифузії пари у повітрі без гранул ( $D_a$ ), м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>:

$$D_g = D_a \left( \frac{h}{l_m} \right)^2 \cdot r_v, \quad (5.43)$$

де  $r_v$  – об'ємна частка порожнин у шарі гранул, крізь який рухається пара рідини;  $l_m$  – середнє значення довжини вертикальної «трубки» потоку для пари в середовищі гранул, м; співвідношення  $h/l_m$  практично не залежить від товщини шару  $h$ .

З урахуванням відомих  $k$ ,  $D_w$ ,  $D_a$  коефіцієнт зменшення потоку шаром води, що ізолює, можна дізнатися за співвідношенням:

$$K = 1 + 5,0 \cdot 10^4 \frac{h}{\delta} = 1 + 5,0 \cdot 10^4 \text{Nu}_D \frac{h}{\ell}. \quad (5.44)$$

$$\text{Або для шару гранул: } K_g > K_{g,\min} = 1 + 8 \frac{h}{\delta} = 1 + 8 \cdot \text{Nu}_D \frac{h}{\ell}. \quad (5.45)$$

Досягнення такого коефіцієнта уповільнення випаровування крізь шар води відбувається за час, не менший ніж:

$$\tau_D = 1,8 \cdot 10^3 \cdot h^2, \text{ с}, \quad (5.46)$$

де  $h$  – товщина ізолюючого шару, мм;

$$\text{або для шару гранул: } \tau_g = 1,25 \cdot 10^2 \cdot h^2, \text{ с}, \quad (5.47)$$

де  $h$  – товщина шару гранульованого плавучого матеріалу, що знаходиться вище рівня рідини, см.

Для оцінки значень  $K$  та  $\tau_D$  необхідно знати властивості ізолюючого шару. Для піни або гелю можна прийняти, що вони мало відрізняються від відповідних властивостей води (яка є основним компонентом цих систем).

Для оцінки дифузії горючої речовини крізь ізолюючий шар спочатку необхідно оцінити тиск насиченої пари. Якщо розглянути ізоляцію поверхні октану за температури 20 °С, то: розчинність октану  $k_m = 1,5 \cdot 10^{-5}$  г/грам води, що створить концентрацію октану в гелі:  $c_w = k_m \rho_w / \mu = 0,13$  (густина води  $1000 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ , молярна маса октану  $\mu = 114 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ). Тиск насиченої пари октану для рівняння Антуана (1.18) за даних умов 1,4 кПа; за такого тиску утвориться наступна концентрація пари октану:  $c_s = \rho_s / RT = 0,57 \text{ моль} \cdot \text{м}^{-3}$ , де  $R$  – універсальна газова стала,  $R = 8,314 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \text{К}^{-1}$ ;  $T$  – температура пари рідини, К. Тоді коефіцієнт розподілу октану за температури 20 °С становитиме:  $k = c_s / c_w = 4,4$ . Коефіцієнт дифузії  $D_w$ , згідно з (5.41), молекули октану у воді  $D_w = 5,6 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  (якщо врахувати, що за температури 20 °С коефіцієнт кінематичної в'язкості води становить  $\nu_w = 1,005 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ , то оціночне значення для  $r_0 = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ).

Коефіцієнт дифузії пари октану в повітрі  $D_a$  можна визначити згідно з (5.38):  $D_a = 6,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  (якщо врахувати, що за температури 20 °С коефіцієнт дифузії становить  $D_a = 5,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ). Співвідношення (5.44) показує достатній коефіцієнт уповільнення випаровування октану ізолюючим шаром гелю вже за його товщини  $h \sim 1 \text{ мм}$ , а за товщини гелю  $h \sim 2 \text{ мм}$  цей коефіцієнт становить  $K = 11$  навіть у стаціонарному режимі випаровування крізь шар (для мінімального значення  $Nu_D \sim 1$ , за характерних розмірів поверхонь  $l \sim 10 \text{ м}$ ). Згідно з формулою (5.46) вихід процесу випаровування октану через шар гелю 2 мм на стаціонарний режим відбудеться за 2 години.

Оцінки коефіцієнта дифузії пари в повітрі через шар гранул  $D_g$ , згідно з (5.39), дає значення дифузії  $D_g = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ , якщо прийняти  $(h/l_m)^2 = 0,5$ , то  $r_v = 0,25$ . Згідно з формулою (5.42) вихід процесу випаровування октану через шар гранул товщиною 5 см на стаціонарний режим відбувається за 0,87 години, а за товщини шару 10 см – за 3,5 години. Згідно з формулою (5.41) для товщини шару гранул 10 см коефіцієнт уповільнення випаровування октану шаром гранул становить 1,8, а за товщини 25 см – 3,0.

Тобто процес випаровування гальмується зі зростанням товщини шару гранульованого матеріалу та зі зменшенням об'ємної частки пустот у ньому. Гальмуюча дія шару гранул стосовно випаровування рідини у стаціонарному режимі стає помітною у разі досягнення товщини шару гранул 10 см.

### *Розрахунки параметрів гасіння пожеж рідин за допомогою пін Приклад розв'язання задачі*

Розрахувати об'єм піноутворювача ПУ-6ТС для гасіння резервуара РВС-5000 з дизельним паливом, якщо площа дзеркала резервуара – 408 м<sup>2</sup>. Гасіння здійснюють 6 % розчином ПУ; нормативний час гасіння – 15 хв.; нормативна інтенсивність подачі – 0,05 л·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>. Втрати робочого розчину на стабілізацію піни не перевищують 10 %. Коефіцієнт запасу піноутворювача – 3.

#### *Розв'язання*

1. Розраховуємо об'єм робочого розчину ПУ, який витрачається за

нормативний час гасіння з урахуванням втрат на стабілізацію піни (як інтенсивність подачі протягом заданого часу з урахуванням фактичної площі пожежі та коефіцієнта використання розчину 1,1):

$$V_p = 0,05 \cdot 408 \cdot 15 \cdot 60 \cdot 1,1 = 20196 \text{ л.}$$

2. Розраховуємо об'єм піноутворювача, який витрачено на приготування робочого розчину (за відомою концентрацією ПУ):

$$V_{\text{ПУ}} = 20196 \cdot 0,06 = 1211,8 \text{ л.}$$

Висновок: для гасіння пожежі резервуара РВС-5000 з дизельним паливом та площею дзеркала рідини 408 м<sup>2</sup> протягом 15 хв. необхідно витратити 3635,3 л піноутворювача ПУ-6ТС.

#### *Приклад розв'язання задачі*

Розрахувати кратність і стійкість піни, якщо протягом 75 с об'єм піни зменшився з 5 л до 4,85 л, а під час повного руйнування всього об'єму піни виділилося 0,083 л робочого розчину піноутворювача.

#### *Розв'язання*

1. Розраховуємо кратність піни за формулою (5.30):  $K_{\text{пін}} = \frac{5}{0,083} = 60$ .

2. Розраховуємо стійкість піни, формула (5.31):  $S_{\text{пін}} = \frac{5 \cdot 75}{5 - 4,85} = 2500 \text{ с.}$

Висновок: використана піна є піною середньої кратності, оскільки  $K_{\text{пін}}=60 < 200$ ; стійкість піни (час напіврозкладу) становить 2500 с.

#### *Приклад розв'язання задачі*

Розрахувати фактичну інтенсивність подавання 5 % розчину ПУ та коефіцієнт використання піни під час гасіння бензину на площі 300 м<sup>2</sup>, якщо за час гасіння 3,5 хв використано 150 л піноутворювача. Нормативна інтенсивність подачі робочого розчину ПУ загального призначення на гасіння рідин з температурою спалаху менше 28 °С становить 0,08 л<sup>3</sup>·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>.

#### *Розв'язання*

1. Розраховуємо об'єм робочого розчину ПУ, який використано на гасіння:

$$V_{\text{розч}} = \frac{150 \cdot 100}{5} = 3000 \text{ л.}$$

2. Розраховуємо інтенсивність подачі робочого розчину піноутворювача на площу пожежі за час подачі, формула (5.6):

$$I = \frac{3000}{300 \cdot 3,5 \cdot 60} = 0,14 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

3. Розраховуємо коефіцієнт використання піни за формулою (5.9):

$$K_{\text{вик}} = \frac{0,08}{0,14} = 0,57.$$

Висновок: фактична інтенсивність подачі 5 %-го розчину ПУ на гасіння бензину склала  $0,14 \text{ л}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ , коефіцієнт використання – 0,57 (57 % піни використано з користю для гасіння, інше – втрати).

### 5.6 Гасіння пожеж рідин інгібуючими вогнегасними засобами

Припинення горіння шляхом інгібувannya можливе тільки для речовин, які горять за розгалужено-ланцюговим механізмом через послідовність утворення проміжних *активних центрів полум'я* (АЦП – радикалів  $\text{H}^*$ ,  $\text{O}^*$ ,  $\text{OH}^*$ ). Так горять вуглеводні, зокрема й органічні рідини. Горіння металів, металургійного коксу, деревинного вугілля, сажі відбувається шляхом прямого окиснення. Тому засоби інгібувannya на інтенсивність такого горіння не впливають. До інгібуючих вогнегасних засобів відносять хладони, порошки загального призначення та аерозолеутворюючі склади. Також інгібуючу дію мають антипірени для просочування твердих речовин.

*Хладони* – це бромумісні газоподібні алкани. Порошки загального призначення та аерозолеутворюючі склади містять солі або оксиди лужних металів. Інгібуючу дію на процес горіння створюють радикали галогенів  $\text{Cl}$ ,  $\text{Br}$ ,  $\text{I}$  (крім фтору) та лужних металів, які входять до складу вогнегасних засобів. Вони спричиняють загибель АЦП у полум'ї. Це збільшує енергію активації, необхідну для ініціювання реакції полум'яного горіння, а тому знижує тепловиділення в системі, що й викликає погасання. Схематично розгалуження й обрив ланцюгів у реакції горіння можна відобразити наступним чином: 1) розгалуження реакції:  $\text{R}^* + \text{B} \rightarrow \text{x}^* + \text{y}^*$ ; 2) загибель АЦП:  $\text{R}^* + \text{стінка} \rightarrow \text{обрив ланцюга}$ ; 3)  $\text{R}^* + \text{B} + \text{тв. частинка} \rightarrow \text{AB} + \text{тв. частинка}$ ; 4) у разі додавання інгібітора:  $\text{R}^* + \text{In} \rightarrow \text{обрив ланцюга}$ . Існує концентрація інгібітора, яка перетворює горючу суміш на негорючу (досягається ефект флегматизації) та забезпечує  $\omega_{\text{утв.АЦП}} < \omega_{\text{загиб.АЦП}}$ .

Більш ефективно використовувати *гомогенне інгібувannya*, за якого відбувається взаємодія газоподібних молекул або дуже дрібних частинок і радикалів з АЦП. Така дія реалізується у разі подачі хладонів та вогнегасних аерозолей. Атоми металу (лужні, лужноземельні) аерозолі утворюють гідропероксид:  $\text{Me} + \text{OH}^* \rightarrow \text{MeOH}$ , що надає можливість видаляти із зони реакції активні радикали водню та гідроксилу з утворенням неактивних сполук:  $\text{MeOH} + \text{OH}^* \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{MeO}$ ;  $\text{MeOH} + \text{H}^* \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{Me}$ .

*Гетерогенне інгібувannya* – це взаємодія АЦП з поверхнею частинки порошку загального призначення у кілька стадій: 1) адсорбція АЦП:  $\downarrow \text{R}^*$ ; 2)

рекомбінація АЦП із втратою енергії:  $R^* + R^*$ ; 3) десорбція негорючих продуктів (газів):  $НГ↑$ .

*Вогнегасні порошки* – це тонко подрібнені мінеральні солі з добавками проти злежування та для текучості пилоподібного стану. В якості такої добавки застосовують тонко подрібнений діоксид кремнію (аеросил) – 2,5 %. Наприклад, використовують порошок загального призначення ПСБ-3 – суміш бікарбонату натрію та 3 % аеросилу, ПФ – порошок загального призначення комбінованої дії з гідрофосфатом амонію, СІ-2 – силікагель (як порошок спеціального призначення) з адсорбованим хладоном 114В2.

*Порошки загального призначення* створюють інгібуючий вплив на полум'яне горіння вуглеводнів – а це пожежі класів А, В, С, у тому числі під напругою. Подачу здійснюють у ЗГ у вигляді розпорошеної хмари, яка повинна одночасно накрити все полум'я (якщо умова одночасності не буде виконана, то гасіння не буде досягнуто). При цьому такі порошки мають високу вогнегасну ефективність, аналогічну до бромхладонів, малу витрату на гасіння, універсальність (комбіновані склади з порошків загального та спеціального призначення гасять усі класи пожеж), не змочують та не пошкоджують матеріалів; надають можливість гасіння пожеж за будь-яких температур. Однак подача порошку у вигляді хмари є ускладненою, під час зберігання порошки схильні до комкування, що додатково ускладнює подачу та зменшує частку гомогенного інгібування, а ефективність гасіння сильно залежить від умінь оператора створити вогнегасну хмару. Так, вогнегасна ефективність частинок бікарбонату натрію  $d < 10$  мкм у 2 рази менша, ніж для  $d = 15-30$  мкм, проте частинки  $d < 30$  мкм інтенсивніше злежуються, тому їх складніше сформувати у вигляді вогнегасної хмари.

Під час гасіння рідин порошок загального призначення пригнічує хімічні реакції в полум'ї та може забезпечити швидкість гасіння набагато більшу, ніж швидкість охолодження даної ділянки зони горіння, а також своєю масою у незначній мірі охолоджує зону горіння, газоподібні негорючі продукти розкладання порошку розбавляють зону горіння, хмара порошку частково екранує поверхню рідини від прогріву випромінюванням полум'я, частинки порошку під час зависання створюють щось схоже на об'ємну сітку, що ускладнює розповсюдження полум'я.

Для створення *вогнегасного аерозолю* інгібуючої дії застосовують *аерозолеутворючі склади* (АУС). АУС – це твердопаливна піротехнічна композиція з хімічно стабільних речовин з окисником (нітрати, перхлорати, азиди К), яка здатна горіти без доступу кисню. У склад АУС введено солі та оксиди лужних і лужноземельних металів, які під час згоряння АУС переносяться потоком газоподібних продуктів горіння (азот, вуглекислий газ, водяна пара) у цільовому напрямку у вигляді хмари. При цьому утворюється вогнегасний інгібуючий порошок високої дисперсності, який заповнює весь об'єм, що захищається, та осідає протягом години. За цей час, хоча порошок і не впливає на осередки гетерогенного горіння, але без підтримки

полум'яного горіння тління теж почне згасати. АУС має найбільшу вогнегасну ефективність для гасіння полум'яного горіння серед усіх вогнегасних засобів, характеризується тривалістю зберігання у широкому діапазоні умов, екологічною безпекою, можливістю автоматичного пожежогасіння. Тому зазначений вогнегасний засіб є перспективним для гасіння рідин, зокрема для резервуарів. Однак, слід зазначити, що, як і для газових засобів пожежогасіння, наявність втрат вогнегасної хмари або необхідність гасити великі об'єми істотно знижує ефективність гасіння.

### 5.7 Можливість потрапляння частинки вогнегасної речовини у полум'я

Під час подавання будь-яких вогнегасних речовин у полум'я постає питання щодо інтенсивності їх унесення конвекційними висхідними потоками, які виникають біля полум'я. Це потребує визначення критичних параметрів вогнегасної речовини для забезпечення потрапляння у зону горіння. Розв'язання такої задачі є особливо актуальним під час подачі піни, розпиленої води, гранул або інших частинок вогнегасної речовини. Втрати вогнегасної речовини внаслідок таких процесів можуть значно знизити ефективність її використання або зробити гасіння неможливим.

Під час розв'язання такої задачі спрощено розглядають вільне падіння сферичних частинок певної густини у висхідному конвекційному потоці. Бажаний напрямок руху частинки вниз визначатиметься перевищенням сили тяжіння ( $F_T = mg$ ) над силою аеродинамічного опору ( $F_0$ ). Над модельним осередком горіння бензину швидкість висхідного потоку становить 2,6 м/с. Така швидкість дає змогу нехтувати силою тертя. Тоді для можливості потрапляння частинки вогнегасної речовини в зону горіння має виконуватися співвідношення:  $F_T > F_0$  або  $mg > 0,5c \cdot \rho_{\text{п}} v^2 S$ ,

$$\text{тоді для сферичної частинки: } \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \rho_{\text{вр}} \cdot g > \frac{0,47 \cdot \rho_{\text{п}} \cdot v^2 \cdot \pi \cdot r^2}{2}, \quad (5.48)$$

де  $m$  – маса частинки;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $c$  – коефіцієнт форми тіла (для сфери – 0,47);  $\rho_{\text{в}}$  – густина повітря;  $v$  – швидкість висхідного потоку;  $S$  – площа поперечного перерізу частинки;  $r$  – радіус сферичної частинки;  $\rho_{\text{вр}}$  – густина частинки вогнегасної речовини.

Для подачі гранул піноскла, які необхідно переправити на поверхню рідини, що горить, у якості плавучого ізолюючого матеріалу,  $\rho_{\text{вр}} = 140 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{\text{п}} = 1,29 \text{ кг/м}^3$ ,  $v = 2,6 \text{ м/с}$ , то критичний радіус гранули, який забезпечує її падіння у такому газовому потоці, має бути більшим, ніж  $r = 1,2 \text{ мм}$ . Це означає, що типові розміри гранул для гасіння за допомогою піноскла (від 1 до 4 см) задовольняють вимогам щодо неможливості їх унесення конвекційними потоками біля полум'я рідини, яка горить.



## Запитання для самостійної перевірки знань

1. Надайте характеристику теплового балансу припинення горіння.
2. Поясніть графічне і математичне відображення умов погасання.
3. Охарактеризуйте методи припинення горіння.
4. Охарактеризуйте способи припинення горіння.
5. Охарактеризуйте прийоми припинення горіння.
6. Охарактеризуйте механізми припинення горіння.
7. Надайте визначення та вкажіть типові засоби пожежогасіння і вогнегасні речовини.
8. Вкажіть принципи вибору вогнегасних речовин.
9. Назвіть та охарактеризуйте параметри пожежогасіння.
10. Опишіть методику встановлення оптимальних режимів подавання вогнегасної речовини.
11. Охарактеризуйте процес флегматизації повітряних сумішей.
12. Що таке «мінімальна вибухонебезпечна концентрація кисню»?
13. Охарактеризуйте воду як охолоджуючий вогнегасний засіб.
14. Охарактеризуйте тверду вуглекислоту як охолоджуючий вогнегасний засіб.
15. Опишіть механізми гасіння полум'я охолодженням зони горіння.
16. Опишіть механізми гасіння полум'я або вогнища гетерогенного горіння охолодженням поверхні горючої речовини.
17. Надайте класифікацію ізолюючих вогнегасних речовин.
18. Охарактеризуйте порошки спеціального призначення і сфери їх застосування, розкрийте механізми вогнегасної дії.
19. Надайте класифікацію піноутворювачів за сферою застосування.
20. Надайте класифікацію пін за способом отримання.
21. Опишіть механізми дії вогнегасних пін.
22. Назвіть та опишіть властивості пін стосовно пожежогасіння.
23. Назвіть сфери застосування вогнегасних пін.
24. Як проводять моделювання дії ізолюючих шарів для гасіння рідин?
25. Опишіть механізм припинення полум'яного горіння шляхом гомогенного інгібування.
26. Опишіть механізм припинення полум'яного горіння шляхом гетерогенного інгібування.
27. Опишіть механізм вогнегасної дії порошоків загального призначення.
28. Опишіть механізм вогнегасної дії хладонів.
29. Опишіть механізм вогнегасної дії аерозоліутворюючих складів.
30. Як встановлюють критерій можливості подолання вогнегасною речовиною конвекційного потоку полум'я під час пожежогасіння.

**Література для самопідготовки та поглибленого вивчення розділу:**  
5, 6, 9, 18, 22, 26, 28, 30, 33, 34, 39, 40, 43, 47, 53, 55, 56, 59, 60, 63, 64.

## РОЗДІЛ 6. РОЗВИТОК СИСТЕМ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ РІДИН У РЕЗЕРВУАРАХ

Статистичні дані щодо пожеж у резервуарах на об'єктах із обігом нафтопродуктів свідчить про збільшення випадків у міру наближення до літнього періоду, а пік пожеж припадає на липень.

У середньому в резервуарних парках країн на пострадянському просторі відбувається 12 великих пожеж на рік. Це визначається рядом причин: періодом ремонтних робіт, інтенсифікацією грозової активності тощо. Але тривалість гасіння пожеж влітку менше (5,5 годин), ніж узимку (8,5 годин).

Аналіз статистичних даних показує, що близько 90 % пожеж припадає на резервуари типу РВС (резервуар вертикальний сталевий). З них приблизно половина відбуваються у резервуарах із бензином; від третини до чверті пожеж – у резервуарах із нафтою; від 15 до 24 % – у резервуарах із більш важкими нафтопродуктами та іншими горючими рідинами (мазут, дизельне паливо, гас тощо). Причому близько 60 % випадків пожеж супроводжуються утворенням «кишень». Крім того, у 60 % випадків на початковому етапі пожеж у резервуарах відбувається вихід із ладу систем автоматичного пожежогасіння. При цьому 25 % пожеж мають затяжний характер.

Половина всіх випадків пожеж у США відбувається в резервуарах із плаваючим дахом або понтоном як найбільш поширеними конструкціями. Такі резервуари більш економічні та забезпечують найменші втрати речовин під час зберігання, але одночасно мають більшу пожежну небезпеку.

Хоча масштабні пожежі резервуарів трапляються не часто, але вони є серйозною проблемою для пожежогасіння та характеризуються інтенсивним забрудненням довкілля. Існує два підходи до гасіння резервуарів: *гасіння шляхом вигорання* та *гасіння шляхом використання активних процесів* (наприклад, пінної атаки). Як правило, період гасіння таких пожеж триває кілька днів, що призводить до втрат продукту, який зберігається, екологічних проблем, додаткових дій та втрат, пов'язаних з охолодженням конструкцій для запобігання поширенню пожежі. На цей момент у практиці пожежогасіння резервуарів позитивний ефект досягається лише за допомогою протипожежних пін. Однак можливість успішного гасіння навіть із використанням пін зменшується зі збільшенням діаметра резервуара, а для резервуарів діаметром більше 20 м виникали значні проблеми під час гасіння у багатьох випадках, та не було успішних випадків гасіння резервуарів діаметром більше за 45 м. На цей час пожежу найбільшого резервуара, який горів, діаметром 82 м було ліквідовано у червні 2001 р. Існують резервуари, діаметр яких перевищує 100 м, але можливість їх успішного гасіння залишається теоретичною. Рекомендації щодо гасіння невеликих резервуарів погано підходять для гасіння великих.

В цілому можна зробити висновок, що в економічно розвинених країнах існуючі технології гасіння пожеж у резервуарах з ГР та ЛЗР є недостатньо ефективними і знаходяться в стані розвитку з метою пошуку більш ефективних та надійних механізмів гасіння.

### *Способи гасіння пожеж у резервуарах із горючими рідинами*

Як було зазначено раніше, основними механізмами припинення горіння є: *охолодження* зони горіння або речовини, яка горить, *розведення* речовин, які надходять у зону горіння, *ізоляція* горючих речовин від зони горіння, *інгібування* хімічної реакції окиснення. Крім цього, під час гасіння рідин велике значення має ефект *екранування* поверхні рідини від теплового випромінювання факела полум'я. У разі наявності екранування поверхні рідини від випромінювання полум'я підведення тепла до рідини відсутнє, поверхня рідини поступово охолоджується, процес випаровування частково сповільнюється. В результаті зменшується інтенсивність горіння, а важкокиплячі рідини навіть можуть згаснути. Іноді як окремі механізми припинення горіння відзначають *вогнеперешкодження* та зрив *полум'я*. Однак ці механізми вогнегасної дії можна звести до вищезазначених.

Для гасіння пожеж горючих рідин у тій або іншій мірі підходить більша частина всіх видів вогнегасних засобів. Досліджено можливість гасіння ГР та ЛЗР всіма відомими на цей час типами методів та засобів пожежогасіння: повітряно-механічними пінами, розпорошеною водою, водними розчинами, емульсіями, порошковими засобами, аерозолями, відкачуванням палива з резервуара, твердою вуглекислою, газами-розріджувачами, газоподібними інгібіторами, з використанням вогнеперешкоджувачів. Однак більшість із цих методів (крім гасіння пінами) являють собою лише теоретичний інтерес через складність забезпечення умов погасання одночасно над всією поверхнею рідини, хоча ці методи гасіння й забезпечують необхідний результат у певних умовах. Позитивних результатів часто можна досягти під час гасіння осередків пожежі з малою площею горіння. У ряді випадків перелічені вище методи забезпечують гасіння висококиплячих або в'язких рідин. Механізми вогнегасної дії для гасіння ЛЗР за ефективністю та за внеском у вогнегасну дію можна розташувати у наступній послідовності: ізоляція, охолодження, інгібування та розведення; для гасіння ГР: охолодження, ізоляція, інгібування та розведення.

Одним з найважливіших факторів, які визначають ефективність вогнегасної речовини для гасіння ГР та ЛЗР, є час збереження вогнегасної дії – період часу, протягом якого, за умови подачі вогнегасного засобу, підтримуються умови погасання в зоні горіння. При цьому бажано забезпечити тиск парів рідини, що визначає зниження концентрації пари нижче НКМПП над всією площею поверхні рідини. Якщо ця умова не виконується, горіння може відновитися від будь-якого джерела запалювання. Для надійного забезпечення відсутності повторного займання ГР та ЛЗР за цей час всі елементи конструкції резервуара повинні охолонути (або їх потрібно штучно охолодити) до температури меншої, ніж температура самоспалахування. Це забезпечується 1 годиною природного охолодження, та 10 хв – за умови штучного охолодження водою. Під час вибору ефективного вогнегасного засобу важливу роль відіграють такі чинники:

економічність гасіння, коефіцієнт використання вогнегасної речовини, токсико-екологічні показники гасіння.

Найкращі результати у практиці гасіння горючих рідин забезпечують засоби, в яких реалізується ізолюючий механізм припинення горіння. Основним таким засобом гасіння є *повітряно-механічні піни*. Вогнегасні піни виявляють помірну охолоджуючу та розбавляючу дію, а також досить високий коефіцієнт використання, дозволяють надійно створювати умови погасання над всією поверхнею рідини на достатній час для охолодження нагрітих конструкцій до температури, нижчої за температуру самоспалахування. Саме виконання цих двох умов є необхідним для успішного гасіння пожеж класу «В».

## **6.1 Гасіння пожеж рідин вогнегасними пінами**

### **6.1.1 Практичні аспекти гасіння пожеж рідин пінами**

У багатьох державах у нормативних документах піни відзначаються як основний засіб гасіння ГР та ЛЗР. Тільки у специфічних ситуаціях допускається застосування вогнегасних порошоків або розпорошеної води. Основною дією пін є суттєве уповільнення швидкості надходження парів рідини до зони горіння за рахунок створення дифузійних ускладнень (*дифузійна ізоляція*). До цієї дії додається екранування розігрітої поверхні рідини, що горить, від зовнішнього теплового потоку (*теплова ізоляція*), що уповільнює прогрів поверхневих шарів горючих речовин. Охолоджуючу та розбавляючу дію пін зазвичай розглядають як додаткові механізми припинення горіння. Однак із підвищенням температури спалаху горючої рідини збільшується роль процесу охолодження поверхневого шару, що властиво для висококиплячих рідин від температур кипіння 120–250 °С до температур спалаху 50–60 °С або навіть нижче.

Великий досвід застосування піноутворювачів загального призначення виявив їх суттєві недоліки. Так, стаціонарні системи протипожежного захисту резервуарів самостійно не можуть забезпечити гасіння пожеж ГР та ЛЗР, а основний ефект гасіння досягається за рахунок використання пересувної пожежної техніки. Тому пожежі ЛЗР мають затяжний характер і нерідко закінчуються тільки після повного вигорання рідини у резервуарі. Піни середньої кратності, отримані з піноутворювачів загального призначення, здебільшого погано забезпечують гасіння резервуарів об'ємом понад 5000 м<sup>3</sup>.

Однак використання верхнього способу подачі із залученням пересувної техніки істотно збільшує час початку гасіння. Також, чим більшою є тривалість горіння палива, тим до більшої температури воно нагрівається, а також більше зростає товщина гомотермічного шару (прогрітого до температури кипіння). Це призводить до більш інтенсивного руйнування піни за її контакту з такою розігрітою рідиною; одночасно зростає ризик спінування та викиду.

Чим вище кратність пін, тим меншою є їх густина. За умови застосування піноутворювачів загального призначення більш ефективно гасіння досягається

у разі використання пін середньої кратності. Проте зі зменшенням густини піни зростають проблеми з її подачею на великі відстані. Причому збільшення швидкості пінного струменя, одночасно зі збільшенням дальності його подачі, призводить до інтенсифікації руйнування піни. Низька густина пін призводить до відхилення пінних струменів конвекційними потоками горіння. Частково цю проблему усуває застосування установки комбінованого гасіння пожеж УКГП «Пурга». Однак позбутися руйнування пін за такого способу подачі не вдається.

Крім того, піни помітно руйнуються під час зіткнення з поверхнею рідини (жорстка подача). Можна досягти зменшення їх руйнування у разі плавного контакту з поверхнею рідини, шляхом подачі по стінках резервуара (м'яка подача). Однак існуючі на цей час технічні засоби подачі повітряно-механічної піни через борт резервуара виключають можливість «м'якої» подачі, тому об'єм піни, що досягає поверхні рідини, істотно зменшується.

Практика гасіння пінами показує, що найважче припинити горіння горючої рідини в області біля стінок резервуара. Це зумовлено двома факторами: посилене руйнування піни під термічною дією розігрітих стінок, нагріта стінка резервуара служить джерелом запалювання парів горючої рідини, торкання бульбашки піни до твердої поверхні часто спричиняє її руйнування. Послабити дію цих факторів допомагає охолодження стін резервуара.

На цей час розроблена та впроваджується у практику пожежогасіння технологія гасіння пожеж *«компресійною» піною*, яку можна застосовувати і для гасіння горючих рідин. Компресійну піну отримують шляхом спінювання стисненим повітрям розчину піноутворювача низької концентрації. Ця технологія дозволяє вирішити проблему подачі піни на великі відстані. Наприклад, розроблено систему подачі компресійної піни NATYSK. Проте розробки цієї технології ще не досягли рівня, необхідного для її масштабного впровадження у практику пожежогасіння.

Використання *складів, що спінюються* в осередку пожежі, безпосередньо для пожежогасіння рідин не застосовується, хоча й дозволяє збільшити дальність подачі. Недоліком цієї системи є те, що компактний струмінь водяного розчину не встигає нагріватися та спінитися на поверхні рідин (навіть якщо рідина є гарячою); тоді цей водяний розчин тоне, що може спричинити спінювання рідини, яка горить, та її перелив.

Аналогом останньої системи піноутворення є отримання хімічної піни у процесі подачі шляхом розпилення двох розчинів, які під час реакції виділяють газ, який спінює розчин піноутворювача. Такий принцип можна реалізувати шляхом накопичення цих розчинів на дні резервуара з наступним утворенням та спливанням піни на поверхню. Однак ця система дозволяє отримувати тільки піну низької кратності (10–20), а стійкість піни в більшості випадків не перевищує 15 хвилин.

Суттєвими недоліками пін є їх мала стійкість по відношенню до теплового впливу та за умови контакту з полярними рідинами. До недоліків

вогнегасних пін також можна віднести обмежені можливості розтікання піни на значні відстані від точки подавання. Це призводить до необхідності подавання великого надлишку піни на невелику доступну площу дзеркала рідини, що горить.

Всі перераховані вище фактори призводять до збільшення витрати вогнегасних пін під час гасіння пожеж класу «В». Незважаючи на всі недоліки пін, вони залишаються найбільш ефективним засобом гасіння горючих рідин. І хоча піни у більшості розвинених країн застосовуються лише у 5–10 % випадків гасіння від загальної кількості пожеж, частка їх використання для гасіння горючих рідин є близькою до 100 %.

Проблему низької стійкості та недостатніх ізолюючих властивостей вогнегасних повітряно-механічних пін частково вирішує застосування пін на основі плівкоутворюючих фторумісних піноутворювачів (ПУ). У разі їх використання гасіння відбувається в основному за рахунок ізоляції поверхні горючої рідини тонкою плівкою водного розчину такого піноутворювача. Сформована плівка, незважаючи на більшу густину, ніж у горючої рідини, за рахунок дуже низького поверхневого натягу набуває здатності утримуватися на поверхні рідини. Доведено, що піноутворювачі спеціального призначення (особливо фторовані) мають суттєві переваги, порівняно з піноутворювачами загального призначення для гасіння ГР та ЛЗР у резервуарах.

Для гасіння пожеж у РВС різної місткості часто використовують навісні струмені низьократних пін на основі фторовмісних ПУ та не охолоджують стінки резервуара ззовні. При цьому вогнегасні речовини подають на задню стінку дуже великими витратами (понад 350 л/с), поступово просуваючись до передньої стінки. Також зазначається, що позитивний результат може забезпечити одночасна подача таких пін як на поверхню рідини, так і у її шар. Плівкоутворююча піна може подаватися знизу крізь шар рідини з використанням напірних піногенераторів через розведення трубопроводів у нижній частині резервуара. Такі піноутворювачі не змішуються з вуглеводнями, і піна без додаткового обладнання спливає та накопичується на поверхні рідини, що горить. Обладнання для подачі піни є не стійким до пошкоджень під час первинного вибуху пароповітряної суміші. Крім того, за рахунок руху піни вгору відбувається перемішування нижніх шарів рідини з верхніми, що призводить до охолодження її поверхні та зниження інтенсивності горіння. Низьократна піна на поверхні поступово руйнується та утворює тонку ізолюючу плівку, яка краще розтікається по всій поверхні, ніж сама піна, та залишається стабільною протягом декількох годин. Так, за однакових умов подавання, за вогнегасною ефективністю ПУ, що містять фторовані поверхнево-активні речовини (ПАР), багатократно перевершують вуглеводневі ПУ. Також фторовані ПУ мають великі терміни зберігання.

Впровадження плівкоутворюючих піноутворювачів істотно підвищило ефективність пожежогасіння резервуарів із горючими рідинами. Однак практика пожежогасіння резервуарів із вуглеводневими паливами показала,

що далеко не завжди використання таких піноутворювачів дає позитивний результат. Крім того, їх суттєвими недоліками є їх висока вартість, екологічна небезпека та токсичність продуктів термодеструкції. Також під час практичного використання плівкоутворюючих ПУ було виявлено такі недоліки: підшарове гасіння в'язких нафтопродуктів виявляється неефективним через великий час спливання піни; такі піни мають невисоку стійкість у полярних органічних рідинах та у сумішевих автомобільних паливах (із вмістом спиртів та інших компонентів).

Низькі економічні показники підшарового способу подачі піни на основі фторованих ПАР зумовлені як високою вартістю саме піноутворювачів, так і великими затратами на встановлення засобів, що забезпечують підшарове пожежогасіння. У розрахунку на 1 резервуар середнього розміру такі витрати становлять понад 170 000 доларів США.

Ще один недолік пінних засобів пожежогасіння було виявлено під час гасіння палив з вмістом спирту. Піни, отримані як з використанням традиційних, так і плівкоутворюючих піноутворювачів, виявилися нестійкими по відношенню до палив, що містять спирт. Так, встановлено, що за вмісту спирту в паливі 5 % швидкість розтікання водяної ізолюючої плівки по поверхні зменшується в 2–3 рази, а за 10 % вмісту спирту в паливі плівкоутворююча дія таких пін повністю припиняється.

Для гасіння полярних рідин було розроблено *спеціальні піноутворювачі*, до складу яких входять полісахариди, що осідають із піни та утворюють на поверхні полярної рідини суцільну ізолюючу плівку, яка запобігає контакту піни та полярної рідини, тому руйнування вогнегасної піни гальмується.

Розвитком методу пінного пожежогасіння є розробка вогнегасних *пін, що твердіють*. У цій технології поєднано ефекти спінювання та гелеутворення, в результаті чого протягом від 2 секунд до 2 хвилин піна твердне, набирає міцності та перетворюється на пенокерамічний матеріал, який має плавучу здатність. Це дозволяє використовувати таку піну як вогнегасний засіб тривалої дії з високою стійкістю і для гасіння пожеж класу «В». Однак висушений шар такої піни руйнується внаслідок змочування.

### **6.1.2 Екологічні особливості пінного пожежогасіння**

Недоліком сучасного пінного пожежогасіння є використання екологічно небезпечних речовин – *піноутворювачів*, які мають різну здатність до біорозкладання. Розрізняють біологічно «м'які» та «жорсткі» піноутворювачі. До складу піноутворювачів входять поверхнево-активні речовини (ПАР), що мають токсичність та екологічну небезпеку. ПАР створюють складний вплив на організм людини: накопичуються у клітинних мембранах та покривають їх поверхню тонким шаром, що може викликати порушення біохімічних процесів, функцій та цілісності клітини; стимулюють резорбцію речовин у шлунково-кишковому тракті; підвищують вміст холестерину у крові;

змінюють екскреторну функцію печінки; змінюють водний та електролітний баланси, порушують біоенергетику та окисно-відновні процеси в організмі; створюють передумови посилення токсичної дії суміші речовин навіть у тих випадках, коли кожна з цих речовин надходить в організм у безпечних дозах; ступінь негативного впливу ПАР залежить від швидкості їх біорозкладання (біодеградації) під дією мікроорганізмів.

До вогнегасних речовин застосовано вимоги щодо токсичності – 3–4-й клас небезпеки, а за здатністю до біорозкладання – вони мають бути біологічно «м'якими». В умовах використання великих кількостей розчинів піноутворювачів на гасіння пожеж резервуарів (десятки тонн) у довкілля потрапляють їх значні кількості, тому можливе перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) у повітрі та ґрунтових водах.

Застосування більш екологічно безпечних ПАР у складі піноутворювачів (протеїнових рослинного та тваринного походження) призводить до погіршення їх вогнегасних характеристик. Наприклад, екологічно безпечні піноутворювачі на основі екстрактів хмелю не знайшли застосування у практиці пожежогасіння.

Особливо необхідно відзначити перегляд ставлення до екологічних та токсикологічних характеристик плівкоутворюючих піноутворювачів. Спочатку виробники декларували їх як нетоксичні та «біологічно м'які». Однак доведено, що фторсинтетичні піноутворювачі виявилися в 150 разів більш токсичними за «біологічно жорсткий» піноутворювач ПУ-6К та в 2500 разів більш стабільними до біодеградації у середовищах довкілля. Зазначається також, що поверхнево-активні компоненти цих піноутворювачів – перфтороктансульфо кислоти легко акумулюються у жирових тканинах та серозних оболонках тварин і людини. Ще одним фактором екологічної небезпеки перфторованих ПАР є утворення під час термодеструкції фторвмісних речовин внаслідок впливу полум'я високотоксичних фтороводню та фтору. Це визначило рішення Агенції з охорони навколишнього середовища США ініціювати програму добровільного припинення використання таких речовин. Тому застосування перфторованих ПАР для цілей пожежогасіння є бажаним лише на об'єктах, де можливо проводити збирання та утилізацію речовин, які подано на гасіння.

Водночас можна зауважити, що для традиційних синтетичних піноутворювачів раніше визначені характеристики їх токсичності та екологічної безпеки так само сильно занижені. З урахуванням відомого факту низької ефективності традиційних піноутворювачів, призначених для гасіння горючих рідин у резервуарах, можна зробити висновок, що існуючі піноутворювачі значною мірою не задовольняють вимогам, що висуваються до них, за ефективністю, економічними та екологічними показниками.

З піноутворювачами, в яких закінчився термін експлуатації, необхідно проводити операції *регенерації, утилізації, знешкодження та знищення*.

*Регенерація* – оновлення початкових значень показників якості



піноутворювачів, які відповідають нормативно-технічній документації.

*Утилізація* – використання за іншим призначенням піноутворювачів, що стали непридатними.

*Знешкодження* піноутворювачів – зменшення або усунення небезпеки піноутворювачів або робочих розчинів шляхом їх фізико-хімічної, біологічної та хімічної обробки.

*Знищення* піноутворювачів – вид знешкодження піноутворювачів або їх робочих розчинів шляхом деструкції будь-яким способом із утворенням речовин у концентраціях, безпечних для здоров'я людей та навколишнього середовища.

Для піноутворювачів потрібно щороку здійснювати *контроль якості*. На основі результатів такого контролю приймається рішення щодо регенерації або списання піноутворювачів. Процес регенерації проводять згідно з інструкцією заводу-виробника. У разі неможливості регенерації піноутворювачів, їх можна використовувати у якості змочувача під час гасіння пожеж класу «А». Також деякі піноутворювачі можна застосовувати як водні розчини миючого (знежирюючого) засобу у процесі очищення забруднених металевих поверхонь. Біологічно «м'які» піноутворювачі, що не підлягають регенерації та утилізації, допускається скидати у виробничі стічні води у разі розведення їх водою до гранично допустимої концентрації ПАР, що дорівнює 20 мг/л активної речовини.

### **6.1.3 Стаціонарні установки пожежогасіння резервуарів із горючими рідинами**

Важливим кроком у забезпеченні пожежної безпеки резервуарів стало впровадження стаціонарних установок пожежогасіння з подаванням вогнегасних речовин через засоби, розташовані у верхній частині резервуара. При цьому використовують порошкові, водні, газоподібні та пінні вогнегасні системи. Однак, у більшості випадків, на початковому етапі пожежі стаціонарні засоби пожежогасіння, розташовані у верхній частині резервуара, виходять з ладу. Крім того, навіть у разі збереження їх працездатності відомі лише поодинокі випадки успішного гасіння порошковими, газовими або водними засобами пожежогасіння. Тому розроблено системи, які розташовуються всередині резервуара над або під шаром рідини та мають спрацьовувати в момент початку пожежі. Однак складність цих систем не забезпечує надійності гасіння.

Позитивний та більш надійний результат застосування стаціонарних систем пожежогасіння спостерігається лише у разі застосування вогнегасних пін. Тому часто передбачається оснащення резервуарів для зберігання горючих рідин саме системами пінного пожежогасіння у поєднанні з охолодженням стінок резервуара водою.

Запобігає руйнуванню стаціонарних засобів пожежогасіння їх розташування не у верхній частині резервуара, а у нижній. Так, у 70-х роках минулого століття було розроблено системи підшарового подавання піни. Однак ПУ загального призначення утворюють піну, яка під час спливання крізь шар ГР змішується з нею та руйнується, тому не забезпечується гасіння пожежі та забруднюється сама рідина. Удосконаленням такого застосування піни для пожежогасіння резервуарів стала її подача на поверхню рідини крізь шар за допомогою гнучкого рукава, який знаходиться у нижній частині резервуара. Після початку пожежі вихідна частина гнучкого рукава має спливати на поверхню й подавати піну. Однак на практиці після кількох циклів заповнення–спуску резервуара протягом його експлуатації спостерігалось заломлення рукава та неможливість подачі піни у випадку пожежі.

Наступним важливим етапом вдосконалення пінного пожежогасіння стало впровадження плівкоутворюючих піноутворювачів, робочі розчини яких не змішуються з горючими рідинами у процесі підшарового подавання (виникла можливість подавання безпосередньо, без гнучкого рукава). Вогнегасний ефект при цьому забезпечується завдяки ізолюючим властивостям водного розчину піноутворювача (а не піни), який утворює на поверхні горючої рідини плівку після руйнування піни. Ця водяна плівка деякий час не тоне у рідині та ізолює краще, ніж піна. Роль самої піни в такому разі полягає у доставці робочого розчину на поверхню рідини.

У наш час для гасіння резервуарів із горючими рідинами використовують дві технології подавання повітряно-механічної піни: зверху та крізь шар рідини. Обидва методи вимагають великої кількості вогнегасних речовин та не завжди є ефективними. Причини такого стану питання пожежогасіння горючих рідин наступні: інерційність централізованих систем пожежогасіння, вихід з ладу стаціонарних систем на початковому етапі пожежі, використання режиму ручного пуску, висока вартість сучасних стаціонарних систем пожежогасіння та відповідних резервуарів.

Згідно з нормативними вимогами наземні резервуари для зберігання нафти і нафтопродуктів об'ємом не менше 1000 м<sup>3</sup> обладнують стаціонарно встановленими парогенераторами у верхньому поясі резервуара, в разі обрання верхнього способу подачі піни, або стаціонарними вводами пінопроводів у нижньому поясі – в разі обрання підшарового способу подачі піни. Для резервуарів об'ємом 5000 м<sup>3</sup> і більше регламентується обладнання системами автоматичного пожежогасіння.

Серед способів боротьби з пожежею можна виділити процеси, не пов'язані безпосередньо із процесом пожежогасіння: відкачування і перемішування горючої рідини. Наприклад, використовують *відкачування* горючих рідин із резервуарів, що горять, для скорочення часу вигорання рідини. У результаті можна або полегшити процес гасіння, або замінити його очікуванням повного вигорання залишків рідини. Цей прийом рекомендують проводити під час пожеж у резервуарних парках для успішного гасіння

пожеж у вертикальних сталевих резервуарах, які горять, типу РВС, РВСП або РВСПК у наступних випадках: автоматичні системи пожежогасіння та охолодження резервуара вийшли з ладу, пожежу не вдалося ліквідувати на початковій стадії; нафтопродукти витікають в обвалування під час пошкодження конструкцій; недостатньо ресурсів, сил та засобів для проведення гасіння та охолодження резервуара, який горить, а також для охолодження сусіднього резервуара, що є особливо актуальним для резервуарів великого розміру, а також із частково зруйнованим дахом.

Надійність та безпеку процесу відкачування горючих рідин під час пожеж резервуарів типу РВС, РВСП і РВСПК вважають достатніми, якщо є: висока вогнестійкість мокрої стінки, існують технологічні комунікації для видалення рідини, яка горить, із зони горіння, наявна достатня кількість сил і засобів для охолодження резервуара, що горить, та сусідніх із ним, немає небезпеки вибуху під час процесу відкачування. Однак час відкачування горючої рідини із повного резервуара може становити десятки годин. Цей період буде супроводжуватися втратами пального, водних та пінних засобів пожежогасіння, небезпекою викиду або спінювання у разі наявності у резервуарі води.

*Метод перемішування* ГР пропонує знижувати температуру верхнього шару рідини, де вже досягнута температура кипіння, за рахунок змішування з нижніми холодними шарами. Більш реально реалізувати таке гасіння для висококиплячих рідин, для яких простіше шляхом усереднення знизити температуру поверхні нижче за температуру спалаху. Найпростіші устаткування використовують барботаж об'єму резервуара повітрям.

Також одним зі стаціонарних вогнегасних рішень для резервуарів є *розміщення сіток-вогнеперешкоджувачів* над поверхнею рідини, зокрема покритих речовинами, що спучуються, для перекриття вічок сітки та ізоляції випаровувань із резервуара під час пожежі.

#### **6.1.4 Мобільні засоби пожежогасіння резервуарів**

На початковому етапі пожежі стаціонарні установки пожежогасіння часто виходять з ладу. Тому до ліквідації пожежі залучають підрозділи з пересувними засобами пожежогасіння. Для охолодження стінок резервуара, що горить, і резервуарів, які перебувають у зоні його теплового впливу, застосовують лафетні стволи великої продуктивності та дальності подавання води. Для отримання та подачі піни середньої кратності застосовують піногенератори різної продуктивності від ГПС-200 до ГПС-2000. Їх недоліком є неможливість подачі піни на великі відстані. Так, піногенератор ГПС-2000 М, найкращий за цим показником, забезпечує максимальну дальність подачі піни – 12 м. Для збільшення дальності подачі застосовують механізовані пінопідійомники (Брокто-Скейліфт 35-3, АКП-30, АКП-50) або спеціальні крани з вильотом стріли близько 50 м.

Великі можливості з подачі низькократної піни має система подачі компресійної піни. Також у низці випадків для подачі піни низької кратності можна використовувати стаціонарні лафетні та ручні водопінні стволи (ПЛС-П-205; СВПЕ-4; СВПЕ-8; ЛСД-40А), які забезпечують подачу піни на відстань 18–40 м. Суттєво збільшило дальність подачі піни впровадження УКПТ «Пурга», однак за такої подачі відбувається суттєве її руйнування.

У разі відсутності стаціонарних засобів подачі піни розроблено пристрої для оперативного врізання в технологічні комунікації резервуарів, що здійснюється безпосередньо під час пожежі резервуара.

## **6.2 Гасіння пожеж класу «В» водою, водними розчинами та іншими засобами пожежогасіння охолоджуючої дії**

Вода до цього часу залишається найбільш поширеним засобом гасіння пожеж класу «А». Тривалий час вважали, що вода абсолютно не придатна для гасіння горючих рідин, особливо – водонерозчинних. Після вдосконалення засобів подачі води у розпиленому стані з'явилася можливість гасити пожежі класу «В» у багатьох випадках і водою. Стосовно механізму гасіння горючих рідин розпиленою водою можна зробити такі зауваження:

- гасіння ЛЗР визначається не стільки охолоджуючою дією води на поверхню палива, що горить, скільки випаровуванням крапель води в полум'ї, охолодженням зони горіння та розбавленням пари ЛЗР водяною парою;
- краплі розпиленої води розміром понад 300 мкм вже не забезпечують помітної охолоджуючої дії на зону горіння, а охолоджують тільки верхній шар рідини, що горить, що може забезпечити припинення горіння висококиплячих рідин (ГР).

Незважаючи на принципову можливість гасіння рідин водою, екологічну безпеку та низьку вартість цієї вогнегасної речовини, вода практично не застосовується для гасіння великих резервуарів із рідинами. Це пов'язано з тим, що для успішного гасіння великих за площею поверхонь горючої рідини необхідно створити умови погасання полум'я одночасно над усією поверхнею рідини. Причому ці умови мають бути створені на час, за який нагріті стінки резервуара будуть охолоджені до температури, нижчої за температуру самоспалахування горючої рідини, а її поверхневий шар – до температури, нижчої за її температуру спалаху. Стаціонарно встановлені у верхній частині резервуара розпилювачі у більшості випадків не в змозі вирішити таке завдання. Крім цього, вони часто виходять з ладу через відсутність постійного обслуговування та перевірки працездатності, а також внаслідок вибуху пароповітряної суміші, що зазвичай є першою стадією пожежі. Якщо говорити про пересувні установки пожежогасіння розпиленою водою, то на цей час вони не пристосовані для таких цілей.

Однак водні розчини піноутворювачів та різних солей мають більшу вогнегасну здатність, ніж чиста вода, що можна використати і для гасіння

пожеж класу «В». У довіднику керівника гасіння пожежі зведено дані стосовно відносної вогнегасної ефективності понад 50 водних розчинів, яка становить від 1,4 до 4,5. Рекомендовані концентрації діючих речовин для розчинення у воді змінюються від часток відсотка до 25 %.

Так, 1 %-й водний розчин рідкого натрієвого скла в 1,96 разів є більш ефективним, ніж вода під час гасіння модельного осередку пожежі класу «В». Солі натрію, крім охолодження полум'я розчином, додають ефект інгібування (збільшують енергію активації для ініціювання реакції горіння). Вогнегасні характеристики розпиленої води у 5–10 разів покращують добавки вуглецевих нанотрубок або гелеутворюючих компонентів. Існує збільшення вогнегасних характеристик розчинів зі зростанням концентрації розчиненої речовини. Серед відповідних речовин є токсичні, екологічно небезпечні та дорогі ( $[K_2Fe(CN)_6]$ , KJ, KBr,  $KMnO_4$ ,  $K_2Cr_2O_7$ , фторсинтетичні ПУ).

Тверда гранульована вуглекислота має здатність охолодження горючої рідини до температур, нижчих за температуру спалаху. Хоча густина такого сухого льоду ( $1561 \text{ кг/м}^3$ ) є більшою за густину вуглеводневих рідин (наприклад, для лігроїнової фракції нафти –  $780 \text{ кг/м}^3$ , для гудрону – близько  $1000 \text{ кг/м}^3$ ), він не тоне в них завдяки інтенсивному процесу сублімації (випаровування із твердого стану, минаючи рідкий) з виділенням газоподібного вуглекислого газу. Утворені бульбашки утримують гранули сухого льоду достатньо малого розміру на поверхні рідини. Дещо більші гранули спочатку опускаються на дно резервуару і спливають на поверхню за збільшення розміру (що додає ефект перемішування), але при цьому охолоджуюча дія розподіляється на весь об'єм рідини, що зменшує ефективність вогнегасного засобу. Також біля гранули, особливо для важкокиплячих рідин, виникає ефект капсулювання – утворення в'язкої або твердої оболонки, що заважає теплообміну з рідиною та газифікації гранули.

Додатковий охолоджуючий ефект надає теплота сублімації твердої вуглекислоти ( $590 \text{ кДж/кг}$ , що майже у 4 рази менше, ніж теплота випаровування води –  $2256 \text{ кДж/кг}$ ). Процес сублімації вуглекислоти протікає за рівноважної температури « $-57 \text{ }^\circ\text{C}$ » (температура отримання твердої вуглекислоти – « $-78,5 \text{ }^\circ\text{C}$ »), що дає змогу охолодити поверхневий шар горючих рідин до більш низьких температур, ніж за використання води. Це забезпечує можливість охолодження навіть бензину до температур, нижчих за температури навколишнього середовища та спалаху рідини.

Крім охолоджуючої дії,  $CO_2$ , що утворюється, створює розбавляючу дію на зону горіння, що також гальмує полум'яне горіння. Вуглекислота повністю переходить у газ та після гасіння ніяк не забруднює горючу речовину. Однак для такого гасіння необхідно забезпечити на підприємстві умови зберігання гранул твердої вуглекислоти з постійним та тривалим підтриманням низької температури. Подача твердої вуглекислоти у вигляді снігу не повною мірою використовує можливості для охолодження поверхні, оскільки значна її частина переходить у газову фазу без контакту з рідиною.

### **6.3. Гасіння пожеж горючих рідин вогнегасними порошками та газовими складами інгібіруючої дії**

Порошки загального та спеціального призначення можуть застосовуватися для гасіння пожеж класу «В» в окремих випадках. Порошками загального призначення можна гасити полум'яне горіння аварійних розливів ГР невеликої площі, порошками спеціального призначення – горіння ґрунту, просоченого рідиною, що горить.

Інгібітори горіння, як твердофазні (порошки й аерозолі), так і гази-інгібітори, ефективно припиняють полум'яне горіння рідин. Вони здатні створити умови погасання в зоні горіння за рахунок прямого гальмування реакції горіння. Якщо це вдається зробити в усьому об'ємі зони горіння одночасно, то за відсутності зовнішніх джерел запалювання і температури елементів конструкції резервуара, нижчої за температуру самоспалахування парів, цього буде достатньо для припинення горіння рідини. Однак домогтися цього необхідно на час, достатній для охолодження всіх огорожуючих конструкцій резервуара. Висока інгібуюча дія вогнегасних речовин, як правило, супроводжується низькою охолоджуючою дією та короткочасністю дії. Крім цього, вони відносяться конвекційними потоками або осідають на поверхню рідини. Для організації тривалої дії необхідно продовжувати подачу вогнегасної речовини на час, що гарантує зникнення можливих джерел запалювання. Час природного охолодження розжарених поверхонь до безпечної температури можна прийняти як 1 годину, час штучного охолодження водою – 10 хвилин, що визначає час додаткової подачі інгібуючих (так само, як і для розбавляючих) засобів пожежогасіння. Однак безперервна подача інгібіторів горіння призводить до неприйнятно великого збільшення витрат цих речовин і погіршення економіки такого процесу гасіння.

Так, для гасіння проливів в обвалуванні, міжпальовому просторі під резервуарами, локальних осередків горіння на засувках, фланцевих з'єднаннях, у зазорі між стінками резервуара та плаваючою стріхою допускається застосування порошків з інтенсивністю подавання для нафти і нафтопродуктів  $0,3 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ . Однак наголошується, що для запобігання повторному займанню доцільно потім подати на цю поверхню піну.

Оскільки порошки мають невисоку охолоджуючу здатність, вони можуть добре проявити себе тільки на початковому етапі пожежі, коли не встигають нагрітися огорожуючі конструкції. Другою умовою успішного застосування вогнегасних порошків є невелика площа поверхні рідини, що горить.

Відносно новим варіантом порошкового пожежогасіння є газоаерозольне з використанням аерозолеутворюючих систем (АУС). Під час згоряння цієї піротехнічної композиції утворюються мікрочастинки порошку, які мають підвищену вогнегасну здатність для полум'я завдяки наявності гомогенного інгібування та тривалого зависання цих частинок у повітрі. Розроблено системи

із кріпленням генераторів такого аерозолю у вигляді легких (плавучих) піношашок до даху резервуара. У момент початку пожежі вони падають на поверхню рідини та запалюються від тепла полум'я. Утворюється аерозоль, який припиняє реакції в полум'ї та гасить пожежу.

Гасіння полум'я газоподібними інгібіторами горіння на основі галогенорганічних сполук (хладонів) також забезпечує гальмування реакцій горіння в газовій фазі. Однак цей вогнегасний засіб має низькі охолоджуючі та ізолюючі властивості, які є важливими як супутні під час гасіння ГР і ЛЗР. До того ж газове пожежогасіння є малоефективним на відкритому просторі, а галогенорганіка характеризується екологічною небезпекою. Токсичність процесу гасіння визначається не тільки небезпекою самої вогнегасної речовини, а і продуктів її розкладання в умовах пожежі. Тому найефективніші газоподібні інгібітори горіння потрапили під дію Монреальського протоколу, який обмежує їх використання. Ще одним істотним недоліком газоподібних інгібіторів горіння є їхня висока вартість та великі витрати на встановлення обладнання для подачі вогнегасної речовини. Проте наявні технічні рішення не дозволяють використовувати такі засоби пожежогасіння для припинення горіння на середніх та великих пожежах горючих рідин.

#### **6.4 Комбіновані методи гасіння горючих рідин**

Усі вогнегасні речовини справляють на процес горіння комплексну дію, яка комбінується з ізолюючою, охолоджуючою, розбавляючою та інгібуючою складових. При цьому домінуючим є один із перерахованих механізмів. Проте у деяких випадках цілеспрямовано використовується сумарна дія властивостей вогнегасної речовини, основана на різному впливі на процес пожежі різних вогнегасних компонентів у її складі.

Перспективними системами можна назвати *гасіння піносклом, гелеутворюючими складами* та їх комбінаціями. Піноскло має закриті пори, а тому виявляється плавучим у більшості горючих рідин. Однак для самостійного гасіння його охолоджуючих та ізолюючих властивостей у більшості випадків виявляється недостатньо. Гелі добре охолоджують та ізолюють тверді поверхні, мають тривалу дію, мають достатні економічні та екологічні показники гасіння, проте вони тонуть у рідинах. Тому означені засоби для гасіння пожеж класу «В» частіше використовують у комбінації один з одним або з іншими вогнегасними засобами.

Гелеутворюючі вогнегасні системи являють собою бінарний склад, компоненти якого окремо зберігаються та окремо, але одночасно подаються. Ці компоненти зберігаються у вигляді розчинів, що полегшує зберігання та подачу в зону горіння. Відповідні склади добирають таким чином, що під час їх змішування в процесі польоту або на цільових поверхнях між компонентами відбувається хімічна взаємодія зі швидким утворенням нетекучого гелеподібного водовмісного шару. Саме вода й забезпечує

основну частку ізолюючої здатності гелю. Але й після висихання утворюється твердий пористий шар, який має ізолюючі властивості.

Найкращі вогнегасні властивості показали гелеутворюючі системи із полісилікатом натрію в якості основної речовини та амонійних солей або солей дво- і тривалентних металів у якості каталізатора гелеутворення. Безпосередньо використовувати ГУС для гасіння горючих рідин неможливо, оскільки гель тоне в більшості горючих рідин. Газонаповнений гель має кращу плавучість, однак і він незабаром тоне. Найкращі результати дає нанесення шару гелю на поверхню піни. Однак максимальний час плавучості гелю в цьому разі не перевищує 15 хвилин. Випробувано нанесення шару гелю на шар гранул пінополістиролу, однак такий метод ізоляції більшою мірою підходить для запобігання утворенню вибухонебезпечної хмари, ніж для гасіння пожежі. Як легкий носій, що забезпечує плавучість гелеподібного шару, доцільно використовувати тверді пористі матеріали (керамзит, спучений перліт або вермикуліт, гранульоване або подрібнене піноскло).

Виходячи з умов проведення пожежогасіння легкозаймистих рідин, для подачі легких негорючих пористих матеріалів рекомендовано використання струменевих ежекційних апаратів (рис. 6.1).

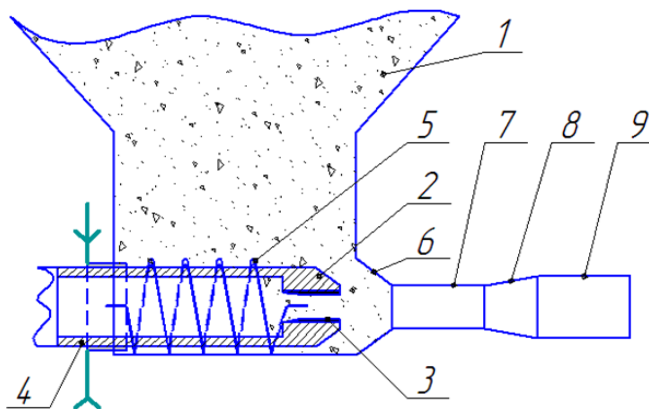


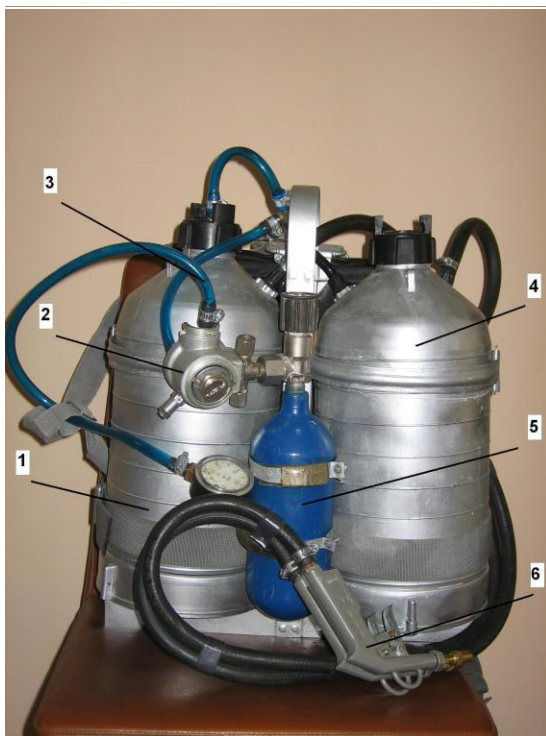
Рис. 6.1 – Схема ежекційної установки подавання зернистого матеріалу:  
1 – бункер піноскла; 2 – шнековий дозатор; 3, 4 – сопло та привід дозатора;  
5 – ворухитель пружинного типу; 6 – конфузур; 7 – камера змішування;  
8 – дифузур; 9 – фланець під'єднання рукавної лінії матеріалопроводу

Такі апарати мають високу надійність за умов безперервного режиму роботи. Безперервність дії забезпечується вузлом живлення, дозування, ворухіння піноскла у вигляді гвинтової поверхні (шнека). Подача піноскла проводиться з використанням стисненого повітря гумовотканинними рукавами на відстань до 75 м. Пожежогасіння може здійснюватися на висоті з використанням спецтехніки (автодрабин, колінчастих підйомників); залежно від розміру фракцій піноскла внутрішній діаметр матеріалопроводу може бути прийнятий від 38 до 68 мм. Малогабаритність установки забезпечує зручність її розміщення, перевезення, швидкого оперативного розгортання та ефективного використання за мінімальної кількості задіяних рятівників.

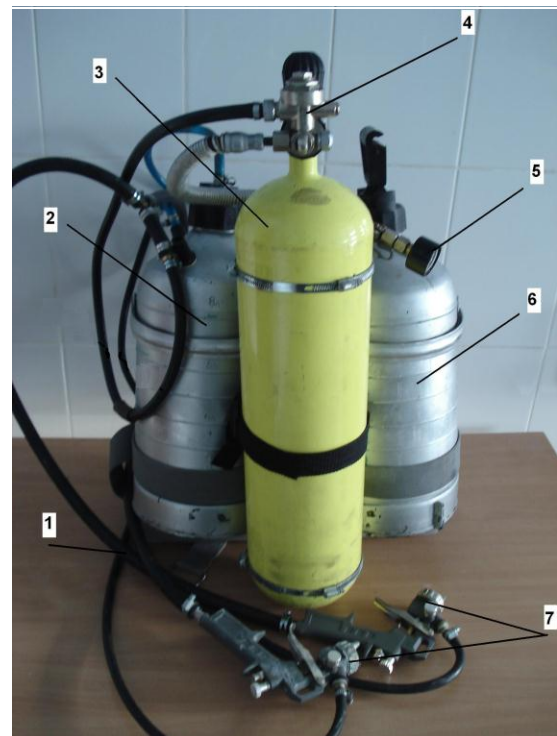


Пневматичний компресор подає стиснене повітря з тиском приблизно 0,5 МПа через порожнистий шнековий дозатор в ежекційну змішувальну камеру; гранули піноскла приводяться у звишений стан ворухителем та спрямовуються у конфузори. Завдяки розрідженню у конфузори, гранули піноскла засмоктуються у змішувальну камеру та далі транспортуються матеріалопроводом й подаються у зону горіння.

У разі використання піноскла у якості ізолюючої вогнегасної речовини важко досягти повного припинення горіння, але горіння значно слабшає. Тоді припинення слабого горіння крізь шар піноскла можна здійснювали різними засобами, наприклад, охолоджуючо-ізолюючим засобом пожежогасіння з використанням гелеутворюючої системи (ГУС). Для гасіння на невеликих площах пожежі можна використовувати автономні установки гасіння гелеутворюючими системами «АУТГУС» (рис. 6.2, а) та «АУТГУС-П» (рис. 6.2, б).



а)



б)

Рис. 6.2 – Автономні установки пожежогасіння гелеутворюючими складами:

а) АУТГУС: 1 – розчин гелеутворювача; 2 – редуктор; 3 – гнучкі шланги; 4 – розчин каталізатора гелеутворення; 5 – стиснене повітря; 6 – стволи з пістолетними ручками;

б) АУТГУС-П: 1 – гнучкі шланги; 2 – розчин гелеутворювача; 3 – стиснене повітря; 4 – редуктор; 5 – манометр; 6 – розчин каталізатора гелеутворення; 7 – форсунки

За цим методом на цільову поверхню наносять шляхом розпилення два розчини, які реагують з утворенням в'язкого негорючого гелю. Зазначений спосіб завершення гасіння має перевагу в тому, що над горючою рідиною утворюється суцільне гелеве ізолююче покриття, яке до 3 діб запобігає можливості утворення вибухонебезпечних концентрацій та небезпеці

повторного загоряння. Однією з умов успішного використання ГУС для пожежогасіння є подача компонентів системи в розпорошеному вигляді.

Загальна маса компонентів ГУС в обох установках становить 12 кг (по 6 кг гелеутворювача та каталізатора гелеутворення). Загальна маса повністю заправлених установок «АУТГУС» та «АУТГУС-П» становить 20 та 28 кг відповідно. Максимальна дальність подачі розчинів для установки АУТГУС становить 5 м з гідравлічним розпиленням розчинів, для АУТГУС-П 7 м із пневматичним розпиленням розчинів. Стиснуте повітря установки «АУТГУС-П» надає можливість її використання разом з ізолюючим протигазом. Запасу стиснутого повітря в балоні вистачає на розпилення розчинів та дихання протягом щонайменше 20 хв.

Підготовка установок до роботи полягає у заповненні ємностей через верхні горловини рідкими компонентами ГУС та закачуванні повітря в балон високого тиску до досягнення тиску 20 МПа. Установки АУТГУС і АУТГУС-П можуть бути використані під час гасіння пожеж класу «В» для гасіння пожеж аварійних розливів або резервуарів невеликих розмірів. З урахуванням необхідної поверхневої витрати ГУС 3 кг/м<sup>2</sup> (з урахуванням коефіцієнта запасу 1,5) площа поверхні рідини, яку можна загасити (попередньо створивши необхідний шар піноскла), складе:  $S = 12/3 = 4 \text{ м}^2$ .

Для гасіння великих резервуарів і великих за площею розливів необхідно використовувати такі засоби подачі, які забезпечують більшу дальність подачі та витрату вогнегасної речовини. До таких засобів подачі належать стволи-розпилювачі або стволи з комбінованими насадками (РС-Ам, РС-Бм, РСК-50, НРТ-5, НРТ-10, НРТ-12, РВ-12).

## **6.5 Порівняльна характеристика вогнегасних засобів гасіння пожеж класу «В»**

Вогнегасні речовини, згідно з особливостями подачі та застосування, можна поділити на види: *твердофазні, рідиннофазні, газофазні, аерозольні та водопінні*. Кожен з цих видів має свої переваги та недоліки, свої сфери найбільш ефективного застосування. Вибір оптимальної вогнегасної речовини для гасіння ГР визначається великою кількістю чинників. Насамперед, це летючість ГР. Найбільші труднощі під час гасіння пожеж класу «В» становлять ЛЗР. Важливими характеристиками рідин, що впливають на їх гасіння, є теплота згоряння, густина, теплопровідність, теплоємність, в'язкість і розчинність у воді. Істотно впливають на гасіння розмір, конструкція і форма резервуара, а також матеріал, з якого він виготовлений. Також важливими для успішного гасіння є зовнішні чинники: температура та вологість повітря, швидкість та напрямок вітру.

*Рідкофазні вогнегасні засоби*, основним серед яких є вода, мають високу охолоджуючу дію. Однак для максимального задіяння охолоджуючої дії необхідна подача води в розпорошеному вигляді, що ускладнює гасіння

пожежі на великих відстанях. Цей самий фактор визначає труднощі гасіння рідини в резервуарах із великою площею горіння. Ще одним із недоліків рідкофазних вогнегасних речовин є їх малий час дії – дрібні краплі води швидко випаровуються у зоні горіння, а у разі досягнення поверхні рідини, що горить, у більшості випадків швидко тонуть у рідині. Це ускладнює створення умов гасіння на необхідний період та створює небезпеку спінювання під час гасіння висококиплячих рідин. Для водорозчинних горючих рідин можливе гасіння шляхом подачі води для розбавлення горючої рідини до негорючого стану. Однак для досягнення такого ефекту необхідне багатократне розбавлення та відповідне збільшення рівня горючої рідини, що на відкритому просторі призведе до збільшення площі аварійного розливу, а в резервуарі – до переливу. В обох випадках під час такого гасіння може збільшитися площа пожежі.

*Газофазні та аерозольні вогнегасні засоби* у більшості випадків є неефективними під час гасіння пожеж класу «В» через низьку охолоджуючу дію, великі втрати під час гасіння пожеж на відкритому просторі та малий час вогнегасної дії. Газоподібні та газоаерозольні інгібітори горіння частково компенсують ці недоліки за рахунок більш інтенсивного гальмування хімічної реакції та швидкого припинення полум'яного горіння. Однак до їх недоліків додається висока вартість та токсичність газоподібних інгібіторів.

*Водопінні вогнегасні засоби* залишаються найбільш затребуваними вогнегасними речовинами для гасіння горючих рідин. Насамперед це пояснюється їх високими ізолюючими властивостями та відносно тривалим часом вогнегасної дії. Також вони мають більшу охолоджуючу дію, ніж інші види вогнегасних речовин, крім рідиннофазних. До недоліків водопінних вогнегасних засобів відносяться: проблеми з подачею на великі відстані; руйнування пін у часі; токсичність та екологічна небезпека багатьох піноутворювачів; висока вартість ПУ, особливо плівкоутворюючих; забруднення горючих рідин піноутворювачами, що вимагає додаткового очищення та обмежує їх подальше використання.

У табл. 6.1 наведено дані щодо основних характеристик різних типів вогнегасних речовин, які можна використовувати для гасіння пожеж класу «В». Під час гасіння таких пожеж однією з основних умов успішного гасіння є забезпечення на всій поверхні горючої рідини умови припинення горіння. Відсутність таких умов навіть над малою частиною поверхні призводить до подальшого поширення горіння на всю поверхню рідини. Також потрібно, щоб тривалість умови відсутності горіння була достатньою для охолодження розпечених поверхонь, які контактують із ділянкою, де концентрація парів горючих речовин може перевищувати нижню концентраційну межу поширення полум'я. Охолодження поверхонь в умовах природного теплообміну займає десятки хвилин. У разі примусового охолодження, наприклад, під час подачі води на стінки резервуара, цей час може бути зменшено до 5–10 хвилин.

Таблиця 6.1 – Основні вогнегасні характеристики різних засобів гасіння для пожеж класу «В»

Тип ВР	Параметр характеристики вогнегасних речовин (ВР)							
	охолодження	ізоляція	розведення	інгібування	екол. безпека	економ. гасіння	коєф. викор.	час дії
вода	++	–	±	–	++	++	–	–
розчини	++	–	+	++	±	+	–	–
піни	±	++	±	–	–	–	±	+
інші системи піноутвор.	±	++	±	–	–	–	±	±
твердіючі піни	±	++	±	–	–	–	++	++
порошки	–	–	–	++	±	±	–	–
аерозолі	–	–	–	++	±	±	–	–
гази-розріджувачі	–	–	+	–	+	±	–	–
гази-інгібітори	–	–	+	++	–	±	–	–
ГУС	++	++	±	–	+	+	++	++

++ – дуже високий, + – високий, ± – середній, – – низький.

Такі складові вогнегасної дії, як розбавлення та інгібування, можуть привести до надійного припинення горіння, якщо у великому об'ємі парової фази над поверхнею рідини буде на тривалий час забезпечено вогнегасну концентрацію вогнегасної речовини. Ці умови відносно легко створити для невеликих осередків горіння з низьким газообміном. Однак у таких умовах процес природного охолодження займе великий час.

Надійне створення умов забезпечення відсутності можливості повторного займання найшвидше здійснюється за допомогою вогнегасних речовин із високою охолоджуючою дією. Більш ефективних результатів досягають із використанням води або водних розчинів.

Таблиця 6.1 показує, що повним комплексом необхідних властивостей не володіє жоден тип вогнегасної речовини. Найбільш універсальними та ефективними вогнегасними речовинами під час гасіння пожеж класу «В» є засоби з високою ізолюючою дією (піни, піни, що тверднуть, піноутворюючі склади, гелі з піносклом у якості плавучого носія). Одночасно для них є характерними вищі коефіцієнти використання, порівняно з іншими вогнегасними речовинами, тобто досягається процес гасіння з помірними витратами вогнегасної речовини. Також за охолоджуючою дією вони переважають більшість засобів пожежогасіння, крім води та водних розчинів.

## 6.6 Вимоги до вогнегасних систем для гасіння пожеж класу «В»

Виходячи із загальних положень, вогнегасний засіб для гасіння пожеж повинен характеризуватися високою вогнегасною здатністю, незначною витратою, безпекою для людей, природи й устаткування, простотою та зручністю подачі в осередок пожежі, можливістю тривалого зберігання без зміни властивостей, економічністю та екологічністю процесу гасіння, можливістю мати достатні запаси цієї речовини з тривалим терміном зберігання без втрати вогнегасних властивостей. Для гасіння пожеж рідин першочерговою задачею є створення вогнегасних ефектів у поверхневому шарі рідини або біля цієї поверхні. Тому до багатьох вогнегасних засобів виникає ще одна вимога – плавучість. Небезпека повторного займання рідини потребує достатнього періоду вогнегасної дії певного засобу.

Найкращих результатів у підвищенні ефективності вогнегасних засобів можна досягти шляхом розробки вогнегасних речовин, у яких максимально задіюються всі основні механізми припинення горіння. Однак досягти максимального внеску всіх механізмів припинення горіння на практиці неможливо. Внесок кожної складової можна змінювати, виходячи з якісного і кількісного складу вогнегасного засобу.

Ще однією проблемою під час вибору (розробки) вогнегасної речовини з максимальними (оптимальними) вогнегасними властивостями є труднощі в теоретичному вираженні кількісних характеристик для різних складових вогнегасної дії. Тільки охолоджуюча дія вогнегасних речовин відносно легко піддається кількісному вираженню. Для багатокomпонентних систем виникають проблеми хімічної сумісності складових та їх взаємного впливу на властивості системи як цілого і на окремі внески вогнегасної дії. Крім того, охолоджуюча, розбавляюча, ізолююча, екрануюча та інгібуюча дії часто є взаємозалежними. Тому процес розрахункового визначення загальної вогнегасної здатності виявляється складним та важкозастосовним для практичних розрахунків.

Виходячи з викладеного, вогнегасна дія всіх засобів пожежогасіння визначається за домінуючим механізмом припинення горіння. Далі проводиться оптимізація ефективності використання даного механізму дії для даної вогнегасної системи, наприклад, за параметром «оптимальна інтенсивність подачі», за якої досягається мінімальна витрата даного вогнегасного засобу для досягнення ефекту пожежогасіння. Потім можна звернути увагу на внески інших складових у вогнегасну дію. На підставі такого покрокового процесу добору складу вогнегасного засобу можна домогтися підвищених вогнегасних та екологічних характеристик.

Для гасіння горючих рідин вимоги до механізму пожежогасіння можна сформулювати наступним чином:

- методи гасіння пожеж горючих рідин, які не застосовують ізоляції поверхні рідини, важко реалізуються під час гасіння резервуарів великих розмірів;

- ефективний вогнегасний засіб повинен забезпечити створення умов гасіння одночасно над усією поверхнею на час, достатній для охолодження нагрітих конструкцій резервуара до температури, нижчої за температуру самоспалахування;
- процес гасіння має характеризуватися прийнятними токсико-екологічними та економічними параметрами.

Тобто найважливішим фактором під час гасіння ГР та ЛЗР є ізолюючі та охолоджуючі властивості вогнегасних речовин. З наявних засобів пожежогасіння найбільшою мірою цією властивістю характеризуються піни, піни, що тверднуть, піноутворюючі склади із зовнішнім піноутворенням, тверді плавучі комбіновані системи пожежогасіння.

Для створення вогнегасної системи із кращими вогнегасними характеристиками, ніж у пін, необхідно забезпечити такі характеристики: високі ізолюючі, екрануючі та охолоджуючі властивості, час дії понад 10 хв. за умови штучного охолодження резервуара та більше, ніж 1 год., за його природного охолодження. Тривалий термін дії вогнегасного засобу досягається у разі використання пін із більшою стійкістю та ізолюючих матеріалів із тривалою плавучістю на поверхні рідин.

Перші три властивості може забезпечити гелеподібний шар. Останню умову можна забезпечити подачею на поверхню рідини легшого за неї (з меншою уявною густиною) матеріалу. За наявності матеріалу із тривалою плавучістю, але низькими ізолюючими властивостями можна говорити про неінтенсивне стаціонарне горіння над поверхнею цього плавучого шару. Тоді завершення гасіння можна досягти навіть екологічно безпечною піною, а також ефективними охолоджуючими, розбавляючими або інгібуючими засобами для припинення полум'яного горіння.

Таким чином, вогнегасна система для гасіння рідин повинна мати більш високі та подовжені у часі ізолюючі характеристики, ніж у пін, що може забезпечити система з двох шарів: нижній – легкий носій, а верхній – шар гелю (або порошки загального призначення, порошки спеціального призначення, дрібні гранули з інгібіруючим ефектом, склади, що спучуються). Для рідин із температурою займання вище 100 °С ефект гасіння можна забезпечити тільки за рахунок ефекту охолодження. У такому разі немає потреби у високих ізолюючих властивостях засобу пожежогасіння. Як речовину з високими охолоджуючими властивостями доцільно застосовувати воду або засоби на водній основі. Однак при цьому необхідно забезпечити тривалий контакт води з верхнім нагрітим шаром рідини, чого шляхом прямої подачі води досягти неможливо; крім того, при цьому може виникнути небезпека спінювання або викиду горючої рідини. Але використання піноскла як плавучої системи з відкритими зовнішніми порами може допомогти у цьому напрямі: змочене піноскло має підвищені охолоджуючі властивості та ефективно гасить важкокиплячі рідини.

### **Запитання для самостійної перевірки знань:**

1. Опишіть теоретично можливі способи гасіння пожеж рідин у резервуарах.
2. Охарактеризуйте ефективність гасіння пожеж пінами на практиці.
3. Чим визначається час дії вогнегасної речовини?
4. Розкрийте проблемні питання пінного пожежогасіння.
5. Охарактеризуйте технології спінювання розчинів в осередку горіння.
6. Назвіть переваги плівкоутворюючих піноутворювачів.
7. Укажіть проблеми гасіння полярних рідин.
8. Розкрийте екологічні аспекти пінного пожежогасіння.
9. Розкрийте особливості застосування стаціонарних установок пінного пожежогасіння.
10. Розкрийте особливості застосування мобільних засобів пінного пожежогасіння.
11. Охарактеризуйте механізм гасіння полум'я рідин розпиленою водою.
12. Як відбувається припинення горіння рідин твердою вуглекислою?
13. Як відбувається гасіння пожеж рідин інгібіторами полум'яного горіння?
14. Розкрийте особливості застосування комбінованих методів гасіння пожеж рідин.
15. Як влаштовані системи подавання зернистих матеріалів та гелів на гасіння пожеж рідин?
16. Розкрийте переваги та недоліки різних методів гасіння рідин.
17. Наведіть прогнозовані вимоги до оптимального засобу пожежогасіння рідин.
18. Охарактеризуйте перспективні шляхи підвищення ефективності та екологічної безпеки гасіння пожеж рідин.

### **Література для самопідготовки та поглибленого вивчення розділу:**

2, 10, 18, 26–32, 34, 36, 48, 49, 54, 58, 64, 66, 68, 70

## РОЗДІЛ 7. ГАСІННЯ ПОЖЕЖ КЛАСУ «В» ПЛАВУЧИМИ ВОГНЕГАСНИМИ СИСТЕМАМИ ПОДОВЖЕНОЇ ДІЇ

### 7.1 Достатність плавучості ізолюючих вогнегасних засобів

Типовими плавучими ізолюючими засобами для пожеж класу «В» є піни середньої кратності. Однак на великих пожежах піна руйнується дуже інтенсивно, що призводить до великих витрат піноутворювача або взагалі не дає можливості досягти припинення горіння. Сучасними плавучими ізолюючими засобами є розчини піноутворювачів на основі перфторалканів, шар яких формують на поверхні рідини шляхом подачі низькократної піни. При цьому ізолюючу дію справляє плівка розчину, яка певний час залишається цілісною та не занурюється під шар горючої рідини. З одного боку, ізолюючі властивості водної плівки є кращими, ніж піни з такою самою кількістю води, з іншого – плівкові піноутворювачі мають погані екологічні показники та іноді – недостатній час дії для гарантії відсутності повторного займання.

Умовно плавучими можна також вважати гранули твердої вуглекислоти, які залишаються на поверхні завдяки активному перетворенню на газ (сублімації). Тобто уявна щільність бульбашки  $\text{CO}_2$  із гранулою вуглекислоти в центрі може виявитися меншою, ніж густина горючої рідини.

Можливо використовувати легкий пористий твердий матеріал, шар якого забезпечить тривалу первинну ізоляцію процесу випаровування, екранування рідини від прогрівання випромінюванням та полегшені умови для завершення гасіння полум'яного горіння. Оскільки частина такого матеріалу зануриться під шар рідини під власною вагою та вагою передбаченого зовнішнього засобу завершення гасіння у вигляді шару піни або гелю, то для легких нафтопродуктів (наприклад, бензину) густина плавучого негорючого носія має бути меншою за  $286 \text{ кг/м}^3$ , а для важких нафтопродуктів (наприклад, дизельного палива, нафти) –  $600\text{--}700 \text{ кг/м}^3$ . Таким вимогам відповідають багато пористих неорганічних матеріалів: спучені перліт та вермикуліт, піноскло, пемза, керамзит, газо- та пінобетон, черепашник, порожнисті скляні мікросфери. Однак деякі з цих матеріалів мають відкриті пори, в які може проникати горюча рідина, що не надає властивостей пористому матеріалу довго триматися на плаву й утримувати зовнішній вогнегасний шар.

В якості плавучого носія добре себе зарекомендувало закритопористе піноскло – легкий пористий матеріал у вигляді затверділої скляної піни. Його перевагами є неорганічний негорючий склад, що забезпечує пожежну безпеку, стійкість до впливу високих температур, вологи та неможливість розвитку мікроорганізмів у його середовищі. Загалом ці властивості забезпечують можливість тривалого зберігання даного матеріалу без зміни технологічно важливих параметрів.



Плавучість легкого носія можна визначити як частку висоти шару матеріалу, яка залишається над поверхнею рідини, за формулою:

$$\Pi = \frac{h \uparrow}{h_{\text{заг}}} = \frac{h \uparrow}{h \uparrow + h \downarrow}, \quad (7.1)$$

де  $h_{\text{заг}}$  – загальна товщина шару твердого пористого матеріалу;  $h \uparrow$  – висота цього шару над поверхнею рідини;  $h \downarrow$  – висота цього шару, який виявляється зануреним у рідину.

Тоді висота шару твердого пористого матеріалу над рівнем рідини, що визначає його ізолюючу здатність, буде становити:

$$h \uparrow = h_{\text{заг}} \Pi, \quad (7.2)$$

а висота шару цього матеріалу, який виявляється зануреним у рідину, що визначає його охолоджуючу здатність, становитиме:

$$h \downarrow = h_{\text{заг}}(1 - \Pi). \quad (7.3)$$

Співвідношення  $h \uparrow / h \downarrow$  визначає баланс ізолюючих та охолоджуючих властивостей твердого пористого матеріалу в даному випадку. У табл. 7.1 наведено дані стосовно плавучості піноскла (ПС).

Таблиця 7.1 – Плавучість сухого ( $\Pi_{\text{сух}}$ ) та змоченого ПС ( $\Pi_1$ ) у рідинах

Рідина	Гранули 1,5–2,5 см		Гранули 2,5–4,0 см	
	$\Pi_{\text{сух}}$	$\Pi_1$	$\Pi_{\text{сух}}$	$\Pi_1$
Бензин	0,55	0,32	0,57	0,34
Уайт-спірит	0,56	0,32	0,57	0,34
Гас	0,59	0,47	0,62	0,48
Дизельне паливо	0,62	0,51	0,64	0,55
Машинне мастило (I-20)	0,62	0,52	0,64	0,55

Можливість застосування ПС у якості ізолюючого засобу та плавучого носія визначає наявність закритих пор. Наявність зовнішніх відкритих пор і мала густина ГР обмежують використання ПС для гасіння пожеж класу «В». Так, для пентану, рідини з найменшою густиною, плавучість становить 0,36. Плавучість сухого піноскла є більшою для більших гранул, оскільки у них виявляється меншою частка зовнішніх відкритих пор. Змочене піноскло має меншу плавучість, тобто більше занурюється, що, з урахуванням змоченості водою, значно посилює охолоджуючий ефект зануреного шару, але зменшує ізолюючий ефект.

Ізолюючі властивості ПС для обмеження дифузії пари є слабкими, тому для цього потрібно створювати або великі ізолюючі шари, або завершувати припинення послабленого горіння іншими засобами. Наприклад, за рахунок

формування на шарі ПС шару гелю, який має значно вищі ізолюючі властивості. Однак маса гелю зменшує плавучість піноскла.

Цілісний шар гелю утворюється в умовах набризкування компонентів ГУС на суцільні поверхні у розпиленому вигляді за його питомої поверхневої витрати 0,13–0,14 г/см<sup>2</sup>. У разі нанесення шару гелю на поверхню шару ПС для утворення суцільного шару потрібне заповнення проміжків між гранулами. Це потребує більшої витрати компонентів вогнегасної речовини та залежить від фракційного складу подрібненого піноскла. Так, для формування суцільного шару гелю на фракції ПС 1,0–1,5 см витрата збільшується у 5 разів, під час подачі на фракцію 2,5–4,0 см – у 10 разів, ніж для рівної поверхні. Таким чином, незважаючи на кращу плавучість у фракції 2,5–4,0 см, вона потребує більшої витрати гелю для завершення гасіння, а отже, і більшої кількості ПС для утримання такого шару гелю (табл. 7.2).

Таблиця 7.2 – Товщина шару ПС, що забезпечує плавучість суцільного шару гелю (h) для різних розмірів гранул ПС під час гасіння різних рідин

Розмір гранул, см	h, см		
	бензин	гас	дизельне паливо
1–1,5	15	10	10
1,5–2,5	20	15	15
2,5–4,0	25	20	15

Тобто під час подачі гелю на піноскло воно занурюється у рідину, але гель не повинен опинитися зануреним у рідину, оскільки почне інтенсивніше транспортувати крізь себе горючу рідину. За таких умов ізолюючі властивості даної системи будуть реалізовані повною мірою. У такому разі майже 100 % піноскла створює охолоджуючу дію на поверхню рідини, що горить, а гель виконує ізолюючу функцію для зменшення концентрації горючої пари нижче НКМПП та для припинення полум'яного горіння. Ця система буде залишатися у такому стані не менше кількох годин, що достатньо для гарантування відсутності відновлення горіння. Деякі гранули піноскла, внаслідок наявності дефектів, через деякий час просочуються рідиною та втрачають плавучість (починають тонути). Тому і вся двошарова система почне занурюватися, а ізолююча дія буде слабшати.

## 7.2 Ізолюючі властивості гелів під час гасіння пожеж класу «В»

Найкращі результати завершення гасіння після подачі шару піноскла показали такі ГУС, які мають малі витрати гелеутворюючих компонентів – полісилікату натрію та каталізаторів гелеутворення (CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>, MgSO<sub>4</sub>). Характер середовища цих каталізаторів гелеутворення слабокислий (pH≈5), а самі солі належать до 3 та 4-го класів небезпеки, як і рідке скло. В якості каталізатора гелеутворення частіше використовують 3 % -й розчин CaCl<sub>2</sub>. При цьому всі компоненти ГУС є речовинами нерозчинними у вуглеводневих

горючих рідинах, тобто не забруднюють їх під час гасіння, тому відсутня необхідність складного очищення горючої рідини після гасіння.

За масою гелю, який подають на відому площу (пожежі), можна визначати питому поверхневу витрату гелю ( $\Phi$ ):

$$\Phi = m/S, \quad (7.4)$$

де  $m$  – маса гелю;  $S$  – площа поверхні, що покривається шаром гелю.

Тверда фаза, з якої побудований каркас гелю, становить лише 2,3 5% за масою, або 0,85 % за об'ємом (густина полісилікатів кальцію становить близько 2800 кг/м<sup>3</sup>). Малий вміст твердої фази та розчинених речовин у складі гелю вказує на те, що коефіцієнти дифузії розчинених у ньому речовин повинні мати близькі значення до відповідних показників для водних розчинів. Тому ізолюючі властивості гелю є близькими до ізолюючих властивостей такого ж за товщиною шару води.

Суцільні гелеподібні шари зменшують швидкість випаровування горючих органічних рідин. Найбільші ізолюючі властивості гелеві шари проявляють відносно рідин, погано розчинних у воді. Для вуглеводневих рідин *коефіцієнт уповільнення випаровування* мінімально можливого суцільного шару гелю становить 26–35 (табл. 7.3). При цьому склад гелю мало впливає на його ізолюючі властивості.

Таблиця 7.3 – Коефіцієнти уповільнення випаровування рідин шаром гелю

Рідина	Розчинність у воді, % мас	$K$
Гель	ГУС CaCl <sub>2</sub> (10%)+Na <sub>2</sub> O·2,7SiO <sub>2</sub> (10%)	
бензин	~0	27,6
ізопропанол	необмежена	1,6
ізопентанол	2,7	2,4
метанол	необмежена	2,6
1,2-дихлоретан	0,86	9,1
бензол	0,18	33,8
Гель	ГУС CaCl <sub>2</sub> (5%)+Na <sub>2</sub> O·2,7SiO <sub>2</sub> (5%)	
бензин	~0	26,7
бензол	0,18	33,8
Гель	ГУС CaCl <sub>2</sub> (20%)+Na <sub>2</sub> O·2,7SiO <sub>2</sub> (20%)	
бензин	~0	28,1
бензол	0,18	35,9

*Ефективність* ізоляції шаром гелю залежить від витрати гелю (зміна товщини шару) та температури середовища. У табл. 7.4 наведено ізолюючі характеристики гелю через 1 годину та через 24 години ( $K_1$  і  $K_{24}$ ). Підвищення ізолюючих властивостей гелевих шарів можна досягти завдяки збільшенню товщини шару, введенню до складу гелю спеціальних речовин для зменшення розчинності горючих рідин у воді, підвищенню

в'язкості рідкої фази гелю, збільшенню частки твердої фази у складі гелю. На випаровування рідини впливає наявність та сила вітру, а також висота бортів резервуара. Вплив вітру на швидкість випаровування горючих рідин крізь гелі наведено на рис. 7.1.

Таблиця 7.4 – Коефіцієнти уповільнення випаровування горючих рідин шаром гелю за різних витрат і температур

Горюча рідина	t, °C	Поверхнева витрата гелю, $\Phi$ , г/см <sup>2</sup>					
		0,13 г/см <sup>2</sup>		0,25 г/см <sup>2</sup>		0,40 г/см <sup>2</sup>	
		$K_1$	$K_{24}$	$K_1$	$K_{24}$	$K_1$	$K_{24}$
бензол	15	29	15	33	23	37	32
	20	34	16	36	24	37	30
	25	33	14	35	24	38	30
бензин	15	30	11	35	19	37	28
	20	28	10	33	20	37	29
	25	31	9,5	34	18	34	26
1,2-дихлоретан	15	11	5,3	12	7,7	14	12
	20	9,1	4,2	11	7,8	12	11
	25	9,7	4,6	12	8,4	14	12
ізопропанол	15	1,8	1,4	2,6	2,0	2,8	2,6
	20	1,6	1,4	2,5	1,8	2,9	2,7
	25	1,7	1,3	2,8	2,1	2,7	2,6

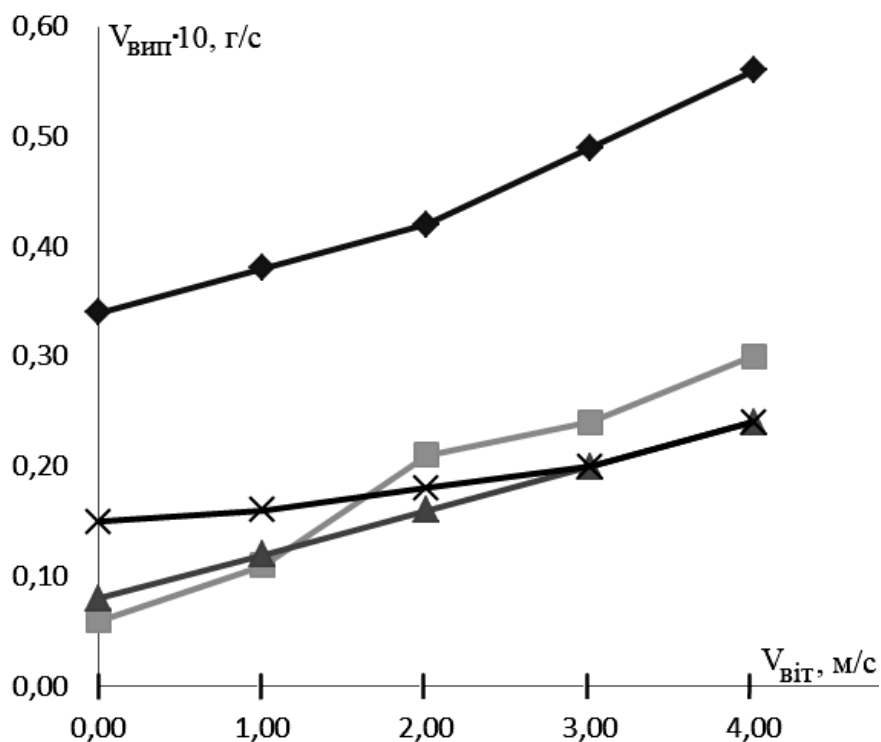


Рис. 7.1 – Залежність швидкості випаровування рідин крізь шар гелю від швидкості вітру:  $\blacklozenge$  – бензин,  $\times$  – дихлоретан,  $\blacksquare$  – бензол,  $\blacktriangle$  – пропанол-2

За відсутності повітряного потоку висота борту сильно впливає на швидкість випаровування рідини з вільної поверхні. Але за наявності ізолюючого шару гелю над поверхнею рідини швидкість випаровування слабо залежить від висоти вільного борту. Як і для вільної поверхні, швидкість випаровування рідин крізь шар гелю зростає за збільшення швидкості повітряного потоку, але це збільшення відбувається значно менш інтенсивно. Це означає, що із посиленням вітрового навантаження коефіцієнти уповільнення випаровування гелем мають зростати, що підтверджують дані, наведені у табл. 7.5.

Таблиця 7.5 – Коефіцієнти уповільнення випаровування рідин шаром гелю за різних швидкостей повітряного потоку

Швидкість вітру, $V_{\text{віт}}$ , м/с	Коефіцієнт уповільнення випаровування, $K$			
	бензин	бензол	ізопропанол	1,2-дихлоретан
0	8,9	13,0	2,1	6,3
1	21,6	33,6	7,7	32,7
2	28,8	31,1	11,3	45,3
3	31,6	34,2	17,1	45,7
4	33,4	34,3	18,4	53,1

Таким чином, гелеподібні шари зменшують швидкість випаровування горючих органічних рідин. Ефективність використання гелеподібних шарів збільшується зі зростанням швидкості вітру. За швидкості вітру 4 м/с ізолюючі властивості гелеподібних шарів зберігаються протягом 3–4 годин. Тому нанесення гелю на плавучий носій дає змогу зменшити концентрацію парів до рівня менше, ніж значення нижнього КМПП, та припинити горіння.

Рис. 7.2 характеризує ізоляцію гелем, нанесеним на гранули піноскла.

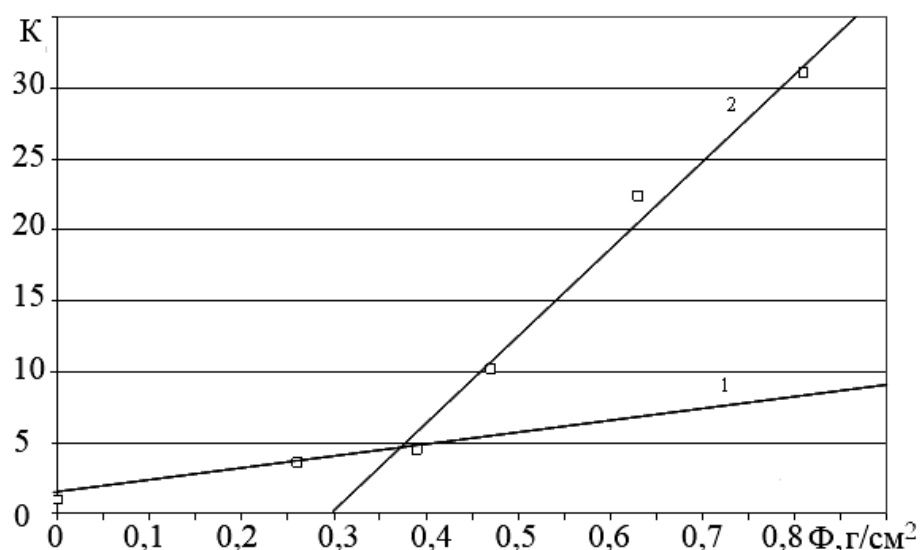


Рис. 7.2 – Характер зменшення випаровування бензину в умовах збільшення витрати нанесення гелю на шар піноскла.

Так, за витрати гелю до  $0,4 \text{ г/см}^2$  спостерігається повільне зменшення інтенсивності випаровування бензину зі зростанням поверхневої витрати нанесення гелю на шар піноскла (пряма 1). Цей ефект можна пояснити звуженням каналів випаровування у процесі набризкування та обростання гелем поверхні гранул піноскла. За більшої інтенсивності подачі гелю, починаючи з його поверхневої витрати  $0,45 \text{ г/см}^2$  (пряма 2), спостерігається більш ефективно гальмування випаровування, оскільки виникають суцільні осередки гелю із заповненням каналів між гранулами. Цю залежність можна описати рівнянням:  $K = 64,29\Phi - 20,714$ , що дає змогу оцінювати коефіцієнт уповільнення випаровування для поверхневої витрати нанесення гелю на шар піноскла, починаючи зі значення  $0,3 \text{ г/см}^2$ . Суцільний шар гелю на всій поверхні шару гранул піноскла фракції  $1-1,5 \text{ см}$  утворюється починаючи з витрати гелю  $0,65-0,7 \text{ г/см}^2$ . За таких умов коефіцієнт уповільнення випаровування перевищує 20.

За подальшого накопичення шару гелю коефіцієнт уповільнення випаровування для насичених вуглеводнів досягає 30. Пара водорозчинних горючих рідин більш активно дифундує крізь водовмісний гель (ніж пара водонерозчинних рідин), тому ізоляція їх випаровування здійснюється набагато гірше. Тобто за рахунок своєї розчинності молекули горючої полярної рідини транспортуються крізь гель більш інтенсивно.

Для забезпечення плавучості ізолюючих шарів гелю потрібна загальна товщина шару ПС понад  $10 \text{ см}$ . За менших шарів піноскла шари гелю притоплюють його, і горюча рідина витискається поверх шару гелю. Тому гель, який своєю масою частково притоплює плавучий шар гранул піноскла, не повинен торкатися поверхні рідини. Це особливо актуально для водорозчинних спиртів, але навіть без торкання гелем спирту шар гелю  $1 \text{ мм}$  гальмує випаровування тільки у  $2-3$  рази. Тобто для гасіння водорозчинних спиртів використання гелю є малоефективним.

Висихання та подальше розтріскування гелю, нанесеного на піноскло, із втратою ізолюючої здатності відбувається через  $3$  доби.

### **7.3 Ізолюючі властивості зернистих негорючих плавучих матеріалів за умов гасіння пожеж класу «В»**

Моделювання процесу дифузії пари крізь шар плавучого негорючого матеріалу (наприклад, піноскла) показує, що він, як і гель, може гальмувати процес випаровування рідин, проте на два порядки менш інтенсивно. Розрахунковий час досягнення стаціонарного режиму для процесу випаровування становить від десятків хвилин до кількох годин та залежить від товщини цього шару над поверхнею рідини. Початок гасіння резервуарів доцільно починати якомога раніше та бажано погасити пожежу за час менший, ніж час встановлення стаціонарного режиму випаровування крізь шар. Як показник ізолюючої дії зручно використовувати значення масової швидкості випаровування ( $\text{кг/м}^2\text{с}$ ) для ізолюючого шару, порівняно з

випаровуванням з вільної поверхні. Масова швидкість випаровування є основним параметром, що визначає інтенсивність вигорання рідин, оскільки стадія випаровування є лімітуючою для процесу їх горіння. Але для самого процесу вигорання використовують параметр «масова швидкість вигорання», який являє собою масову швидкість випаровування за температури кипіння з додаванням прогріву поверхні рідини тепловим випромінюванням.

Швидкість випаровування збільшується внаслідок ефекту змочування бортів резервуара та гранул негорючого матеріалу, що збільшує площу поверхні випаровування. Водночас наявність шару гранул на поверхні рідини перекриває частину «дзеркала» для процесів випаровування та прогріву випромінюванням. Наприклад, шар гранул піноскла змочується бензином на висоту до 1,5 см. Причому висота змочування істотно залежить від способу подачі піноскла на поверхню рідини. У підсумку виявляється, що у разі наявності малого шару піноскла на поверхні рідини і площа, й *інтенсивність випаровування* трохи збільшуються. Відповідну залежність для бензину наведено на рис. 7.3.

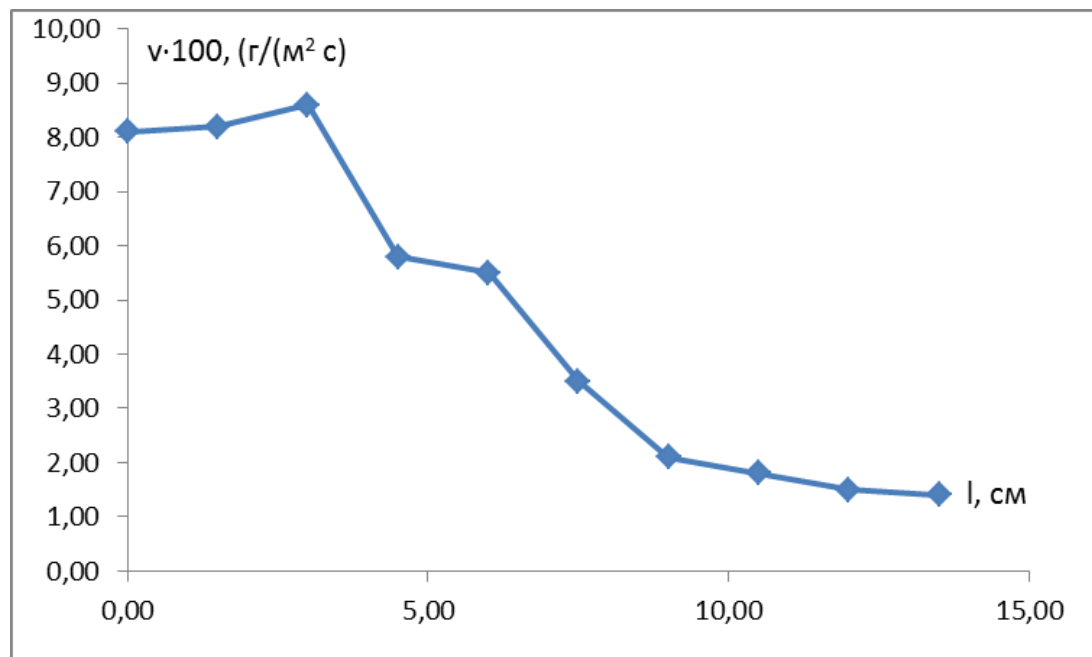


Рис. 7.3 – Залежність масової швидкості випаровування бензину від товщини шару гранульованого піноскла

Тобто для шару гранул піноскла товщиною до 3 см для фракції 1–1,5 см швидкість випаровування бензину збільшується внаслідок ефекту змочування бортів та гранул. Подальше збільшення товщини шару піноскла зменшує швидкість випаровування, а за загальної товщини шару 13,5 см цей параметр зменшується у 6 разів, порівняно з випаровуванням з вільної поверхні. За більших шарів піноскла зменшення швидкості випаровування відбувається менш інтенсивно.

У процесі вигорання вважають, що температура поверхні рідини

дорівнює температурі її кипіння. При цьому процес випаровування відбувається у 100 разів інтенсивно (рис. 7.4–7.6). Це має місце саме тому, що випаровування відбувається за температури поверхні рідини, яка дорівнює температурі кипіння, а також наявне інтенсивне підведення тепла до поверхні внаслідок випромінюванню полум'я.

ю.

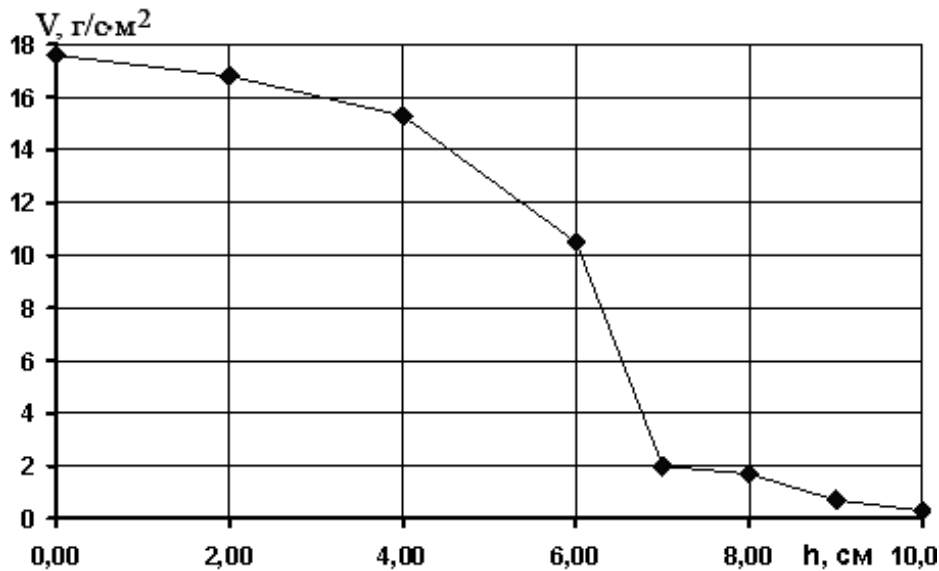


Рис. 7.4 – Залежність масової швидкості вигорання бензину ( $V$ ) від товщини шару гранульованого піноскла ( $h$ )

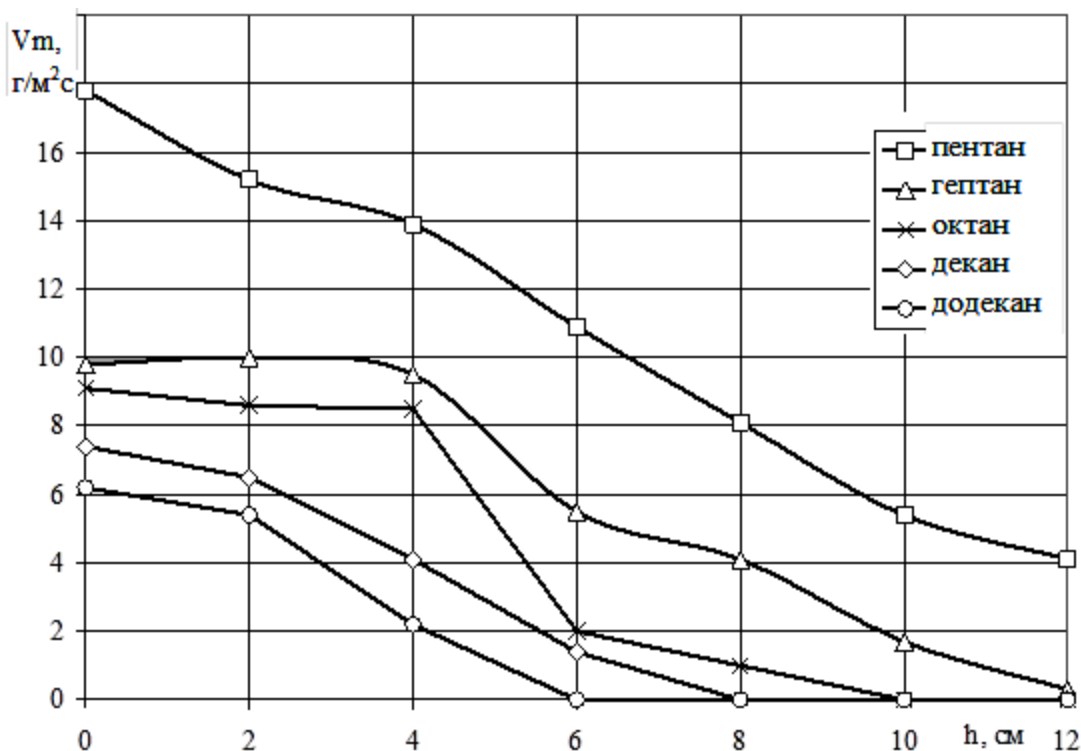


Рис. 7.5 – Залежність масової швидкості вигорання алканів від товщини шару гранульованого піноскла для лабораторного модельного осередку

Стабілізація випаровування та вигорання на великих шарах піноскла визначається тим, що для незначних потоків пари шар піноскла не створює



значних дифузійних ускладнень. Висота шару ПС, після якої стабілізується інтенсивність випаровування, визначає максимальну рекомендовану висоту шару піноскла, достатню для завершення гасіння не ізолюючими засобами (розпилена вода, газоподібні або порошкові інгібітори, негорючі гази).

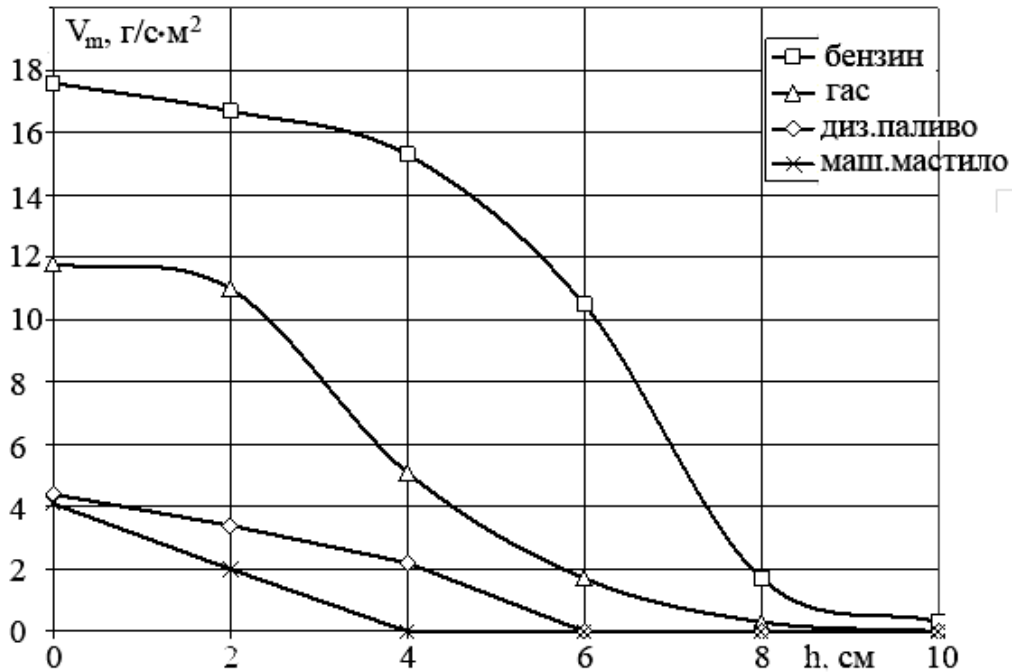


Рис 7.6 – Залежність масової швидкості вигорання горючих рідин від товщини шару піноскла для лабораторного модельного осередку

Таким чином, за збільшення товщини шару піноскла масова швидкість вигорання бензину зменшується. В інтервалі до 4 см товщини шару цей ефект є незначним. В інтервалі 4–7 см має місце швидке зменшення масової швидкості вигорання. А в інтервалі товщин шару ПС 7–10 см досягається масова швидкість вигорання бензину, яка в десятки разів є меншою, ніж швидкість випаровування з вільної поверхні. За товщини шару ПС понад 7 см висота полум'я є незначною. За товщини шару 9–10 см спостерігаються локальні осередки горіння на окремих ділянках. У такому режимі горіння легко загасити будь-яким способом припинення полум'яного горіння з малою інтенсивністю подачі (наприклад, під час подачі розпиленої води з малою витратою протягом 1 с, або під час короткочасної подачі компонентів ГУС із малою витратою 0,2 г/см<sup>2</sup>, або під впливом інтенсивного потоку повітря – зрив полум'я). Однак після такого гасіння горіння легко відновлюється, якщо в область пароповітряної суміші над поверхнею піноскла внести джерело запалювання.

Нарощування шару піноскла може привести до припинення горіння без подачі додаткових вогнегасних засобів. Наприклад, для декану та додекану вогнегасний шар піноскла – 8 см, для октану – 10 см. Горіння пентану і гептану не припиняється за товщини шару піноскла 12 см, але залишкові осередки горіння легко загасити будь-якими засобами пожежогасіння.

Дані на рис. 7.4–7.6 показують, що масова швидкість вигорання бензину з вільної поверхні та за товщини шару ПС 2–6 см на 2 порядки перевищує масову швидкість випаровування; накопичення шару піноскла зменшує масову швидкість вигорання рідких вуглеводнів; у висококиплячих рідин (дизельне паливо і машинне мастило) масова швидкість вигорання у 3–4 рази менша, ніж у низькокиплячих; горіння дизельного палива та машинного мастила припиняється за товщини шару піноскла 6 та 4 см, гасу та бензину – 10 та 14 см відповідно; завершення гасіння гелем із витратою подавання 0,2 г/см<sup>2</sup> надає можливість зменшити шар піноскла на 2–4 см.

Шар піноскла товщиною 10 см сповільнює випаровування пентану в процесі горіння в 6 разів інтенсивніше, ніж у дослідах без горіння, що свідчить про наявність додаткових механізмів гальмування випаровування, окрім сповільнення дифузії. Тобто ефект припинення горіння визначається ускладненням дифузії пари крізь ізолюючо-плавучий шар піноскла, екрануванням піносклом поверхні рідини від теплового впливу випромінювання полум'я, охолодженням піносклом поверхні рідини, використанням над піносклом додаткових ізолюючих, охолоджуючих, розбавляючих або інгібуючих засобів пожежогасіння. Таким чином, ізолюючий ефект наявності ПС проявляється набагато більше за умов горіння. Наприклад, шар піноскла на бензині завтовшки 10 см сповільнює випаровування бензину без горіння тільки у 4,2 разу, а за умов горіння – у 59 разів, тобто ефект ізоляції досягається у 14 разів більш інтенсивний.

Вогнегасні властивості пін розрізняють для рідин із різною температурою спалаху; можна розглянути таку залежність і для ПС (рис. 7.7).

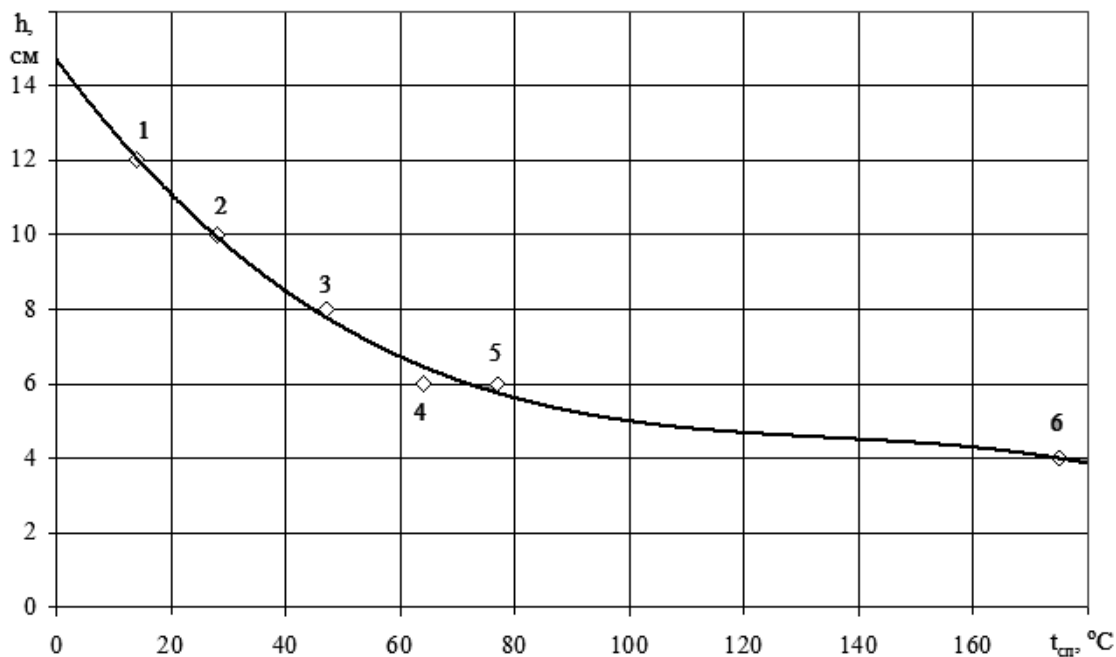


Рис. 7.7 – Залежність вогнегасної товщини шару сухого ПС на лабораторному осередку горіння для алканів та їх технічних сумішей: 1 – октан; 2 – гас; 3 – декан; 4 – дизельне паливо; 5 – додекан; 6 – машинне мастило

Узагальнена залежність на рис. 7.7 показує зменшення вогнегасного шару ПС (без подачі ГУС) для алканів та алканумісних технічних сумішей зі збільшенням температури спалаху; цю залежність можна описати формулою:

$$h_{\text{заг}} = -4,02 \cdot 10^{-8} t_{\text{сп}}^3 + 1,64 \cdot 10^{-5} t_{\text{сп}}^2 - 2,23 \cdot 10^{-3} t_{\text{сп}} + 0,15, \text{ м}, \quad (7.5)$$

яка прогнозує вогнегасний шар піноскла за значенням температури спалаху  $t_{\text{сп}}$  рідких вуглеводнів із коефіцієнтом кореляції  $R = 0,99$ .

На рис. 7.8 наведено графічні залежності необхідної для припинення горіння товщини шару сухого та змоченого ПС як без додаткової подачі ГУС, так і з подачею ГУС на лабораторному осередку пожежі. Прогноз необхідного шару піноскла, з урахуванням режиму гасіння та виду осередку пожежі, можна провести за формулою:

$$h_{\text{заг}} = h_o \left( \frac{273}{T_{\text{сп}}} \right)^k + h_b, \text{ м}, \quad (7.6)$$

де  $k$  – коефіцієнт осередку пожежі (табл. 7.6);  $h_b$  – базовий шар піноскла для гасіння горючих рідин, м;  $h_o$  – нормуючий коефіцієнт, який показує значення додаткового шару піноскла для гасіння рідини з  $T_{\text{сп}} = 273 \text{ К}$ ;  $T_{\text{сп}}$  – температура спалаху рідини, К.

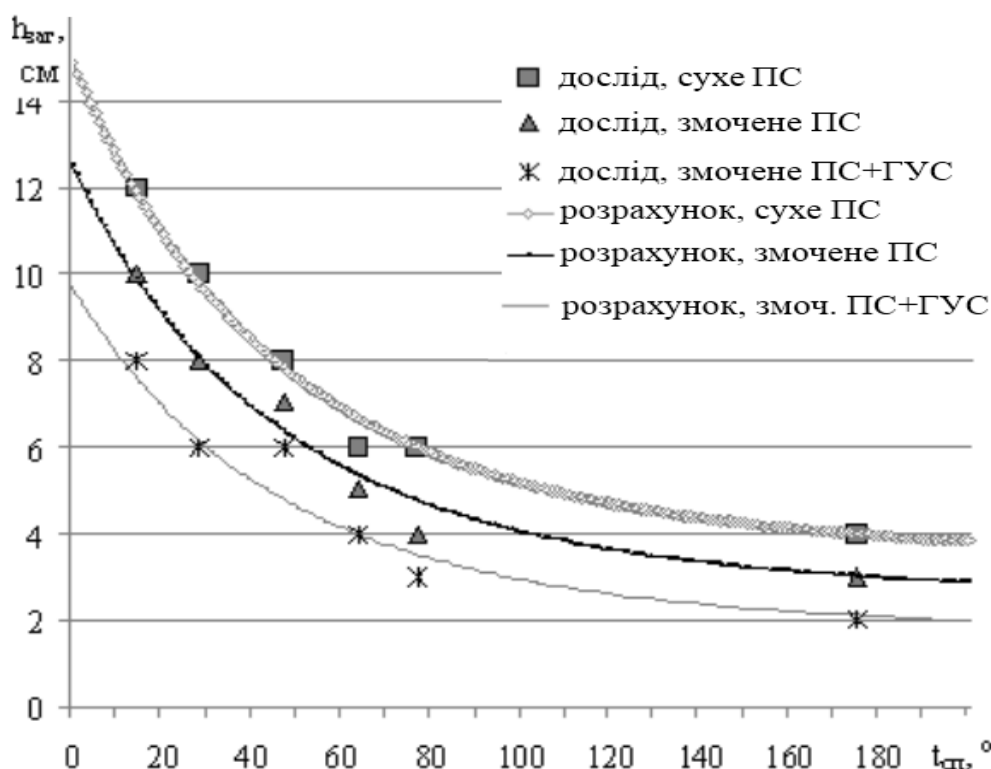


Рис. 7.8 – Залежність вогнегасного шару ПС від температури спалаху рідин на малому осередку пожежі класу «В» для сухого та змоченого ПС без подавання та з подаванням ГУС

Таким чином, змочене ПС має кращі вогнегасні властивості, порівняно із сухим, у разі використання для гасіння висококиплячих рідин, що дає змогу зменшувати шар ПС на 1–2 см; додавання поверх змоченого піноскла ГУС дає змогу додатково зменшити шар ПС ще на 1–2 см.

Таблиця 7.6 – Коефіцієнти формули (7.6) для вогнегасного шару ПС

Режим гасіння	Коефіцієнти формули (7.6)		
	k	$h_b$	$h_o$
сухе піноскло, лабораторний осередок	6,000	0,034	0,115
змочене піноскло, лаб. осередок	6,000	0,025	0,100
– // –, завершення гасіння гелем	6,000	0,017	0,080
сухе піноскло, осередок 2В	7,000	0,045	0,200
змочене піноскло, осередок 2В	7,000	0,030	0,270

На модельному осередку пожежі рідин 2В (більша площа горіння) гасіння ЛЗР досягається важче: наприклад, для бензину – за загальної товщини шару змоченого ПС 65,5 см, сухого ПС – 50 см; для уайт-спіриту відповідні товщини шару ПС – 32 см та 24 см відповідно (рис. 7.9).

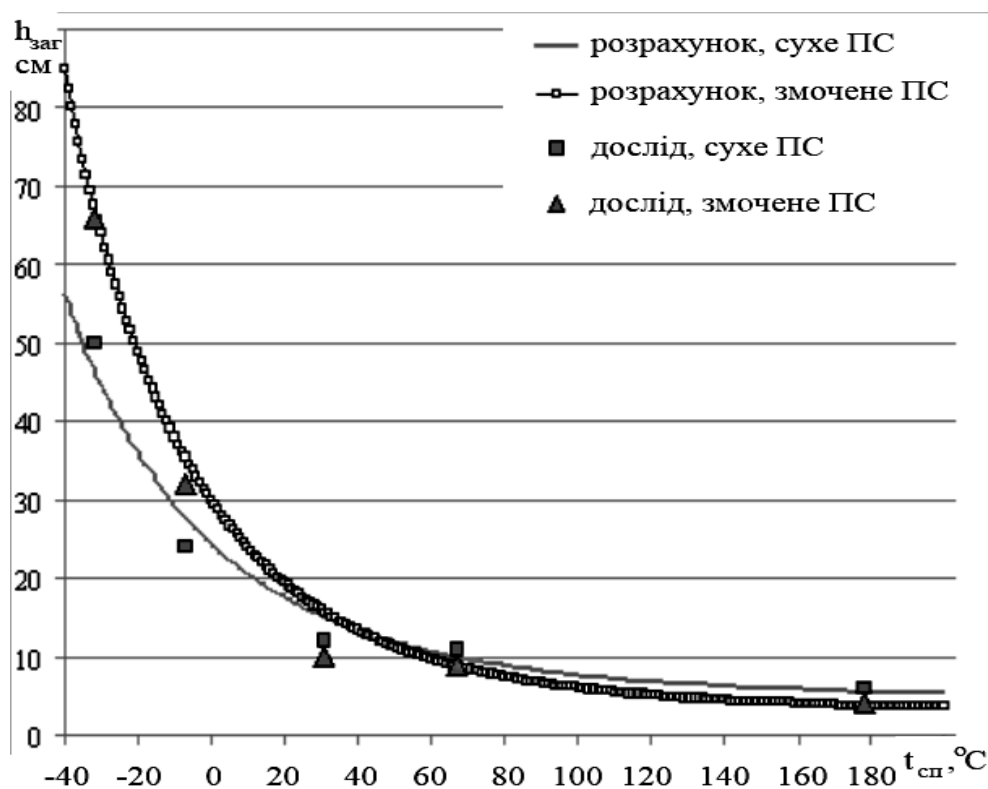


Рис. 7.9 – Залежність вогнегасного шару сухого та змоченого ПС від температури спалаху вуглеводнів на модельному осередку пожежі 2В

Тобто рідини з низькими температурами спалаху (менше, ніж 28°C) краще гасити сухим піносклом. Це пояснюється тим, що температуру поверхневого шару ЛЗР, що горить, неможливо охолодити нижче за

температуру її спалаху шляхом подачі вогнегасної речовини з температурою навколишнього середовища ( $t_{\text{сп}}$  бензинів лежить у межах від  $-20$  до  $-40$  °С). Тому основний внесок у вогнегасні властивості досліджуваних вогнегасних систем робить ізолююча здатність шару піноскла. Змочене піноскло має меншу плавучість у горючих рідинах, ніж сухе, тому шар такого піноскла, що перебуває вище за рівень рідини, та його ізолююча дія будуть меншими.

Зменшити загальну товщину шару сухого ПС, за умови гасіння таких ЛЗР, можна за рахунок використання ГУС з поверхневою витратою  $0,2$  г/см<sup>2</sup>. За таких умов припинення горіння бензину та уайт-спіриту на модельному осередку 2В досягається за товщини шару сухого ПС  $12-14$  см.

Для гасіння ГР із температурою спалаху, що перевищує  $60$  °С, перевагу має змочене ПС. В інтервалі температур спалаху  $30-60$  °С вогнегасні характеристики сухого та змоченого ПС є близькими.

Найкращі вогнегасні властивості має ПС фракції  $1,0-1,5$  см, а для фракцій  $1,5-2,5$  см та  $2,5-4$  см для припинення горіння рідин потрібен шар ПС на  $2$  см більший, за умови завершення гасіння за допомогою ГУС з інтенсивністю подачі  $0,2$  г/см<sup>2</sup>.

Ізолюючі властивості сухого піноскла стосовно полярних рідин (наприклад, спиртів, рис. 7.10) є близькими до показаних у цьому розділі для неполярних рідин (алкани).

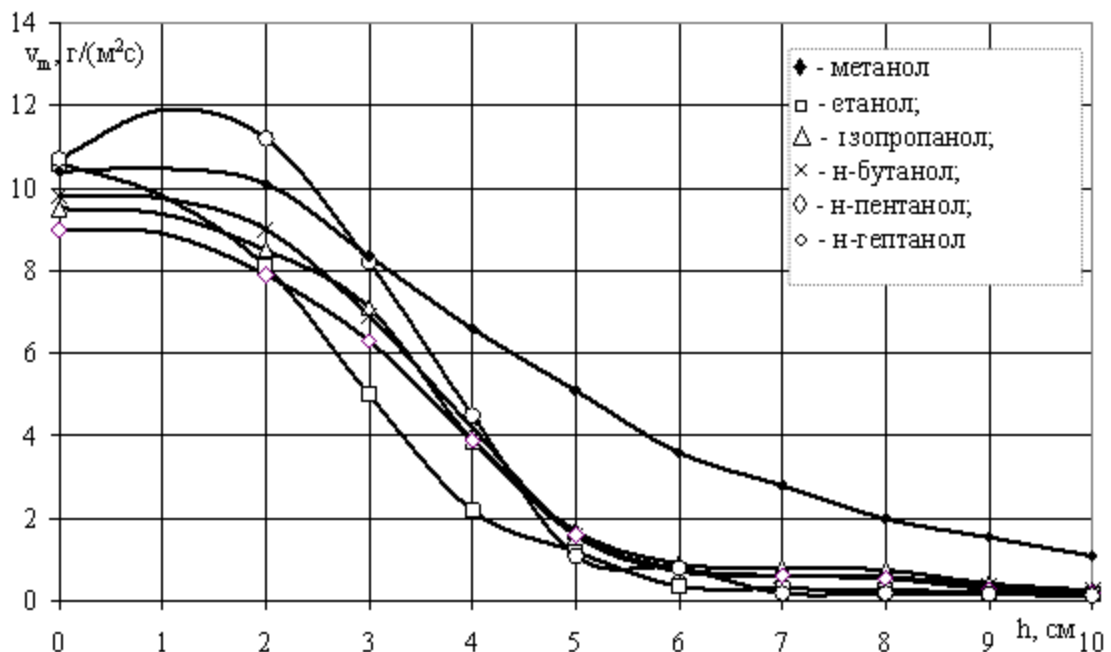


Рис. 7.10 – Залежність масової швидкості вигорання спиртів від товщини шару сухого піноскла

Як і для алканів, у разі збільшення товщини шару піноскла від  $0$  до  $2$  см для деяких спиртів спостерігається незначне зростання масової швидкості вигорання. В інтервалі товщин шару ПС  $2-5$  см спостерігається найбільш інтенсивне сповільнення масової швидкості вигорання для всіх спиртів. Для товщини шару піноскла понад  $6$  см масова швидкість вигорання повільно

знижується. При цьому спостерігаються дуже слабкі осередки локального горіння, яке припиняється у разі накопичення шару ПС товщиною 6–9 см для всіх вивчених спиртів.

На рис. 7.11 наведено залежності товщини вогнегасних шарів для сухого і змоченого піноскла під час гасіння одно-, дво- і трьохатомних спиртів нормальної та ізобудови. Оскільки більшість спиртів має температуру спалаху більшу за 28 °С (межа між легкозаймистими та особливо небезпечними легкозаймистими рідинами), а густина спиртів є більшою, ніж в аналогічних алканів, то плавучість піноскла у спиртах є більшою, а охолоджувати спирти потрібно не в дуже великому діапазоні температур.

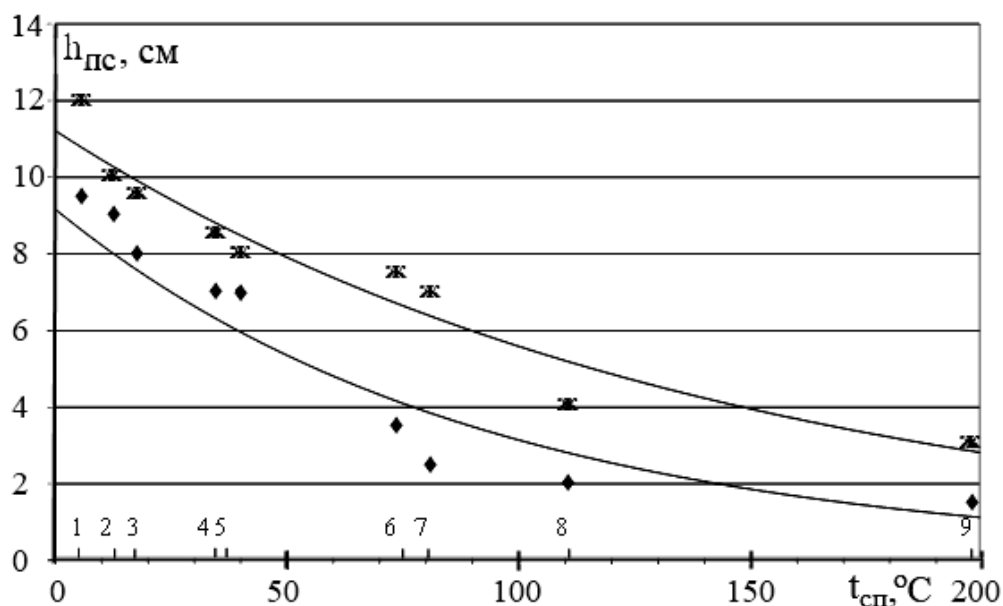


Рис. 7.11 – Залежності товщини шару сухого «ж»  $h_1$  і змоченого «♦»  $h_2$  ПС для гасіння спиртів від їх температури спалаху: по осі  $t_{сп}$  - 1 – метанол; 2 – етанол; 3 – пропанол-2; 4 – бутанол-1; 5 – пентанол-1; 6 – гептанол-1; 7 – октанол-1; 8 – етиленгліколь; 9 – гліцерин

У всіх випадках шар змоченого ПС, необхідний для гасіння, на 1,5–3 см є меншим, ніж шар сухого піноскла. Більш високі вогнегасні властивості змоченого піноскла зумовлені його істотно більшими охолоджуючими властивостями. Вогнегасні шари даних засобів у залежності від температури спалаху горючої рідини описуються рівняннями: для сухого ПС  $h_{пс1} = 9,278^{-0,0109t_{сп}}$ ; для змоченого ПС  $h_{пс2} = 11,297^{-0,007t_{сп}}$ .

#### 7.4 Внесок охолоджуючої дії піноскла у гасіння пожеж класу «В»

Плавучий негорючий матеріал із густиною набагато меншою, ніж густина води (наприклад, піноскло), може бути використаний для забезпечення плавучості ізолюючого шару інших вогнегасних речовин (наприклад, гелю) під час гасіння пожеж класу «В». Однак і сам непритоплений шар піноскла (який залишається над поверхнею рідини) має ізолюючі властивості.

Водночас, у процесі гасіння горючої рідини, притоплений шар піноскла, що має температуру довкілля, починає поглинати тепло, накопичене у поверхневому шарі рідини до вирівнювання температур. При цьому відбувається як пряме охолодження поверхні, так і непряме – за рахунок екранування поверхні рідини від прогрівання випромінюванням. Ці складові формують охолоджуючі властивості піноскла, що доповнює загальний механізм пожежогасіння. Так, якщо прийняти, що початкова температура піноскла  $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , а в результаті теплообміну з нагрітою рідиною його кінцева температура досягла  $T_{\text{кін}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ , то 1 кг піноскла поглине за рахунок своєї теплоємності (в межах 0,78–1 кДж/(кг·К)) приблизно 62 кДж тепла. Тобто ефект охолодження буде неінтенсивним.

З одного боку – більшим притоплений шар, а тому й охолоджуючий ефект буде для легкокиплячих рідин, які мають меншу густину. Однак лише за рахунок ефекту охолодження піносклом такі рідини погасити неможливо, оскільки їх необхідно охолодити до температури, меншої за температуру спалаху, яка у таких рідин виявляється меншою за температуру піноскла під час подачі. З іншого боку – висококиплячі рідини мають більшу густину, а значить – менше притоплення піноскла та менший охолоджуючий ефект. Однак ці рідини мають значно більшу температуру спалаху, а значить, необхідно менше охолоджувати їх поверхню (у разі однаковості температур поверхонь, але висококиплячі рідини мають й більшу температуру кипіння).

У разі використання гелю для завершення гасіння – ПС притоплюється більше, а отже дія гелю доповнюється охолоджуючою дією піноскла. Збільшити охолоджуючу дію піноскла можна за рахунок його змочування, що надає додаткову можливість поглинати тепло за рахунок нагрівання та випаровування води. Охолоджуюча здатність змоченого піноскла, з урахуванням припущення, що водоутримання піноскла становить 50 % та вся вода буде випаровуватися, у перерахунку на 1 кг вогнегасної речовини (0,5 кг піноскла + 0,5 кг води) в діапазоні нагріву від 20 °C до 100 °C буде становити:

$$\begin{aligned} Q_{\text{ПС}+\text{H}_2\text{O}} &= C_{\text{рПС}} \cdot m_{\text{ПС}} \Delta T + C_{\text{рH}_2\text{O}} \cdot m_{\text{H}_2\text{O}} \Delta T + \Delta H_{\text{випH}_2\text{O}} \cdot m_{\text{H}_2\text{O}} = \\ &= 0,78 \cdot 0,5 \cdot 80 + 4,2 \cdot 0,5 \cdot 80 + 2254 \cdot 0,5 = 1326 \text{ кДж/кг}, \end{aligned} \quad (7.7)$$

де  $C_{\text{р(H}_2\text{O)}}$ ,  $m_{\text{(H}_2\text{O)}}$  та  $\Delta H_{\text{вип(H}_2\text{O)}}$  – питома теплоємність, маса і питома теплота випаровування води відповідно.

Таким чином, теоретична перевага змоченого піноскла над сухим в охолоджуючій здатності за розрахунком становить 21,3 разу, а у перерахунку на 1 кг сухого піноскла – 42,6 разу. Причому основна частка в цьому ефекті досягається за рахунок процесу випаровування води.

Дослід з охолодження сухим піносклом додекану ( $C_{12}H_{26}$ ), нагрітого до температур 80, 100, 120, 140 та 160 °С, що відповідає типовим температурам кипіння основних легкозаймистих рідин, дав дані щодо зниження температур від 4,9 до 12,5 °С (менша температура рідини – менший охолоджуючий ефект). У разі охолодження додекану змоченим піносклом відповідні значення охолоджуючого ефекту виявилися більшими та становили від 19 до 69 °С, тобто змочування підвищує охолоджуючий ефект піноскла в 4–6 разів. Менший практичний коефіцієнт переваги змоченого піноскла на сухим, ніж було теоретично прогнозовано, можна пояснити втратами та неповним випаровуванням води з відкритих пор піноскла.

### 7.5 Рекомендації з гасіння пожеж рідин системою «піноскло+гель»

Спосіб гасіння пожеж рідин системою «піноскло+гель» має перевагу в тому, що над горючою рідиною спочатку утворюється плавучий негорючий шар, який ослаблює горіння, на який далі наноситься суцільне гелеве ізолююче водовмісне покриття. У результаті утворюється стійке у часі бінарне плавуче ізолююче покриття поверхні рідини, яке припиняє горіння та до 3 діб запобігає утворенню вибухонебезпечних концентрацій над поверхнею цієї рідини та усуває небезпеку повторного загоряння.

Існує три режими гасіння пожеж рідин із використанням піноскла: сухим піносклом рідин із температурою спалаху понад 30 °С; змоченим піносклом; сухим піносклом із завершенням гасіння гелем. Значення рекомендованих поверхневих витрат сухого ПС ( $\Phi_{\text{сух}}$ ), змоченого ПС ( $B = 30\%$ ) ( $\Phi_{\text{змоч}}$ ) та компонентів гелеутворюючих систем ( $\Phi_{\text{гус}}$ ) наведені у табл. 7.7.

Таблиця 7.7 – Рекомендовані поверхневі витрати сухого, змоченого ПС та компонентів ГУС для гасіння пожеж рідин

Горюча рідина	$t_{\text{сп}}, ^\circ\text{C}$	$\Phi_{\text{сух}}, \text{кг/м}^2$	$\Phi_{\text{змоч}}, \text{кг/м}^2$	$\Phi_{\text{гус}}, \text{кг/м}^2$
Час вільного горіння менше, ніж 5 хв.				
Бензин, легкі нафти	<30	18	-	3
Гас	30–60	-	15	3
Дизельне паливо	61–100	-	12	-
Машинне мастило	>100	-	9	-
Час вільного горіння більше, ніж 5 хв.				
Бензин, легкі нафти	<30	21	-	3
Гас	30–60	-	19	3
Дизельне паливо	61–100	-	19	-
Машинне мастило	>100	-	20	-



Подачу піноскла можна здійснювати навіть за відсутності достатньої його кількості для гасіння, але запас має забезпечити шар піноскла щонайменше 3 см (щоб уникнути ефекту змочування та посилення горіння). Шар піноскла не руйнується під впливом типових факторів пожежі. Навіть нанесення тонкого шару піноскла (3 см) знижує інтенсивність горіння. Для кожної рідини існує шар піноскла, який забезпечує істотне зменшення інтенсивності горіння. У такому разі можна не виконувати подачу води на захист сусідніх резервуарів. А у разі залишкових проявів горіння можна не виконувати подачу води на охолодження резервуара, який горить.

Подачу гранул піноскла в резервуар зверху пневмоелектричним апаратом можна здійснювати за допомогою гнучких матеріалопроводів, встановлених на пожежних автопідійомниках, пристосованої для її подачі техніки, пожежних автодрабин та автокранів.

На початковому етапі пожежі, у разі горіння висококиплячих рідин для гасіння можна використовувати сухе піноскло. У разі обладнання резервуарів засобами підшарової подачі піноскла доцільно подавати його одразу, навіть за відсутності потрібної кількості компонентів ГУС. Інтенсивність подачі піноскла не є обмежуючим фактором, тому піноскло можна подавати і з малою інтенсивністю. У разі утворення «кишень» застосування піноскла здійснюється, як і у випадку використання пін.

Рішення щодо доцільності та можливості проведення операцій з відкачування (закачування) нафти (нафтопродукту, донної води) з резервуара, що горить, та сусідніх резервуарів ухвалюють так само, як і у разі гасіння піною.

Також можливе застосування бінарної вогнегасної системи «піноскло+гель» для гасіння аварійних розливів горючих рідин. Пожежі, пов'язані з горінням розливів рідин, можна розділити на два типи: пожежі під час руйнувань резервуарів та пожежі аварійних розливів горючих рідин за відсутності конструкцій, які обмежують площу розливу.

Після 10–15 хвилин впливу полум'я на резервуар відбувається втрата несучої здатності самого резервуара або його конструктивних елементів. Тому можна прийняти, що якщо гасіння таких пожеж здійснюється з використанням пористих матеріалів та ГУС, то воно вимагає таких саме дій, як і для гасіння резервуарів.

У разі розливу горючої рідини на горизонтальних поверхнях, які не всмоктують рідини, за відсутності огороження утворюється шар рідини завтовшки не більше 2 мм. У разі, якщо розлив стався швидко (викид рідини), вигорання рідини відбудеться за час, менший за 1 хвилину. Такий час не дозволяє навіть почати процес гасіння пожежі.

У разі витікання рідини протягом певного часу, нанесення товстого шару піноскла загальмує процес випаровування, що може призвести до припинення горіння. У такому разі, у зв'язку з невеликою товщиною шару

горючої рідини, можна вибрати кількість ПС та ГУС за табл. 7.7 для часу вільного горіння менше 5 хв.

У разі розливу горючої рідини на нерівну невсмоктуючу поверхню за відсутності огороження горюча рідина буде збиратися у заглибленнях. У разі якщо заглиблення перевищує 10 см, для їх гасіння потрібно використовувати рекомендації, наведені за табл. 7.7 для часу вільного горіння понад 5 хв. У разі пожеж розливів горючих рідин на поверхнях, які поглинають рідину, доцільно використовувати тільки ГУС для ізоляції просоченого горючою рідиною ґрунту. Поверхнева витрата ГУС, необхідна для припинення горіння піску, змоченого бензином, становить  $3 \text{ кг/см}^2$  (з урахуванням коригуючого коефіцієнта 1,5).

### **Запитання для самостійної перевірки знань:**

1. Розкрийте роль плавучості ізолюючих засобів пожежогасіння у припиненні горіння рідин.
2. Розкрийте сутність плавучості пористого матеріалу, чинники, що визначають його охолоджуючі та ізолюючі властивості.
3. Поясніть зв'язок плавучості пористих негорючих матеріалів з умовами формування на них ізолюючого шару гелю.
4. Поясніть механізм уповільнення випаровування горючих рідин гелем.
5. Поясніть механізм уповільнення випаровування горючих рідин зернистим матеріалом.
6. Поясніть вплив на ізолюючі властивості піноскла його фракційного складу та висоти шару.
7. Опишіть зв'язок ізолюючих властивостей шару піноскла з температурою спалаху горючої рідини.
8. Поясніть відмінності в механізмах гасіння пожеж горючих рідин сухим та змоченим піносклами.
9. Якими складовими визначається охолоджуюча здатність піноскла?
10. Охарактеризуйте режими гасіння пожеж горючих рідин у резервуарах вогнегасною системою «піноскло+гель».
11. Охарактеризуйте режими гасіння пожеж горючих рідин у вигляді аварійного розливу вогнегасною системою «піноскло+гель».

**Література для самопідготовки та поглибленого вивчення розділу:**  
4, 33, 34, 35, 36, 53, 65.

## ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

**Адсорбція** – поглинання та утримання пари та газів на поверхні твердої речовини за рахунок міжмолекулярної взаємодії.

**Аерозоль** – це система з частинок твердої речовини або крапель рідини, завислих у повітрі; це колоїдна система, що складається із твердої або рідкої дисперсної фази та газового дисперсійного середовища.

**Активні центри полум'я** – вільні радикали, активні молекули, які мають запас хімічної енергії та утворюються на стадіях ланцюгової реакції й беруть у ній участь.

**Верхня концентраційна межа поширення полум'я** ( $\phi_v$ ) – найбільша концентрація горючої речовини у суміші з повітрям, за якої *це* можливе виникнення та поширення горіння.

**Вільні радикали** – нейтральні частинки з непарним числом електронів на зовнішній електронній оболонці.

**Вибух** – фізичне або хімічне перетворення речовини, що супроводжується швидким переходом її енергії в енергію стиснення та руху продуктів перетворення, вихідної речовини або навколишнього середовища.

**Вибухова хвиля** (ударна хвиля) – це рух середовища, породжений вибухом, за якого відбувається різке підвищення тиску, густини та температури середовища.

**Викид** – миттєвий перехід у стан пари води, яка знаходиться у придонному шарі нафтопродукту, та пов'язане із цим виштовхування із резервуара рідини, що горить, на значну відстань з утворенням великого факела.

**Вимушене запалювання** – процес виникнення горіння внаслідок дії джерела запалювання на малу частину холодної горючої суміші.

**Виникнення горіння** – швидкий перехід від повільної окислювально-відновної реакції до миттєвого перетворення вихідних речовин у продукти реакції за рахунок самоприскорення реакції, що супроводжується спалахом, стрибкоподібним підвищенням тиску або температури з можливим звуковим ефектом.

**Вища теплота згоряння** – кількість тепла, що виділяється при повному згорянні одиниці кількості горючої речовини за умови, що горюча суміш та продукти горіння знаходяться за стандартних умов, а вода у продуктах горіння перебуває у конденсованому (рідкому) стані.

**Вогнегасна ефективність** – величина зворотна часу гасіння або найменшій концентрації вогнегасної речовини, за якої досягається процес припинення горіння.

**Вогнегасна концентрація** – найменша концентрація вогнегасного засобу в суміші горючої речовини з окисником, достатня для припинення горіння.

**Вогнегасні речовини** – речовини, які можуть впливати на процес горіння та створювати умови для його припинення або попереджати його виникнення.

**Вогнеперешкоджувач** – газопроникний пристрій у вигляді щілин, сіток, касет, насадок із гранульованого або пористого матеріалу, який розбиває горючу систему на малі об'єми, що різко збільшує площу тепловіддачі та призводить до погасання полум'я всередині пристрою; це запобігає поширенню полум'я по горючій системі у технологічне обладнання та його вибуху.

**В'язкість піни** – здатність піни не розтікатися по поверхні речовини.

**BLEVE**, Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion – вибух пари, що розширюється, скипаючої рідини.

**Газообмін** – це конвекційний рух газових потоків, який виникає під дією наявності градієнту тиску; на пожежі в огороженні визначає надходження повітря у приміщення та зону горіння, а також – поширення диму.

**Горіння** – це складний фізико-хімічний процес зі швидкою реакцією окиснення, інтенсивним виділенням енергії у вигляді тепла та світлового випромінювання.

**Горючі рідини** (ГР) – рідини з температурою спалаху в закритому тиглі більше за 61 °С, які спалахують за короткочасної дії джерела запалювання тільки за їх підвищеної температури на відміну від *легкозаймистих рідин* (ЛЗР), які утворюють пару у вибухонебезпечній концентрації й за звичайних умов зберігання.

**Динамічна рівновага** – стан системи з утворенням *насиченої пари*, за якого кількість рідини, що випаровує, дорівнює кількості сконденсованої пари.

**Джерело запалювання** – це тіло, що горить, розжарене тіло або електричний розряд, які мають енергію та температуру, достатні для запалювання горючих речовин (тобто достатні для ініціювання горіння).

**Дим** – це непрозора дисперсна система, яка складається з твердих та рідких частинок (дисперсної фази), завислих у газовому дисперсійному середовищі.

**Дисперсність (піни, пилу)** – величина, обернена до середнього діаметра пухирців *піни* або частинок *аерозолю*.

**Енергія активації** – це мінімальна енергія, необхідна для ініціювання елементарного акту хімічної реакції.

**Загальна витрата** вогнегасної речовини – кількість ВР, яку було витрачено під час гасіння пожежі на одиницю розрахункового параметра пожежі.

**Загальна кількість** вогнегасної речовини – кількість ВР, яку подано за час гасіння пожежі на загальну площу пожежі або в об'єм приміщення чи апарата.

**Загальні явища** на пожежі – явища, які є постійними та обов'язковими для кожної пожежі: горіння, масообмін, теплообмін.

**Засіб пожежогасіння** – речовина або пристрій, що використовуються для припинення горіння на пожежі.

**Закон Гесса:** тепловий ефект хімічної реакції, яка протікає за постійного тиску або постійного об'єму, не залежить від кількості проміжних стадій, а визначається лише вихідним та кінцевим енергетичним станом системи.

**Зона горіння** – це частина простору, в якій відбуваються процеси термічної підготовки горючих речовин (нагрівання, розкладання, плавлення, випаровування) та безпосередньо сам процес горіння; ця зона горіння обмежена поверхнею речовин, що горять, та фронтом полум'я дифузійного факела.

**Зона задимлення** – частина простору, що прилягає до зони горіння, в якій не можливе перебування людей без захисту органів дихання; зовнішня межа цієї зони визначається за видимістю, концентрацією токсичних речовин або кисню у повітрі (за вмісту кисню у задимленому повітрі менше 16 % людина втрачає свідомість).

**Зона теплового впливу** – це частина простору, що прилягає до зони горіння та в межах якої відбуваються процеси теплообміну між поверхнею зони горіння та навколишніми конструкціями й речовинами; зовнішня межа цієї зони пролягає там, де тепловий вплив викликає помітні зміни у стані матеріалів та конструкцій або створюються теплові умови, неприйнятні для людини або пожежної техніки (критична температура знаходження людини у приміщенні під час пожежі – 70 °С, а густина теплового потоку – 1 кВт/м<sup>2</sup>).

**Ізолююча здатність** – здатність піни (або іншого проникного засобу пожежогасіння) перешкоджати випаровуванню горючої рідини; визначається часом, за який пара рідини проходить крізь шар піни та утворює над ним пароповітряну суміш, здатну до запалювання.

**Йодне число** ( $J_{\text{ч}}$ ) – кількість грамів йоду, що приєднається у досліді або за розрахунком до 100 грамів олії; вважають, що якщо  $J_{\text{ч}} < 50$  г – олія не схильна до хімічного самозаймання на повітрі, а якщо  $J_{\text{ч}} > 50$  г – схильна.

**Інтенсивність подавання** вогнегасної речовини – кількість ВР, що подається за одиницю часу на одиницю розрахункового параметра пожежі (фронт, площі пожежі або об'єму приміщення); існують інтенсивності: теоретична, фактична, нормативна, критична, оптимальна.

**Коефіцієнт надлишку повітря** ( $\alpha$ ) – відношення кількості повітря, що дійсно надходить до зони горіння, до теоретичної кількості повітря, необхідної для повного згоряння горючої речовини.

**Кратність піни** – відношення об'єму піни до об'єму рідини, з якої її отримано (во скільки разів об'єм піни є більшим за об'єм розчину піноутворювача).

**Критичний час розвитку пожежі** – максимальний час перебування людей у приміщенні на пожежі; визначається часом досягнення критичної температури 70 °С або часом зниження вмісту кисню у повітрі до критичного значення – 16 %.

**Ланцюгові процеси горіння** – процеси, у яких перетворення вихідних речовин у продукти реакції здійснюється шляхом регулярного чергування декількох реакцій за участю вільних радикалів, що йдуть зі збереженням вільної валентності.

**Легкозаймисті рідини** (ЛЗР) – рідини з температурою спалаху в закритому тиглі нижче за 61 °С, тобто вони утворюють вибухонебезпечну пару за звичайних умов зберігання (без додаткового штучного нагріву); рідини з температурою спалаху нижче за 28 °С відносять до особливо небезпечних рідин.

**Лінійна швидкість вигорання** – шар рідини, який вигоряє за одиницю часу.

**Лінійна швидкість поширення пожежі** – відстань, яку проходить фронт пожежі за одиницю часу.

**Масова швидкість вигорання** – маса речовини, що згоряє за одиницю часу з одиниці площі пожежі.

**Матеріальний баланс реакції горіння** – рівність між масою речовин, що вступають у реакцію горіння, і масою речовин, що утворюються у ході цієї реакції.

**Мікробіологічне самозаймання** – процес виникнення горіння внаслідок самонагрівання продуктів рослинного походження під впливом тепловиділення під час життєдіяльності рослинних клітин та мікроорганізмів.

**Мінімальна вибухонебезпечна концентрація кисню**  $\varphi_{\text{МВКК}}$  – такий малий вміст кисню у горючій системі, за якого виникнення горіння стає неможливим.

**Мінімальна енергія запалювання**  $E_{\text{min}}$  (газу, пари, аерозолу) – найменша енергія електричного конденсатора, у разі розряду якого у стехіометричній суміші даної речовини з повітрям виникає іскра, яка запалює суміш з імовірністю 0,01.

**Надлишок повітря** – різниця між кількістю повітря, що дійсно витрачається на горіння, та теоретично необхідною кількістю повітря.

**Насичена пара** – стан пари у закритому (ізольованому) просторі з динамічною рівновагою між випаровуванням та конденсацією; за такого стану концентрація пари максимальна для даної температури зберігання рідини та не змінюється у часі.

**Небезпечні фактори пожежі** – первинні та другорядні явища пожежі (загальні та окремі), які спричиняють травмування, отруєння або загибель людей, а також знищення або пошкодження матеріальних цінностей.

**Нейтральна зона** – уявна горизонтальна площина у приміщенні між стелею та підлогою, у кожній точці якої тиск продуктів горіння дорівнює тиску зовнішнього повітря; на практиці під час пожежі вона визначає нижній рівень диму у приміщенні за умови наявності відкритих отворів.

**Ненасичена пара** – стан пари на відкритому просторі, коли динамічна рівновага між випаровуванням та конденсацією не встановлюється, частина пари втрачається у навколишній простір; випаровування триває, доки вся рідина не випарується.

**Нижня концентраційна межа поширення полум'я** ( $\varphi_n$ ) – найменша концентрація горючої речовини в суміші з повітрям, за якої вже можливе виникнення та поширення горіння.

**Нижча теплота згорання** речовини – кількість теплоти, що виділяється під час повного згорання одиниці кількості горючої речовини за умови, що горюча суміш та продукти горіння знаходяться за стандартних умов, а вода, яка міститься у продуктах горіння, перебуває у газоподібному стані.

**Окремі явища** (другорядні) на пожежі – ті, які виникають внаслідок дії загальних явищ та спостерігаються не на кожній пожежі: руйнування, вибухи, травмування або загибель людей чи тварин, введення вогнегасних речовин, хімічне або радіоактивне забруднення та інші можливі явища.

**Період індукції** – час від початку перевищення температури горючої системи над температурою навколишнього середовища до моменту виникнення горіння.

**Період вільного розвитку** пожежі – від моменту виникнення пожежі до моменту введення сил та засобів для її гасіння; протягом цього часу площа пожежі зростає спочатку повільно, а потім більш інтенсивно.

**Період ліквідації** пожежі – час з моменту локалізації пожежі до повного припинення горіння; за цей час площа пожежі зменшується до нуля.

**Період локалізації** пожежі – час, протягом якого створено умови для запобігання подальшому розвитку пожежі, а площа пожежі зростає зі зменшеною швидкістю (приймають – з половинною) внаслідок впливу вогнегасних речовин.

**Пірофори** (пірофорні речовини) – речовини, здатні до горіння без додаткового підведення тепла, тому що температура навколишнього середовища дорівнює або може перевищувати температуру їх самонагрівання.

**Питома витрата** вогнегасної речовини – кількість ВР, що витрачається в одиницю часу на гасіння розрахункового параметра пожежі.

**Піна** – це грубодисперсна колоїдна система, де у рідкій фазі (дисперсійному середовищі) розташовані бульбашки газу (дисперсна фаза); тобто бульбашки газу розділені плівками рідини.

**Площа пожежі** – площа проекції зони горіння на горизонтальну або вертикальну площину.

**Пожежа** – це позарегламентний процес знищення або пошкодження вогнем майна, під час якого виникають чинники, небезпечні для живих істот та довкілля.

**Пожежна навантага** – кількість теплоти, що може виділитися під час згорання речовин та матеріалів з одного квадратного метра поверхні підлоги приміщення або технологічної ділянки.

**Полум'я** – газований об'єм, в якому відбуваються всі процеси, пов'язані з підготовкою горючої суміші до горіння, та сам процес горіння.

**Продукти горіння** – це газоподібні, тверді та рідкі речовини, що утворюються під час взаємодії окисника з горючою речовиною у процесі горіння.

**Самозаймання** – процес виникнення горіння за рахунок самонагрівання системи внаслідок накопичення тепла всередині самої системи під впливом внутрішніх екзотермічних процесів без зовнішнього впливу джерела запалювання.

**Самонагрівання** – явище самовільного підвищення температури системи за рахунок протікання внутрішніх екзотермічних процесів за наявності сприятливих умов для накопичення тепла.

**Самоспалахування** – процес виникнення горіння внаслідок різкого збільшення швидкості хімічної реакції окиснення під впливом нагрівання ззовні всієї горючої системи до критичної температури без дії джерела запалювання.

**Стіювання** – перехід у пару значної кількості дрібних краплин води, які знаходяться у вигляді емульсії у нафтопродукті, та пов'язана з цим поява на поверхні рідини піни, яка горить та може перелитися через борт резервуара, поширюючи горіння на сусідні ділянки.

**Спосіб пожежогасіння** – тактичний прийом, що використовується для припинення горіння.

**Стандартна температура самоспалахування** – найменша температура, визначена за стандартних умов та форми посудини, горючої суміші газу або пари з повітрям, яка викликає виникнення горіння без внесення джерела запалювання (у досліді зазвичай вимірюють температуру стінки посудини, яка гріє газову суміш).

**Стандартна теплота утворення речовини  $\Delta H^{\circ}_f$**  – тепловий ефект реакції, в якій утворюється 1 моль речовини зі складових хімічних елементів, що знаходилися за стандартних умов ( $P = 101,3$  кПа,  $T = 298$ ).

**Стехіометрична концентрація** – концентрація горючої речовини (наприклад, у повітрі), що відповідає рівнянню реакції горіння.

**Стійкість піни** – здатність піни зберігати свої первинні властивості; характеризується часом напіврозпаду піни, протягом якого з піни виділиться половина маси розчину піноутворювача.

**Температура горіння** – температура, до якої нагріваються продукти горіння в зоні реакції горіння за рахунок її тепловиділення.

**Температура займання** – найменша температура рідини, за якої після короткочасної дії джерела запалювання встановлюється стійке горіння, оскільки інтенсивність випаровування рідини досягає та стає рівною інтенсивності вигорання пароповітряної суміші.

**Температура погасання** – температура зони горіння, нижче якої продовження горіння стає неможливим.

**Температура пожежі в огороженні** – середньооб'ємна температура газового середовища у приміщенні, в якому відбувається пожежа.

**Температура пожежі на відкритому просторі** – температура зони горіння; приймають як адіабатичну.

**Температура спалаху** – найменша температура рідини, за якої в умовах спеціальних випробувань над її поверхнею накопичується пара, здатна спалахувати під впливом короткочасної дії джерела запалювання середньої потужності, але без встановлення стійкого горіння.

**Температурні межі поширення полум'я** (ТМПП) (нижня або верхня) – такі температури рідини, за яких над її поверхнею утворюється насичена пара у концентрації, яка відповідає нижній або верхній КМПП.

**Температура запалювання** – це найменша температура нагрітого тіла, за якої досягається рівновага між тепловиділенням хімічної реакції окиснення у пристінному шарі горючої суміші й тепловіддачею у навколишню холодну суміш.

**Температура самонагрівання** – найменша температура горючої системи, за якої самонагрівання за сприятливих умов призведе до виникнення горіння.

**Температура самоспалахування** – найменша температура горючої системи, за якої відбувається різке збільшення швидкості екзотермічної реакції, що призводить до появи полум'яного горіння без дії джерела запалювання.

**Тепловий ефект реакції** – кількість теплоти, яка виділяється або поглинається системою під час протікання в ній незворотної хімічної реакції з одночасною зміною в системі або внутрішньої енергії (за умов сталості температури та об'єму системи), або ентальпії (за умов сталості температури та тиску системи).

**Теплове самозаймання** – процес виникнення горіння шляхом самонагрівання в результаті тривалого впливу температур, вищих за температуру самонагрівання.

**Теплота згоряння** – кількість теплоти, що виділяється при повному згорянні одиниці кількості горючої речовини з утворенням продуктів повного згорання за умов, що початкові та кінцеві продукти знаходяться за стандартних умов.

**Теплота пожежі** – кількість тепла, що виділяється під час пожежі у зоні горіння за одиницю часу.

**Токсичність продуктів горіння** – їх здатність викликати отруєння людей, які знаходяться без засобів індивідуального захисту органів дихання.

**Тривалість пожежі** – час від моменту виникнення пожежі до повного припинення горіння.

**Фізичне самозаймання** – виникнення горіння, яке викликає самонагрівання матеріалу під час тепловиділення фізичних процесів (адсорбція, тертя тощо).

**Флегматизація** – запобігання утворенню горючого газового середовища та виникненню горіння за допомогою газів-розріджувачів або інгібіторів.

**Флегматизуюча концентрація**  $\varphi_{\text{фл}}$  – найменша концентрація негорючого газу в газоподібній суміші горючої речовини й окисника, за якої суміш стає нездатною до горіння за будь-якого співвідношення між горючою речовиною та окисником.

**Фрикційні іскри** – шматочки металу, відірвані, нагріті та частково окиснені за умов механічного удару.

**Фронт пожежі** – частка периметра, на якій поширення пожежі відбувається найбільш інтенсивно.

**Хімічне самозаймання** – процес виникнення горіння внаслідок самонагрівання системи під час взаємодії речовин, які реагують із виділенням тепла.

**Час гасіння** – час від початку подавання вогнегасної речовини до припинення горіння.

**Швидкість хімічної реакції** – число елементарних актів взаємодії речовин, що відбуваються за одиницю часу в одиниці об'єму (у гомогенних реакціях) або на одиницю площі поверхні розподілу фаз (у гетерогенних реакціях).



## ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

### **А**

адсорбція, **38, 195**  
аерозоль  
- вогнегасний, **151**  
- горючий, **77**  
активний центр полум'я, **150, 195**  
антипірен, **150**

### **В**

вибух, **16, 22, 68, 69, 71, 103, 195**  
- паровий, BLEVE, **76, 103, 195**  
- коефіцієнт участі речовини, **71**  
- надлишковий тиск, **71, 72, 104**  
- радіус зон ураження, **72, 73, 105**  
- температура, **19**  
- тепловий, **40**  
- тиск, **16, 19**  
- тротиловий еквівалент, **71, 72**  
викид паровий, **66, 68, 74, 76, 195**  
виникнення горіння, **9, 37**  
- вимушене запалювання, **37, 44, 49**  
- самоспалахування, **37, 39, 47**  
- самозаймання, **37–39, 46**  
випаровування, **8, 24, 100, 102**  
- динамічна рівновага, **21**  
- інтенсивність, **7, 21, 67, 69, 100, 183**  
- пара насичена; ненасичена, **8, 21**  
- теплота, **21**  
випромінювання теплове, **102, 105**  
- критична густина, **79**  
вигорання, **74**  
- гомотермічний шар, **75**  
- рідини I та II-го роду, **75**  
- спінювання та викид, **76**  
- теплота, **21**  
вогнегасна речовина, **123**  
- вибір для гасіння, **123**  
- загальна витрата, **124**  
- загальна кількість, **124**  
- інтенсивність подачі, **124, 125**  
- коефіцієнт використання, **126**  
- питома витрата **124**  
вогненна сфера, **73, 104**  
вогнеперешкоджувач, **68, 121, 195**

### **Г**

горіння, **9**

- виникнення, **37**  
- механізм поширення, **9, 10**  
- режими, **9, 11, 13–15**  
- - кінетичне, **11, 15, 16, 72, 104, 120**  
- - дифузійне, **11, 13, 22, 60, 73, 77, 110**  
- - гомогенне; гетерогенне, **21, 58, 123**  
- - ламінарне; турбулентне, **73, 74**  
- - дефлаграц.; детонац., **9, 16–18, 71**  
- повнота згорання, **77**  
- рівняння реакції, **11, 81**  
- температура, **19, 199**  
- теплова теорія, **36, 37**  
горючість, **10, 33, 36, 78, 121**

### **Д**

дим, **53**  
джерело запалювання, **44, 66, 85**

### **Е**

енергія  
- вибуху, **104**  
- запалювання: мінімальна; безпечна;  
насичення, **45, 46**

### **З**

запобігання  
- виникнення горюч. системи, **119**  
- запалювання горюч. системи, **119**  
зони  
- загазованості, **69, 70, 104**  
- на пожежі:  
- - горіння, **52, 53**  
- - задимлення, тепл. впливу, **53, 55**  
- у полум'ї, **14**  
- у плоскому полум'ї, **17, 18**  
- у детонаційному фронті, **18**  
- факелу фонтану, **78**

### **І**

інтенсивність  
- випаровування, **67, 69**  
- подачі вогнегасного засобу, **124, 125**  
іскра фрикційна, **45**

### **Й**

йодне число, **38, 48**

## **К**

коефіцієнт

- використання вогнегас. засобу, 126
- надлишку повітря, 10, 197
- - на пожежі, номограма, 60, 62, 63
- стехіометричний, 11
- поверхні горіння, 66
- участі у вибуху, 71

концентрація

- безпечна кисню, 128, 129
- стехіометрична, 11
- флегматизуюча, 127, 128
- - розрахунок, 130

концентраційні межі поширення полум'я,

- 10, 12, 22, 203
- безпечні, 12, 27
- верхня та нижня КМПП, 10, 12.
- суміші газів, ф-ла ЛеШательє, 26

## **М**

методи, моделі розрахунків

- лінійної інтерполяції, 19, 25, 27, 28
- детермінований, 90
- статистичний, дерева рішень, 90, 91
- пожежі зонна, інтегр., диференц., 56

## **Н**

навантага пожежна, 59

- надлишок повітря, 10, 197
- нейтральна зона, 56, 57
- регулювання, 61–65

## **П**

пара

- маса хмари, 70, 101
- насичена, 8, 21
- ненасичена, 8, 21
- тиск, 8, 24, 25, 27, 101
- - суміші рідин, 26
- період індукції 37, 40
- піна вогнегасна, 139
- ізолююча здатність, 142
- властивості, 141, 157
- вогнегасна дія, 142
- дисперсність, стійкість, 142
- класифікація, 141, 157, 159
- кратність, 141–143
- недоліки, обмеження, 144, 157–159
- установки мобільні, 163
- установки стаціонарні, 161

піноутворювачі, 140

- загального, спец. признач., 143, 144
- полум'я
- зони; колір, температура, 14
- дифузійне, кінетичне, 13, 14
- фронт, 17
- - стаціонарний, нестационарний, 17
- - дефлаграційний, детонац., 17, 18
- - структура плоского дефл. фр. п., 17
- пожежа, 52
- газообмін, 56
- зони, 52–55
- каскадна, 67, 83, 84, 87, 89, 106, 108
- - засоби попередження, 92, 93
- класифікація
- - за умовами газообміну, 54, 83
- - за речовиною що горить, 58, 83
- - за зміною площі пожежі, 58
- локальні сценарії, 98, 109, 112
- масштабна, 83, 89
- найбільш небезп. вар-т розв., 108, 110
- параметри
- - інтенсивн. газообміну, 60
- - інтенсивність задимлення, 60
- - коеф. надлишку повітря, 60, 63
- - - номограма, 62
- - критичний час розвитку, 60
- - - за киснем, 60
- - - за температурою, 61
- - лінійна швидкість вигорання, 67, 74
- - лінійна швидкість поширення, 59
- - масова швидкість вигорання, 67, 74
- - площа, периметр, фронт пожежі, 59
- - пожежна навантага, 59
- - температура пожежі, 55, 56, 59
- - - номограма, 64
- - теплота пожежі, 60, 79
- - тривалість пожежі, 59
- періоди розвитку, 53, 54
- стадії, 55
- температурний режим, 55, 199
- явища
- - загальні; окремі, 52
- - небезпечні, 52, 66, 72, 80, 92
- пожежна безпека, 8, 27, 29, 31, 35
- пожежогасіння
- вимоги, 173
- вогнегасні речовини, 123, 152, 172
- ефективність, 124, 172

- засоби, **122**
- параметри, **123, 124**
- - час гасіння, **124**
- погасання
- - температура, **120, 121**
- - теплова теорія, **119, 120**
- прийоми, **121, 122**
- - охолодження, **122, 131, 164**
- - - зони горіння, **132**
- - - поверхні, **134**
- - - рідин піносклом, **191**
- - - розрахунок, **137**
- - ізолювання, **122, 138**
- - - вогнегасні гелі, **178**
- - - моделювання, **144**
- - - піна, **139**
- - - піноскло, **182**
- - - порошки спец. признач., **139**
- - - розрахунок, **148**
- - розбавляння, **122, 126, 156**
- - інгібування, **122, 149, 166**
- - - вогнегасними аерозолями, **151**
- - - гомогенне, гетерогенне, **150**
- - - порошки загал. признач, **150, 151**
- - - хладони, **150**
- - комбіновані склади, **167, 191**
- способи, **121, 122**
- екранування, **93–95**
- продукти горіння, **53**

## ***P***

радіус

- вогненна сфера, **73, 105**
- мінімальний полум'я, **45**
- зони загазованості, **69**
- зони опіків, **73**
- ураження ударною хвилею, **72**
- резервуар, **97**
- велике та мале «дихання», **69**
- викид та спінювання, **76**
- витікання рідини, **99, 100**
- гасіння, **154, 155**
- типи, **95, 97, 162**

Рівняння

- Клаузіуса–Клапейрона, **21, 25**
- Антуана, **25, 27**

рідини, **7**

- випаровування, **8, 24, 100, 102**
- горючі, легкозаймисті, **24**

## ***C***

- самозаймання, **37–39**
- мікробіологічне, теплове, **38**
- фізичне, хімічне, **38, 39**
- самонагрівання, **37**
- самоспалахування, **37, 39**

## ***T***

температура

- вибуху, **19**
- горіння, **15, 20**
- - види, **15**
- - розрахунок, **18, 20**
- займання, **63**
- кипіння, плавлення, **7–9**
- погасання, **120, 121**
- пожежі в огороженні, **163**
- - номограма, **64**
- - розрахунок, **61–64**
- самонагрівання, **37**
- самоспалахування, **7, 9, 11, 40**
- спалаху, **7, 9, 23, 35**
- - запас на безпеку, **33**
- - практичне значення, **24**
- - розрахунок, **33–35**
- - суміші рідин, **29, 30**
- температурні межі поширення полум'я, **22, 27**
- безпечні, **23, 29**
- практичне значення, **23, 30**
- розрахунок, **28–32**
- суміші рідин, **29, 30**

теплота

- випаровування, **21**
- згорання
- - молярна; закон Гесса, **12, 81**
- - масова; ф-ла Менделєєва, **13, 82**
- - об'ємна; суміші, **80, 81**

## ***Ф***

флегматизація, **127, 128**

- повітря парою негорючого компонента розчину, **35**

фонтани, **77**

- горіння; факел, **78**

- - безпечна відстань, **79**

- - - розрахунок, **80**

- - теплове випромінювання, **78, 102**

- класифікація, **77**

## ЛІТЕРАТУРА

1. Brushlinsky N., Ahrens M., Sokolov S., Wagner P. Fire statistics. Report No. 20. Int. association of fire and rescue services. Berlin: CTIF, 2015. 72 p.
2. Buck R., Franklin J., Berger U. Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: terminology, classification, and origins. *Integrated Environmental Assessment and Management*. 2011. № 4. V.7. P. 513–541.
3. Campbell R. Fires at outside storage tanks. Report National fire protection association: August 2014. URL: <https://www.nfpa.org/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports>.
4. Dadashov I. F., Kireev A. A., Sharshanov A.Ya. et al. Simulation of the properties two-layer material. *Functional materials*. 2018. V.25. №4. P. 774–779.
5. DiNenno P.J. *Handbook of Fire Protection Engineering*. Quincy: SFPE, NFPA, 2016. 3493 p.
6. Fossa M., Devia F. A model for radiation evaluation and cooling system design in case of fire in tank farms. *Fire Safety Journal*. 2008. V.43. №1. P. 42–49.
7. Lassman I., Yetter R.A. *Combustion*. San Diego: Elsevier Inc. 2008. 773 p.
8. Klinzing G.E., Marcus R.D., Rizk F. et al. *Pneumatic conveying of solids. A theoretical and practical approach*. London: Springer, 2010. 624 p.
9. Kunkelmann J. *Brandschutz-forschung*. Karlsruhe: Institut für Technologie, 2014. 130 p.
10. Lin S., Lijing W. Investigation on compressed air foams fire extinguishing model for oil pan fire. *Procedia Engineering*. 2012. №45. P. 663–668.
11. McAllister S., Chen J.-Y., Fernandez-Pello A.C. *Fundamentals of Combustion Processes*. New York: Springer, 2011. 302 p.
12. *The 100 Largest Losses 1978–2017. Large Property Damage Losses in the Hydrocarbon Industry*, 25th ed. New York: M&M Protection Consultants, 2018. 88 p.
13. Skarsbø L.R. *An Experimental Study of Pool Fires and Validation of Different CFD Fire Models*. Bergen: University of Bergen, 2011. 107 p.
14. Аветисян В.Г. та ін. *Організація аварійно-рятувальних робіт*: Харків: АЦЗУ, 2009. 150 с.
15. Аветисян В.Г. та ін. *Управління силами та засобами при надзвичайних ситуаціях: курс лекцій*. Харків: НУЦЗ України, 2021. 94 с.
16. Акмен Р.Г. *Паливо, основи теорії горіння та паливні пристрої*. Х.: НТУ «ХП», 2010. 95 с.
17. Антонов А.В., Боровиков В.О., Орел В.П. та ін. *Вогнегасні речовини*. К.: Пожінформтехніка, 2004. 176 с.
18. Баланюк В. та ін. Порівняння вогнегасних речовин для гасіння пожеж легкозаймистих та горючих рідин. *Пожежна безпека*. 2022. № 41. С. 12–19.
19. Баланюк В.М. Вогнегасна ефективність та флегматизувальна дія поєднання вогнегасного аерозолу, газової вогнегасної речовини і ударних хвиль. *Пожежна безпека*. №29. 2016. С. 6–12.
20. Баланюк В.М., Козяр Н.М., Копистинський Ю.О. Синергізм чинників при підшаровому аерозольному гасінні спиртів у резервуарах. *Інтернаука*. 2020. № 16(96). С. 43–48.
21. Басманов О.Є. Теоретичні основи попередження каскадного розповсюдження пожежі в резервуарних парках з нафтопродуктами і підвищення ефектив-

- ності її ліквідації: дис... д-ра техн. наук: 21.06.02. Х., УЦЗ України, 2006. 350 с.
22. Басманов О., Кулакова Г. Оцінка швидкості висхідних потоків над осередком горіння. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація. 2017. № 1. С. 5–10.
23. Боровиков В. Можливі сценарії розвитку пожеж в резервуарах для зберігання нафти і нафтопродуктів. F+S. 2014. №2 (66). С. 56–59.
24. Боровиков В., Чеповський В., Слущька О. Рекомендації щодо гасіння пожеж у спиртосховищах, що містять етиловий спирт. К.: УкрНДПБ, 2009. 76 с.
25. Брюханов О.М. Розвиток теорії і вдосконалення практики попередження та локалізації вибухів у глибоких шахтах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук: спец. 05.26.01. Дніпропетровськ, 2007. 33 с.
26. Васютяк А.О., Штайн Б.В. Експериментальні дослідження гасіння легкозаймистих рідин гранулами сухого льоду. Пожежна безпека. №27. 2015. С. 18–25.
27. Войтович Т.М. Вдосконалення технології «підшарового» пожежогасіння в резервуарах з нафтопродуктами: дис. доктора філософії, 261 «Пожежна безпека». Львів: ЛДУ БЖД, 2020. 216 с.
28. Войтович Т.М., Гусар Б.М., Ковалишин В.В. Дослідження вітчизняних піноутворювачів для «підшарового» гасіння. Пожежна безпека. 2018. №32. С. 5–14.
29. Войтович Т.М., Ковалишин В.В., Чернецький В.В. Особливості проектування і розрахунку системи «підшарового» гасіння. Пожежна безпека. 2019. №34. С. 21–27.
30. Годованець Н.М., Михалічко Б.М., Щербина О.М. Вогнегасні властивості аерозолів водних розчинів купрум хлориду. Пожежна безпека. 2012. №21. С. 65–72.
31. Григоров А.Б. Зберігання нафти та нафтопродуктів в умовах нафтобаз. Харків-Тернопіль: Крок, 2022. 184 с.
32. Грицина І.М., Грицина Н.І., Лефтеров О.А. Схема отримання компресійної піни та диспергованої води. Пробл. пож. без. 2016. №39. С. 78–83.
33. Дадашов І.Ф., Кіреєв О.О., Трегубов Д.Г., Тарахно О.В. Гасіння горючих рідин твердими пористими матеріалами та гелеутворюючими системами: монографія. Х.: НУЦЗУ, 2021. 240 с.
34. Дадашов І.Ф. Розвиток наукових основ гасіння горючих рідин твердими пористими матеріалами та гелеутворюючими системами; дис... д-ра техн. наук: 21.06.02. Харків: НУЦЗ України, 2019. 340 с.
35. Дадашов І.Ф. Дослідження властивостей вогнегасної системи на основі піноскла. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2018. № 2(28). С. 39–56.
36. Дадашов І.Ф., Трегубов Д.Г., Сенчихін Ю.М., Кіреєв О.О. Напрямки вдосконалення гасіння пожеж нафтопродуктів. Науковий вісник будівництва. 2018. Т.94. №4. С. 238–249.
37. Дендаренко Ю.Ю., Сенчихін Ю.М., Дивень В.І., Блащук О.Д. Ефективність розпилення водяних струменів віялового типу в зоні теплової дії дифузійного факела полум'я. НС: попередження та ліквідація. 2019. № 5. С. 25–31.
38. ДСТУ 2272-1993. ССБП. Пожежна безпека. Терміни та визначення. Наказ №169 від 12.11.1993. Чинний від 01.01.1995. Київ: Держст. 1995. 27 с.
39. ДСТУ 2272-2006. Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять. Наказ №162 від 29.06.2006 р. Чинний від 01.10.2006 р. Київ: Держст. 2006. 32 с.
40. ДСТУ 8828:2019. Пожежна безпека. Загальні положення. Наказ № 38 від 27.02.2019 р. Чинний від 01.01.2020 р. Київ: УкрНДЦ. 2020. 87 с.

41. Ілляшенко Т.О. та ін. Хімічно небезпечні об'єкти. Харків: НТУ «ХПІ», 2019. 152 с.
42. Калугін В.Д., Кустов М.В. Використання емульсій з легкокиплячих рідин у воді при ліквідації надзвичайних ситуацій. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2007. №5. С. 126–131.
43. Клюс П.П., Палюх В.Г., Пустовой О.С., Сенчихін Ю.М., Сировий В.В. Пожежна тактика. Харків: Основа, 1998. 590 с.
44. Ковалишин В., Кирилів Я., Грушовінчук О. Експериментальні дослідження процесу взаємодії струменів повітряно-механічної піни різної кратності під час їх польоту. Пожежна безпека. 2018. №32. С. 32–38.
45. Ковалишин В.В., Васильєва О.Е., Козяр Н.М. Пінне гасіння. Львів: Сполом, 2007. 168 с.
46. Ковальов П.А., Пономаренко Р.В. Бородич П. Ю. Довідник пожежного-рятувальника. Харків: НУЦЗ України, 2017. 114 с.
47. Козяр Н.М. Механізм дії та методологія розроблення рецептур порошкових вогнегасних засобів для гасіння пожеж класу А. Пожежна безпека. 2014. №24. С. 79–84.
48. Колєнов О.М., Безуглов О.Є., Іщук В.М. Первинна підготовка рятувальника: навчальний посібник. Х.: НУЦЗУ, 2013. 455 с.
49. Корольов Р.А., Ковалишин В.В., Штайн Б.В. Аналіз способів гасіння пожеж в резервуарах з нафтопродуктами комбінованим способом. Scientific Journal. 2017. № 6(35). С. 41–50.
50. Кусковець С. Л., Шаталов О.С., Юра С.В. Пожежна безпека виробництва. Практикум. НУВГП, Рівне, 2013. 220 с.
51. Кусковець С.Л., Шаталов О.С., Турченко В.О. Основи теорії горіння та вибуху: навч. посіб.. Рівне : НУВГП, 2012. 374 с.
52. Михайлюк О.П. та ін. Пожежна безпека об'єктів підвищеної небезпеки. Х.: УЦЗ України, 2010. 343 с.
53. НАПБ 05.035-2004. Інструкція щодо гасіння пожеж у резервуарах із нафтою та нафтопродуктами. Наказ МНС України 16 лютого 2004р. №75.
54. Нікулін О. та ін. Відпрацювання складу вогнегасної речовини у вигляді компресійної піни: звіт з НДР. Київ: УкрНДІЩЗ, 2018. 259 с.
55. Огурцов С.Ю., Семичаєвський С.В. Методика лабораторних досліджень особливостей процесів гасіння високиплячих горючих рідин. Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека. 2018. № 2. С. 64–69.
56. Пархоменко Р.В., Чалий Д.О., Войтович Д.П. Пожежна тактика. Львів: ЛДУ БЖД, 2017. 368 с.
57. Петухов Р.А. та ін. Підвищення часу існування пін швидкого тверднення. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2020. №32. С. 215–222.
58. Роянов О.М. Пожежна безпека виробництв. Х.: НУЦЗ України, 2016. 420 с.
59. Сенчихін Ю. М., Сировий В. В., Тарахно О. В. та ін. Довідник керівника гасіння пожеж. Київ: Літера-Друк, 2016. 320 с.
60. Сировий В.В., Сенчихін Ю.М., Лісняк А.А., Дерев'янка І.Г. Основи тактики гасіння пожеж. Х.: НУЦЗ України, 2015. 216 с.
61. Тарахно О.В. Теоретичні основи пожежовибухонебезпеки: підручник. Харків: АЦЗУ, 2005. 315 с.

62. Тарахно О.В., Жернокльов К.В., Трегубов Д.Г. та ін. Основні положення процесу горіння. Виникнення процесу горіння. Харків: НУЦЗ України, 2020. 410 с.
63. Тарахно О.В., Трегубов Д.Г. та ін. Теорія розвитку та припинення горіння: практикум, у 2-х частинах. Х.: НУЦЗ України, 2010. 750 с.
64. Тарахно О.В., Шаршанов А.Я. Фізико-хімічні основи використання води в пожежній справі. Харків, 2004. 252 с.
65. Трегубов Д.Г., Кіреєв О.О., Трефілова Л.М. та ін. Забезпечення балансу властивостей плавучих систем для гальмування випаровування небезпечних рідин. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. № 1(37). С. 264–281.
66. Трегубов Д.Г., Петухов Р.А., Жернокльов К.В., Савченко О.В. Підвищення ефективності локалізації надзвичайних ситуацій, пов'язаних з розливом летучих токсичних рідин шляхом використання пін із заданим часом тверднення. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2019. № 1(29). С. 37–46.
67. Трегубов Д.Г., Тарахно О.В., Гриднєв М.В. Проблеми термінології в області самовільного загоряння. X Міжнародна НПК «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації НС». Черкаси: ЧПБ НУЦЗ України, 2019. С. 216–219.
68. Улинець Е.М. Локалізація пожеж розливів нафтопродуктів у резервуарних парках: дис. канд. техн. наук: 21.06.02. УЦЗУ. 2009. 148 с.
69. Ференц Н.О., Вовк С.Я., Міллер О.В. Аналіз аварійних ситуацій і аварій в резервуарних парках складів нафти та нафтопродуктів. Пожежна безпека. 2017. №31. С.125–129.
70. Христин В.В., Маляров М.В., Бондаренко С.М. Сучасні способи підвищення ефективності гасіння пожежі розпорошеною водою. Пробл. пож. без. 2016. № 40. С. 201–205.
71. Чернецький В.В. Вплив теплових факторів пожежі на цілісність вертикальних сталевих резервуарів з нафтопродуктами: дис. канд. тех. наук: 21.06.02. ЛДУБЖД. Львів, 2015. 121 с.
72. Шаршанов А.Я., Рябова І.Б., Сайчук І.В. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. Харків: АПБУ, 2002. 355 с.
73. Шаталов О.С., Кусковець С.Л. Потенційно небезпечні виробничі технології та їх ідентифікація. Рівне: НУВГП, 2012. 204 с.
74. Ширін Л.Н. та ін. Зберігання та дистрибуція нафти, нафтопродуктів і газу: посібник. Дніпро: НТУ«ДП», 2019. 306 с.

## ДОДАТКИ

Додаток 1 – Значення коефіцієнтів  $h_j$ ,  $h_s$  для визначення концентраційних меж поширення полум'я за хімічним складом горючої речовини

$$\varphi_H = \frac{100}{1 + h_f \Delta H_f^o + \sum_{j=1}^n h_j m_j + \sum_{s=1}^q h_s l_s}, \%$$

де  $h_f$  – параметр теплоти утворення речовини, моль·кДж<sup>-1</sup>;  
 $\Delta H_f^o$  – стандартна теплота утворення речовини, кДж·моль<sup>-1</sup>;  
 $h_j$  – параметр j-го елемента в молекулі горючої речовини;  
 $m_j$  – кількість атомів j-го елемента в молекулі горючої речовини.

$h_f$	$h_j$					$h_s$	
	$h_C$	$h_H$	$h_O$	$h_N$	$h_{Cl}$	$h_{C \equiv C}$	$h_{\frac{C \equiv C}{O}}$
0,0246	9,134	2,612	-0,522	-0,494	-3,57	7,88	6,50

Додаток 2 – Коефіцієнти  $h_s$  для визначення концентраційних меж поширення полум'я (КМПШ) за хімічною будовою горючої речовини

$$\varphi_M = \frac{100}{\sum_{\mu=1}^s h_s l_s}, \%$$

де  $\varphi_M$  – концентраційна межа поширення полум'я (нижня або верхня);  
 $h_s$  – внесок s-тої структурної групи;  
 $l_s$  – кількість s-х структурних груп у хімічній формулі речовини.

Вид структурної групи	$h_s$	
	нижня КМПШ	верхня КМПШ
C—C	3,75	-0,84
C=C	11,10	0,24
C≡C	31,05	1,93
C—H	4,47	1,39
C—O	0,90	-1,40
C=O	3,12	1,31
C—N <sup>3</sup>	2,27	-1,17
C—Cl	0,71	0,71
O—H	0,52	1,25
N—H	1,90	0,69
N—N	13,84	13,84
C÷C (ароматичний зв'язок)	7,36	0,89



Додаток 3 – Ентальпія газоподібних продуктів горіння за постійного тиску

Температура, К	Ентальпія, кДж·моль <sup>-1</sup>							
	Повітря	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	HF	HCl	HBr	SO <sub>2</sub>
298,15	8,66	9,35	9,91	8,67	8,60	35,99	76,50	44,61
400	11,64	13,36	13,36	11,64	11,56	38,96	79,50	78,86
600	17,62	22,25	20,41	17,56	17,40	44,83	85,40	88,15
800	23,86	32,14	27,93	23,71	23,28	50,82	91,50	98,33
1000	30,36	42,72	35,94	30,13	29,25	57,04	97,80	109,04
1200	37,09	53,77	44,48	36,78	35,36	63,48	104,4	120,08
1400	44,00	65,19	53,51	43,61	41,63	70,12	111,2	131,35
1600	51,05	76,87	62,97	50,58	48,08	76,94	118,1	142,77
1800	58,20	88,70	72,82	57,65	54,70	83,90	125,2	154,31
2000	65,44	100,71	83,02	64,81	61,45	90,99	132,4	165,95
2200	72,76	112,82	93,41	71,97	68,27	98,08	139,6	177,55
2400	80,14	125,04	104,14	79,26	75,26	105,3	147,0	189,27
2600	86,58	137,32	115,08	86,57	82,32	112,7	154,4	201,21
2800	95,06	149,69	126,22	93,91	89,48	120,1	161,7	213,16
3000	102,60	162,10	137,56	101,3	96,74	127,6	169,4	225,15
3200	110,17	174,55	149,05	108,7	104,0	135,1	177,0	237,24
3400	117,77	187,06	160,69	116,1	111,4	142,6	184,7	249,36
3600	125,41	199,61	172,47	123,6	118,8	150,2	192,4	261,59
3800	133,08	212,19	184,37	131,1	126,3	157,9	200,0	273,89
4000	140,77	224,81	196,42	138,6	133,9	165,6	207,9	286,20

Додаток 4 – Внутрішня енергія газоподібних продуктів горіння за постійного об'єму

Температура, К	Внутрішня енергія, кДж·моль <sup>-1</sup>							
	Повітря	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	HF	HCl	HBr	SO <sub>2</sub>
298,15	6,24	6,93	7,49	6,25	6,18	33,57	74,10	42,19
400	8,39	10,11	10,11	8,39	8,31	35,71	76,20	75,61
600	12,74	17,37	15,53	12,68	12,52	39,96	80,50	83,28
800	17,36	25,64	21,43	17,21	16,78	44,32	85,00	91,83
1000	22,23	34,59	27,81	22,00	21,12	48,91	89,70	100,92
1200	27,34	44,02	34,73	27,03	25,61	53,73	94,70	110,33
1400	32,62	53,81	42,13	32,23	30,25	58,74	99,80	119,98
1600	38,05	63,87	49,97	37,58	35,08	63,94	105,10	129,77
1800	43,57	74,07	58,19	43,02	40,07	69,27	110,60	139,69
2000	49,18	84,46	66,77	48,55	45,19	74,74	116,20	149,70
2200	54,88	94,94	75,53	54,09	50,39	80,20	121,70	159,68
2400	60,63	105,54	84,64	59,75	55,75	85,84	127,50	169,77
2600	65,45	116,19	93,95	65,44	61,19	91,54	133,30	180,09
2800	72,30	126,94	103,46	71,15	66,72	97,33	138,90	190,41
3000	78,22	137,72	113,18	76,92	72,36	103,26	145,10	200,78
3200	84,16	148,55	123,04	82,70	78,03	109,05	151,00	211,24
3400	90,14	159,43	133,06	88,51	83,77	114,99	157,10	221,74
3600	96,15	170,36	143,21	94,35	89,58	120,98	163,10	232,34
3800	102,20	181,31	153,49	100,2	95,44	127,02	169,30	243,02
4000	108,26	192,31	163,91	106,1	101,3	133,09	175,40	253,70

Додаток 5 – Теплоти утворення та константи Ангуана рідин

Речовина, формула		$\Delta H_f^\circ$ , кДж·моль <sup>-1</sup>	A	B	C <sub>a</sub>
Акрилова кислота	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	-336	7,093	1913	236,0
Акролеїн	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O	-58,5	6,190	1156,947	230,60
Аліловий спирт	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	-131,8	7,659	1944,765	247,60
Амілбензол	C <sub>11</sub> H <sub>16</sub>	-34,4	6,6832	2069,486	210,43
Амілметилкетон	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	-291	9,2537	3336,004	310,07
Аміловий спирт	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	-302,5	6,307	1287,625	161,33
Амілциклогексан	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>	-233,8	6,33628	1808,242	213,89
Анілін	C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N	109	6,04162	1457,02	176,19
Ацетон	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	-217,57	6,3755	1281,721	237,09
Ацетоніприл	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> N	-25,62	7,27	1838	273,00
Бензиловий спирт	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	-220,86	8,7223	2664,684	279,64
Бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	82,9	5,6139	902,275	178,10
Бутаналь	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	-205	7,0839	1768,4	273,00
Бутандіол-2,3	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	-445,5	8,67	3024	273,00
Бутанова кислота	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-486,3	7,4394	2158,56	233,66
Бутанол	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	-274,6	8,7223	2664,684	279,64
Бутанон	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	-238,3	6,1494	1292,791	232,34
Бутилбензол	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	-13,7	6,5495	1882,488	230,94
Бутилметилкетон	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	-272	6,6317	1613,425	221,67
Бутилфенол	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O	-285,12	6,4777	1928,57	207,18
Бутилформіат	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	-437,6	6,8194	1711,66	249,58
Валеріанова кислота	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	-490,4	8,0456	2661,49	256,17
Валеріановий альдегід	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	-227,8	6,4554	1460,272	225,18
Валеролактон	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-421,14	7,331	2540,4	273,00
Гексадиєн	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	-94,1	6,132	1184,99	227,70
Гексан	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	-167,2	5,9951	1166,274	223,66
Гексилметилкетон	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	-311,7	6,9090	1980,4	230,92
Гексиловий спирт	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	-319,8	6,1789	1293,831	152,63
Гептан	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	-187,7	6,0764	1295,405	219,82
Декан	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	-249,6	6,5202	1809,975	227,70
Диацетоновий спирт	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	-425	7,216	2188	253,00
Дибутіловий ефір	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	-333,9	6,4403	1648,4	230,00
Дипропіловий ефір	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	-293,4	6,240	1397,34	240,20
Диетиламін	C <sub>4</sub> H <sub>11</sub> N	-137,34	7,22	1709	273,00
Диетиленгліколь	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	-642,84	7,2767	2727,3	273,00
Диетилізопропілметан	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	-211,2	5,9885	1318,12	215,30
Диетилкетон	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	-252	6,3555	1477,021	237,52
Диетіловий ефір	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	-252,2	6,1228	1098,945	232,37
Дізопропілкетон	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	-291	7,1	2021,4	273,00
Диоксан	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-434,16	6,989	1866,7	273,00
Додекан	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	-290,9	7,2957	2463,739	253,88
Етилацетат	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-442,9	6,2267	1244,95	217,88
Етилбензол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	29,9	6,3587	1590,66	229,58
Етиленгліколь	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	-453,8	8,1375	2753,183	252,00
o-Етилтолуол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	1,6	6,4147	1732,11	228,10
Етилформіат	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	-371,2	6,1339	1123,943	218,25
Етилциклогексан	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	-171,7	5,9953	1384,036	215,13
Ізоаміловий спирт	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	-302	6,38314	1314,36	169,06
Ізобутилацетат	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	-535,5	6,24133	1332,3	205,57

Речовина, формула		$\Delta H^{\circ}_f$ , кДж·моль <sup>-1</sup>	A	B	C <sub>a</sub>
Ізопропенілбензол	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub>	-112,9	6,3696	1680,13	219,6
м-Крезол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	-158	6,6329	1856,356	199,07
Ксилідин	C <sub>8</sub> H <sub>11</sub> N	-85,26	6,7578	2035,4	216,00
м-Ксилол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	17,25	6,588	1906,8	234,9
Кумол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	-21,5	6,0675	1461,643	207,56
Метанол	CH <sub>4</sub> O	-201,3	7,352	1660,45	245,80
Метилацетат	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	-409,1	6,1901	1157,63	219,73
Метилбутират	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	-485	6,2263	1338	214,34
Метилгексан-2	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	-194,9	5,9981	1236,026	219,55
Метилпентальдегід	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	-249,1	6,465	1519,1	223,65
Метилпропіонат	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-438,8	6,74	1667	273,00
Метилпропілкетон	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	-258,6	6,9891	1870,4	273,20
Метилформіат	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	-349,8	6,4589	1206,148	239,02
Метилциклогексан	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	-154,7	5,9518	1272,864	221,63
Метилциклопентан	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	-106,6	5,9877	1186,059	226,04
Метоксиетилацетат	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	-573,6	6,2500	1447,037	196,10
Мурашина кислота	CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	-210,6	4,9927	765,889	154,55
Нонан	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	-229	6,1777	1510,695	211,50
Ноніловий спирт	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> O	-387	5,8006	1276,626	123,10
Октан	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	-208	6,0939	1379,556	211,89
Октаналь	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	-643,96	6,7024	1815,764	218,61
Октанова кислота	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	-565,3	5,2690	1014,81	72,77
Октиловий спирт	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	-357	5,7209	1170,0	120,00
Октилциклогексан	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>	-295,6	6,6848	2213,668	209,50
Оцтова кислота	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	-437,3	7,1033	1906,53	255,97
Оцтовий ангідрид	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	-328	6,274	1444,718	199,82
Пентан	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	-146,4	5,9720	1062,555	231,81
Пентанол-2	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	-314,13	6,3504	1254,854	169,60
Піридин	C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N	140,6	6,007	1281,3	205,00
Пірол	C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> N	63	6,4196	1501,563	210,40
Пропаналь	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	-221,7	6,0657	1163,288	231,17
Пропанол	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	-257,7	7,4420	1751,981	225,13
Пропіламін	C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> N	-101,5	6,3854	1243,947	235,88
Пропілбензол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	-7,9	6,2971	1627,827	220,49
Пропілбутират	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	-556,8	6,6514	1756,37	234,96
Пропіленгліколь	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-499,9	8,640	3039	273,00
Пропілетилкетон	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	-272	6,4469	1538,995	222,58
Пропілформіат	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-417	5,9724	1126,539	203,46
Пропілциклогексан	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	-193,3	6,0135	1461,715	207,99
Пропілциклопентан	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	-148	6,0796	1438,79	222,23
Пропіонова кислота	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	-466	7,839	2410,0	273,00
Пропіоновий ангідрид	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	-289	4,944	810,31	108,74
Стирол	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	155,6	7,0654	2123,057	272,99
Тетрагідрофуран	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	-214	6,1200	1202,29	226,25
Тетраметилпентан	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	-273,2	5,9536	1397,483	213,70
Толуол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	50,17	6,050	1328,171	217,71
Триметилбензол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	-9,46	6,4429	1791,164	227,84
Триметилгексан	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	-254	5,9602	1324,049	210,74
Ундеканол	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O	-422,5	5,6520	1250,0	100,00
Фенілетилловий ефір	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	-84	6,5277	1808,8	230,00

Додаток 6 – Температури рідин (°C), за яких виникає тиск насиченої пари 0,13–101,3 кПа

Речовина, формула		0,13	1,33	5,33	13,3	53,3	101,3
Акрилова кислота	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	3,5	39,0	66,2	86,1	122,0	141,0
Акролеїн	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O	-64,5	-36,7	-15,0	2,5	34,5	52,5
Аліловий спирт	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	-20,0	10,5	33,4	50,0	80,2	96,6
Амілбензол	C <sub>11</sub> H <sub>16</sub>	40,7	80,6	140,0	149,9	199,6	205,4
Амілметилкетон	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	19,3	55,5	81,2	100,0	133,2	150,2
Аміловий спирт	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	13,6	44,9	68,0	85,8	119,8	137,8
Амілциклогексан	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>	34,9	75,3	82,4	131,1	140,2	202,8
Анілін	C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N	31,0	68,2	96,9	119,4	160,9	184,0
Ацетон	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	-59,4	-31,1	-9,4	7,7	39,5	56,5
Ацетоніприл	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> N	-47,0	-16,3	7,0	25,8	61,0	80,0
Бензиловий спирт	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	50,5	89,2	106,5	141,2	183,0	205,1
Бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	-45,0	-11,6	7,5	26,1	60,6	80,1
Буганаль	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	-50,8	-18,9	5,2	23,8	57,1	75,2
Бугандіол-2,3	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	22,2	85,3	117,4	141,2	183,8	206,5
Буганова кислота	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	25,5	61,5	88,0	108,0	144,0	163,5
Буганол	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	-1,2	30,2	53,4	70,1	100,8	117,5
Буганон	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	-48,3	-17,7	6,0	25,0	60,0	79,6
Бугілбензол	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	24,6	62,4	91,9	115,3	158,8	183,3
Бугілметилкетон	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	7,7	38,8	62,0	79,8	111,0	127,5
Бугілфенол	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O	64,6	106,5	125,0	163,5	195,7	235,0
Бугілформіат	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	-26,4	6,1	31,6	51,0	86,2	106,0
Валеріанова кислота	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	42,2	79,8	107,8	128,3	165,0	184,4
Валеріановий альдегід	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	-12,0	17,9	39,8	56,8	86,8	103,3
Валеролактон	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	37,5	79,8	101,9	136,5	182,3	207,5
Гексадиєн	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	-47,1	-17,7	4,2	23,4	67,2	76,0
Гексан	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	-54,0	-25,0	-2,3	15,8	49,6	68,7
Гексилметилкетон	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	23,6	60,9	89,8	111,7	151,0	172,9
Гексильовий спирт	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	24,4	58,2	83,7	102,8	138,0	157,0
Гептан	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	-33,0	-2,0	22,4	41,8	78,0	98,4
Декан	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	21,0	57,7	86,0	108,6	150,5	174,1
Диацетоновий спирт	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	22,0	58,0	86,7	108,2	147,5	167,9
Дибугіловий ефір	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	-43,8	-11,7	13,3	33,0	69,4	89,8
Дипропіловий ефір	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	-43,3	-11,8	13,2	33,0	69,5	89,5
Диетиламін	C <sub>4</sub> H <sub>11</sub> N	-38,9	-33,0	-11,3	6,0	38,0	55,5
Диетиленгліколь	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	91,8	133,8	164,3	187,5	226,5	244,8
Диетилізопропілметан	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	23,3	26,0	35,2	55,7	94,0	115,6
Диетилкетон	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	-12,7	17,2	39,4	56,2	86,3	102,7
Диетильовий ефір	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	-74,3	-48,0	-27,7	-11,5	18,9	34,6
Дізіпропілкетон	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	5,2	36,7	59,6	77,0	108,0	123,7
Диоксан	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-35,8	-1,2	25,2	45,1	81,8	101,1
Додекан	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	52,0	91,6	122,0	146,1	191,0	216,3
Етилацетат	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-43,4	-13,5	9,1	27,0	59,3	77,1
Етилбензол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	-9,2	25,9	52,8	74,1	113,8	136,2
Етиленгліколь	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	53,0	92,1	120,0	141,8	178,5	197,8
о-Етилтолуол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	11,9	48,5	77,0	99,6	141,6	165,1
Етилформіат	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	-60,5	-33,0	-11,5	5,4	37,1	54,3
Етилциклогексан	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	-13,7	20,6	47,6	69,0	109,1	131,8
Ізоаміловий спирт	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	15,4	49,6	74,7	94,2	129,8	132
Ізобутилацетат	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	-21,2	12,8	39,2	59,7	97,5	118,0

Речовина, формула		0,13	1,33	5,33	13,3	53,3	101,3
Ізопропенілбензол	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub>	11,6	48,5	70,6	99,6	143,9	165,4
м-Крезол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	46,9	85,7	103,0	137,7	179,0	201,9
Ксилідин	C <sub>8</sub> H <sub>11</sub> N	50,7	90,9	109,1	145,5	188,0	214,0
м-Ксилол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	-7,2	28,2	55,3	76,8	116,7	139,1
Кумол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	2,8	38,3	66,1	88,1	129,2	152,4
Метанол	CH <sub>4</sub> O	-44,0	-16,2	5,0	21,2	49,9	64,7
Метилацетат	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	-57,2	-29,3	-7,9	9,4	40,0	57,8
Метилбутират	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	-26,8	5,0	29,6	48,0	83,1	102,3
Метилгексан-2	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	-39,7	-9,1	14,9	34,1	69,8	90,1
Метилпентальдегід	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	-16,7	16,0	41,1	60,8	97,0	117,0
Метилпропіонат	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-42,0	-11,8	11,0	29,0	61,8	79,8
Метилпропікетон	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	-12,0	17,9	39,8	56,8	86,8	103,3
Метилформіат	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	-74,2	-48,6	-28,7	-12,9	16,0	32,0
Метилциклогексан	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	-35,2	3,2	22,0	42,1	79,6	100,9
Метилциклопентан	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	-53,2	-23,7	-0,6	17,9	52,3	71,8
Метоксиетилацетат	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	7,0	40,1	65,9	86,2	123,8	144,8
Мурашина кислота	CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	-20,0	2,1	24,0	43,8	80,3	100,6
Нонан	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	4,0	39,1	66,3	87,9	128,1	150,8
Ноніловий спирт	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> O	59,5	99,7	129,0	151,3	192,1	213,5
Октан	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	-14,0	19,2	45,1	65,7	104,0	125,7
Октаналь	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	73,4	101,2	120,0	133,9	156,5	168,5
Октанова кислота	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	92,3	124,0	150,6	172,2	218,9	237,5
Октиловий спирт	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	54,0	88,3	115,2	135,2	173,8	195,2
Октилциклогексан	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>	77,0	122,0	142,8	184,3	220,5	264,0
Оцтова кислота	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	-17,2	17,1	42,4	62,2	98,1	117,9
Оцтовий ангідрид	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	2,4	31,2	60,6	80,7	117,9	138,6
Пентан	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	-76,0	-50,1	-29,3	-12,6	18,5	36,1
Пентанол-2	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	1,5	32,2	54,1	70,7	102,3	119,7
Піридин	C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N	-18,9	13,2	38,0	57,8	95,6	115,2
Пірол	C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> N	-19,5	15,0	41,8	63,6	104,2	129,7
Пропаналь	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	-63,6	-35,4	-13,3	4,3	36,9	55,4
Пропанол	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	-15,0	14,7	36,4	52,8	82,0	97,8
Пропіламін	C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> N	-64,4	-37,2	-16,0	0,5	31,5	48,5
Пропілбензол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	7,4	43,4	71,6	94,0	135,7	159,2
Пропілбутират	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	-1,6	34,0	61,5	82,6	121,7	142,7
Пропіленгліколь	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	45,5	83,2	111,2	132,0	168,0	188,2
Пропілетилкетон	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	-12,4	20,9	46,5	66,6	103,5	124,0
Пропілформіат	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-43,0	-12,6	10,8	29,5	62,6	81,3
Пропілциклогексан	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	4,2	40,2	68,5	91,0	133,0	156,7
Пропіциклопентан	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	-12,6	21,3	47,9	69,1	108,6	130,9
Пропіонова кислота	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	4,6	39,7	65,8	85,1	122,0	141,1
Пропіоновий ангідрид	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	20,6	57,7	85,6	107,2	146,0	167,0
Стирол	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	-1,6	32,8	60,6	82,5	122,7	145,2
Тетрагідрофуран	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	-54,4	-25,7	-3,3	14,4	47,4	66,0
Тетраметилпентан	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	-13,0	20,8	48,0	69,6	110,1	133,0
Толуол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	-26,1	6,4	31,8	51,9	89,5	110,6
Триметилбензол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	19,3	56,8	86,0	109,1	152,0	176,1
Триметилгексан	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	-17,0	16,2	42,3	63,1	102,0	124,1
Ундеканол	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O	71,1	112,8	143,7	167,2	209,8	232,0
Фенілетиловий ефір	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	18,1	56,4	86,6	108,4	149,8	172,0

## Параметри горіння конденсованих речовин та матеріалів

Вид горючого матеріалу	Масова швидкість вигорання, $V_{\text{м}}, \text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1}$	Масова теплота згорання, $Q_{\text{н}}, \text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$	Коефіцієнт повноти згорання, $\eta$	Витрата повітря $V_{\text{п}}, \text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$	Об'єм продуктів горіння, $V_{\text{пр}}, \text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$
Рідини					
Ацетон $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	2,64	29137	0,93	7,35	8,14
Бензол $\text{C}_6\text{H}_6$	4,32	38520	0,85	10,3	10,7
Бутанол $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	2,73	36805	0,93	8,64	9,52
Бутанон $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$	3,96	34297	0,93	8,14	8,92
Гексан $\text{C}_6\text{H}_{14}$	6,18	45105	0,85	11,8	12,7
Діетиловий ефір $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	6,24	34147	0,93	8,65	9,55
Етанол $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	1,98	27200	0,93	6,95	7,91
Етилацетат $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	3,3	23613	0,93	6,06	6,83
Етилбензол $\text{C}_8\text{H}_{10}$	5,28	41386	0,85	10,56	11,07
Ізопентан $\text{C}_5\text{H}_{12}$	6,3	45220	0,86	11,9	12,8
Ізопропанол $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$	1,88	30145	0,93	8,0	8,92
Ксилол $\text{C}_8\text{H}_{10}$	1,74	41217	0,85	10,56	11,07
Метанол $\text{CH}_4\text{O}$	1,56	23839	0,97	4,99	6,06
Метилформіат $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	3,6	19788	0,97	9,52	11,52
Пентан $\text{C}_5\text{H}_{12}$	5,4	45350	0,86	11,9	12,8
Сірковуглець $\text{CS}_2$	2,21	184134	0,97	4,2	4,2
Толуол $\text{C}_7\text{H}_8$	3,78	40936	0,85	10,5	11,9
Циклогексанол $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$	2,4	35114	0,93	9,06	9,85
Тверді речовини					
Бавовна	0,318	15700	0,97	3,95	4,64
Волокно штапельне	0,54	13800	0,97	3,95	4,64
Гумовотехнічні вироби	0,90	33500	0,85	10,16	10,82
Деревина у виробках	1,11	13800	0,97	4,20	4,86
Каучук натуральний	1,08	42300	0,85	10,00	10,76
Каучук синтетичний	0,72	40200	0,85	10,16	10,82
Книги на стелажах	0,438	13400	0,97	3,95	4,64
Папір	0,636	13400	0,97	3,95	4,64
Пінополіуретан	0,90	24300	0,93	6,00	6,55
Поліетилен у виробках	0,62	47100	0,85	11,42	12,22
Поліпропілен у виробках	0,87	45600	0,85	11,42	12,22
Полістирол	1,14	39000	0,85	10,25	10,68
Торф (вологість 40%)	0,24	11300	0,97	3,96	4,62

*Навчальне видання*

**Трегубов** Дмитро Георгійович  
**Дадашов** Ілгар Фірдосі огли  
**Мінська** Наталя Вікторівна  
**Гапон** Юліана Костянтинівна  
**Чиркіна-Харламова** Марина Анатоліївна

**ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ РОЗВИТКУ  
ТА ГАСІННЯ ПОЖЕЖ ГОРЮЧИХ РІДИН**

*Навчальний посібник*

Підписано до друку 21.12.23 . Формат 60x84/16.  
Папір 80 г/м<sup>2</sup>. Друк ризограф. Ум.друк. арк. 13,3.  
Вид. № 79/23.

Сектор редакційно-видавничої діяльності  
Національного університету цивільного захисту України  
61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94

[www.nuczu.edu.ua](http://www.nuczu.edu.ua)