

О.В. Тарахно, Д.Г. Трегубов,
К.В. Жернокльов, А.І. Шепелєва,
В.В. Коврегін

**ТЕОРІЯ РОЗВИТКУ
ТА ПРИПИНЕННЯ
ГОРІННЯ**

Практикум

Частина 2

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

**О.В. Тарахно, Д.Г. Трегубов, К.В. Жернокльов,
А.І. Шепелева, В.В. Коврегін**

**ТЕОРІЯ РОЗВИТКУ
ТА ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ**

Практикум

ЧАСТИНА II

**Рекомендовано Міністерством освіти й науки
України**

Харків 2010

УДК 614.84 +519

ББК 38.96

Т 34

*Рекомендовано Міністерством освіти й науки України
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів
які навчаються за напрямом підготовки «Пожежна безпека»
(лист МОН України від 06.08.2010 № 1/11-7475)*

Рецензенти: доктор технічних наук, професор Л. М. Куценко, професор кафедри інженерної та аварійно-рятувальної техніки Національного університету цивільного захисту України; кандидат технічних наук В.В. Сабадаш, провідний науковий співробітник Харківського НДІ судових експертиз; кандидат технічних наук К.В. Курко, доцент кафедри хімії Національного педагогічного університету ім. Г.С. Сковороди.

Т 34 Теорія розвитку й припинення горіння. Практикум.
Частина II: / О.В. Тарахно, Д.Г. Трегубов, К.В. Жернокльов, А.І. Шепелева, В.В. Коврегін — Х.: НУЦЗУ, 2010. - 314 с.
ISBN 978-617-619-010-3

У виданні стисло викладені основні положення курсу «Теорія розвитку та припинення горіння» відповідно до навчальної програми для пожежно-технічних освітніх установ. Надано методичні поради, алгоритми й приклади рішення типових завдань. Наведено умови завдань для практичних і контрольних робіт, питання для самоконтролю й довідковий матеріал.

У другій частині практикуму розглянуто методики розрахунку параметрів небезпеки речовин і матеріалів, розвитку пожеж різних класів, прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій, пов'язаних з вибухом парогазових хмар, а також розрахунок параметрів пожежогасіння вогнегасниками речовинами.

Видання призначене для підготовки бакалаврів і фахівців, які вчать в області знань "Цивільна безпека" по напрямках "Цивільний захист", "Охорона праці", "Пожежна безпека", а також "Хімічна технологія".

УДК 614.84 +519

ББК 38.96

ISBN 978-617-619-010-3

© Тарахно О. В., Трегубов Д. Г.,
Жернокльов К.В., Шепелева А.І.,
Коврегін В.В., 2010

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 3. ПАРАМЕТРИ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ РЕЧОВИН І МАТЕРІАЛІВ.....	7
Глава 1. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я	8
§ 1. Розрахунок нижньої концентраційної межі поширення полум'я горючої речовини за її теплотою згоряння.....	13
§ 2. Розрахунок нижньої концентраційної межі поширення полум'я за хімічним складом горючої речовини.....	15
§ 3. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я горючої речовини за апроксимаційною формулою	23
§ 4. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я горючої речовини за її хімічною будовою	26
§ 5. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я суміші речовин	28
§ 6. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я за підвищених температур середовища	45
§ 7. Розрахунок нижньої концентраційної межі поширення полум'я пилу (аерозолі).....	47
Завдання для самоконтролю	56
Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин	66
§ 1. Розрахунок тиску насиченої пари	71
§ 2. Розрахунок температурних меж	

поширення полум'я	85
§ 3. Розрахунок температури спалаху індивідуальних рідин та їх сумішей	126
Завдання для самоконтролю	156
РОЗДІЛ 4. ПАРАМЕТРИ РОЗВИТКУ	
ПОЖЕЖІ.....	169
Глава 1. Параметри розвитку пожежі класу А	179
§ 1. Особливості розвитку пожежі класу А на відкритому просторі.....	181
§ 2. Особливості розвитку пожеж класу А в огороженні	192
Завдання для самоконтролю	231
Глава 2. Параметри розвитку пожежі класу В.....	241
§ 1. Горіння пароповітряної суміші на відкритому просторі	242
§ 2. Вигорання горючих рідин під час пожежі. Явища спінювання і викиду	261
§ 3. Горіння пароповітряної суміші у приміщенні	266
Завдання для самоконтролю	289
Глава 3. Параметри розвитку пожежі класу С	300
§ 1. Пожежі газових фонтанів	301
§ 2. Горіння газоповітряного середовища на відкритому просторі	309
§ 3. Утворення вибухонебезпечного середовища під час аварійного виходу газу у приміщення.....	322

Завдання для самоконтролю	352
РОЗДІЛ 5. ПАРАМЕТРИ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ	
ВОГНЕГАСНИМИ ЗАСОБАМИ.....	366
Глава 1. Параметри гасіння пожежі	
негорючими газами.....	378
Завдання для самоконтролю	410
Глава 2. Параметри гасіння пожежі	
охолоджуючими вогнегасними	
засобами	423
Завдання для самоконтролю	438
Глава 3. Параметри гасіння пожежі	
ізолюючими вогнегасними засобами	443
Завдання для самоконтролю	454
ДОДАТКИ.....	458
Терміни та визначення.....	490
Предметний покажчик	497
ЛІТЕРАТУРА.....	499

РОЗДІЛ 3. ПАРАМЕТРИ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ РЕЧОВИН І МАТЕРІАЛІВ

Основною властивістю процесу горіння є здатність фронту полум'я поширюватися на весь об'єм горючої суміші. Критичні умови, пов'язані з появою і поширенням полум'я, залежать від співвідношення між тепловиділенням за рахунок окиснювальної реакції у системі та тепловіддачею в навколишнє середовище. Швидкість тепловиділення та кількість тепла, що виділяється при горінні, залежать від концентрації компонентів, які реагують, початкової температури системи та інших факторів.

У багатьох технологічних процесах обертаються горючі речовини та матеріали, які за певних умов можуть утворювати різноманітні суміші з окисником, насамперед, з повітрям. Концентрація горючого компонента в цих сумішах може бути в межах від частки процента до 100 %. Однак не всі з цих концентрацій являють собою небезпеку виникнення горіння.

Горючим є середовище, здатне самостійно горіти після усунення джерела запалювання.

Горючим компонентом цієї системи за умови гомогенного горіння можуть бути горючі гази, пара, газоподібні продукти розкладання твердих речовин, завислий пил у повітрі (аерозоль).

Найважливішим принципом, який лежить в основі радикального рішення задачі забезпечення вибухобезпеки технологічного процесу, є виключення можливості утворення горючого середовища за рахунок регулювання складу газо-, паро- або пилоповітряної суміші [1], [10].

ГЛАВА 1. РОЗРАХУНОК КОНЦЕНТРАЦІЙНИХ МЕЖ ПОШИРЕННЯ ПОЛУМ'Я

Досвід показує, що виникнення та поширення горіння в сумішах горючої речовини й окисника можливе тільки в обмеженому діапазоні їх концентрацій. При спробі підпалити суміші, склад яких виходить за ці межі, стійке горіння не утворюється, і реакція, викликана нагріванням в локальній зоні, або не виникає, або затухає на деякій відстані. Отже, для газових сумішей можна виділити як мінімальну, так і максимальну концентрацію горючої речовини, за якої створюються критичні умови виникнення та поширення полум'я. Тобто для сумішей, які містять горючу речовину й окисник, розрізняють нижню і верхню концентраційну межу поширення полум'я [1] – [3], [5].

Нижня концентраційна межа поширення полум'я (НКМПП, φ_n) – найменша концентрація горючої речовини в суміші з повітрям, за якої *вже* можливе виникнення та поширення горіння.

Верхня концентраційна межа поширення полум'я (ВКМПП, φ_v) – найбільша концентрація горючої речовини в суміші з повітрям, за якої *ще* можливе виникнення та поширення горіння.

Область концентрацій горючої речовини, яка лежить між нижньою і верхньою КМПП, характеризується можливістю виникнення горіння горючої суміші в кінетичному (вибуховому) режимі і називається *областю вибухонебезпечних концентрацій*. За межами цієї області суміші стають вибухобезпечними. Але якщо за концентрацій горючої речовини менше нижньої КМПП не можливе виникнення ніякого горіння, то за концентрацій

Глава 1. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я

горючої речовини вище верхньої КМПП можливе виникнення дифузійного горіння за умови виходу струменя газу в навколишній простір і за наявності джерела запалювання (сумішоутворення до потрібних горючих концентрацій буде відбуватися в зоні горіння за рахунок дифузії окисника із навколишнього середовища).

За зміни зовнішніх умов концентраційні межі поширення полум'я можуть змінюватися. Найбільше на величину КМПП впливають:

- вміст кисню в окиснювальному середовищі ($\varphi_{O_2} \uparrow \varphi_n \downarrow, \varphi_v \uparrow$);
- домішки негорючих газів ($\varphi_{нг} \uparrow \varphi_n \uparrow, \varphi_v \downarrow$);
- початкова температура системи ($t_{поч} \uparrow \varphi_n \downarrow, \varphi_v \uparrow$);
- швидкість руху горючої суміші ($v_{гс} \uparrow \varphi_n \uparrow, \varphi_v \downarrow$);
- потужність джерела запалювання ($E_{дз} \uparrow \varphi_n \downarrow, \varphi_v \uparrow$).

Для забезпечення пожежної безпеки технологічних процесів, в яких обертаються горючі газо- або пароповітряні суміші, визначають не тільки самі концентраційні межі поширення полум'я, але і безпечні концентраційні межі, нижче або вище яких суміш гарантовано не буде запалюватися.

Безпечні концентраційні межі можна розрахувати за формулами:

$$\varphi_{нб} = 0,9(\varphi_n - 0,21), \quad (3.1)$$

$$\varphi_{вб} = 1,1(\varphi_v + 0,42), \quad (3.2)$$

де $\varphi_{нб}$, $\varphi_{вб}$ – відповідно нижня безпечна та верхня безпечна КМПП, %;

φ_n , φ_v – відповідно нижня та верхня КМПП, %.

Отже, для горючих газо- або пароповітряних сумішей характерними є області концентрацій, що

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів відображені на рис. 3.1.



Рис. 3.1 – Концентраційна шкала пожежовибухонебезпеки горючих газоповітряних сумішей:

БК – область безпечних концентрацій;

НК – область небезпечних концентрацій;

ВНК – область вибухонебезпечних концентрацій;

ВБК, ПНК – область вибухобезпечних, але пожежонебезпечних концентрацій.

Концентрація газоподібних горючих речовин у суміші з повітрям може бути визначена чи як об’ємна, чи як масова величина. Об’ємну концентрацію вимірюють у відсотках; вона показує, яку частку об’єму займає у суміші горючий газ або пара. Масову концентрацію вимірюють у $\text{г}\cdot\text{м}^{-3}$ або $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$; вона показує, яка маса горючого газу або пари міститься в одиниці об’єму суміші. Для визначення пожежовибухонебезпеки пилу використовують лише показник масової концентрації. Зв’язок між об’ємною концентрацією φ^0 та масовою φ' газу або пари можна виразити формулою:

$$\varphi' = \varphi \frac{\mu}{100V_{\mu}}, \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}, \text{ або } \varphi' = \varphi \frac{10\mu}{V_{\mu}}, \text{ г}\cdot\text{м}^{-3}. \quad (3.3)$$

Існують розрахункові та експериментальні методи визначення КМПП. Всі методи розрахунку об’ємних концентраційних меж використовуються за стандартних

Глава 1. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я
значень атмосферного тиску і температури ($P_{\text{атм}} = 101,3$ кПа, $T_{\text{поч}} = 298$ К) та за умови, що окисником є повітря. Однак на практиці зустрічаються випадки, коли вибухонебезпечні суміші можуть утворюватися за підвищених температур і тиску, а також у середовищі, збагаченому киснем або негорючими газами. Існують методи перерахунку КМПП, в яких використовуються значення КМПП, отримані за стандартних умов.

Практичне значення концентраційних меж поширення полум'я

Концентраційні межі є найважливішим показником пожежної небезпеки речовин у будь-якому агрегатному стані. Навіть якщо речовина знаходиться у конденсованому стані, перш ніж виникне горіння, у більшості випадків відбувається перехід цих речовин у газоподібний стан за рахунок випаровування або розкладання з можливістю подальшого запалювання цих газів.

КМПП застосовують:

- 1) для порівняльної оцінки пожежної небезпеки декількох речовин.
- 2) для оцінки пожежної небезпеки фактичної концентрації парогазових систем згідно зі схемою, представленою на рис. 3.1.
- 3) для визначення вибухобезпечних концентрацій пари і газів всередині технологічного обладнання.

За концентрацій горючої речовини $\varphi_{\text{факт}} < \varphi_{\text{нб}}$ можна проводити відкриті вогневі роботи і використовувати горючі речовини у технологічному процесі, а при $\varphi_{\text{факт}} > \varphi_{\text{вб}}$ можна використовувати горючу речовину у технологічному процесі лише за умови гарантованої

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів відсутності доступу повітря.

4) при розробці заходів щодо забезпечення пожежної небезпеки вентиляційних систем, для розрахунку області безпечних концентрацій газів ($\varphi_{\text{без}} < \varphi_{\text{нб}}$).

Приклад розв'язання задачі

Визначити ступінь небезпеки фактичної концентрації та можливість проведення відкритих вогневих робіт за стандартних умов, якщо в повітряному просторі приміщення міститься 2,2 % пропану C_3H_8 .

Розв'язання

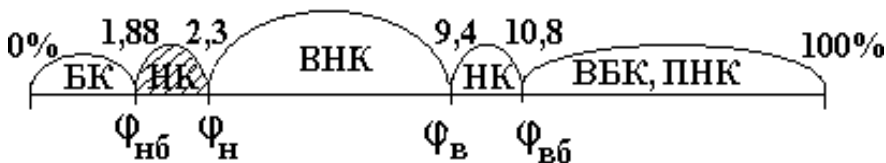
1. Визначаємо нижню та верхню КМПП пропану за довідником [7]: $\varphi_{\text{н}} = 2,3 \%$, $\varphi_{\text{в}} = 9,4 \%$.

2. Визначаємо безпечні КМПП горючої речовини за формулами (3.1, 3.2):

$$\varphi_{\text{нб}} = 0,9(2,3 - 0,21) = 1,88 \%,$$

$$\varphi_{\text{вб}} = 1,1(9,4 + 0,42) = 10,8 \%.$$

3. Для спрощення оцінки ступеня небезпеки пропану за даних умов будуюмо концентраційну шкалу відповідно до рис. 3.1:



Висновок: фактична концентрація пропану 2,2 % потрапляє в область між $\varphi_{\text{нб}}^0$ та $\varphi_{\text{н}}^0$ ($1,88 \div 2,3 \%$), тобто є

Глава 1. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я
небезпечною і за зміни зовнішніх умов загрожує вибухом. Тому відкриті вогневі роботи в даному приміщенні проводити забороняється.

§ 1. Розрахунок нижньої концентраційної межі поширення полум'я горючої речовини за її теплотою згоряння

Нижню КМПП можна визначити з урахуванням мінімальної енергії, необхідної для підтримання процесу горіння. Встановлено, що кількість тепла $Q_{кр}$, яке виділяється під час горіння бідних сумішей і може підтримувати процес горіння, для більшості вуглеводневих горючих речовин приблизно дорівнює $1830 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}$. Отже, нижню КМПП можна визначити з пропорції:

$$Q''_н - 100 \%$$

$$Q''_{кр} - \varphi_н, \%$$

$$\varphi_н = 100 \frac{Q''_{кр}}{Q''_н} = \frac{183000}{Q''_н}, \%. \quad (3.4)$$

Методика розрахунку НКМПП горючої речовини за її теплотою згоряння

1. Встановити нижчу молярну теплоту згоряння горючої речовини за довідником [7] або розрахунковим шляхом за законом Гесса (див. част. 1, розділ 1, глава 2).

2. Визначити нижчу об'ємну теплоту згоряння за стандартних умов ($V_{\mu} = 24,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$) за формулою:

$$Q''_{гор} = \frac{Q_{гор} \cdot 1000}{V_{\mu}} = 41Q_{гор}, \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

3. Визначити нижню концентраційну межу поширення полум'я за формулою (3.4).

4. Визначити нижню безпечну КМПП за формулою (3.1).

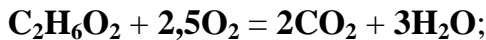
Приклад розв'язання задачі

Розрахувати нижню концентраційну межу поширення полум'я етиленгліколю $C_2H_6O_2$ за стандартних умов, виходячи з теплоти згоряння. Результат розрахунку порівняти з експериментально встановленим значенням $\varphi_H^0 = 4,3\%$.

Розв'язання

1. Визначаємо нижчу молярну теплоту згоряння етиленгліколю за законом Гесса.

За довідником [7] теплота утворення етиленгліколю дорівнює $\Delta H_f^0 = -453,8 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$.



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

2. Визначаємо нижчу об'ємну теплоту згоряння етиленгліколю за стандартних умов:

$$Q''_H = 41 \cdot 1059,3 = 43414 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

3. Визначаємо нижню концентраційну межу поширення полум'я за формулою (3.4):

$$\varphi_n = \frac{183000}{43414} = 4,2\%.$$

4. Визначаємо нижню безпечну КМПП за формулою (3.1):

$$\varphi_{нб} = 0,9(4,2 - 0,21) = 3,6\%.$$

Висновок: розрахункове значення нижньої концентраційної межі поширення полум'я етиленгліколю дорівнює 4,2 %, що відрізняється від експериментального значення на 0,1 % (похибка розрахунку 2,3 %). Нижня безпечна КМПП дорівнює 3,6 %.

§ 2. Розрахунок нижньої концентраційної межі поширення полум'я за хімічним складом горючої речовини

Нижню концентраційну межу поширення полум'я в об'ємних відсотках для індивідуальних речовин, що складаються з атомів С, Н, О, N, S, Si, P, Cl, F, можна розрахувати за формулою:

$$\varphi_n = \frac{100}{1 + h_f \Delta H_f^0 + \sum_j h_j m_j + \sum_s h_s l_s}, \% \quad (3.5)$$

де h_f – параметр теплоти утворення горючої речовини, моль·кДж⁻¹;

ΔH_f^0 – теплота утворення речовини у газоподібному стані, кДж·моль⁻¹;

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

h_j – параметр j -го елемента в молекулі горючої речовини, характеризує енергетичний внесок елемента;

m_j – число атомів j -го елемента в молекулі горючої речовини;

h_s – параметр s -го типу хімічного зв'язку в молекулі горючої речовини, характеризує енергетичний внесок даного типу зв'язку;

ℓ_s – число хімічних зв'язків s -го типу в молекулі горючої речовини.

Параметри h_f , h_j і h_s розраховують для речовин даного класу в даному окиснювальному середовищі з припущення, що адіабатична температура горіння бідних граничних сумішей є для речовин одного класу величиною приблизно однаковою й дорівнює 1500 К. Значення цих параметрів наведені у таблиці 3.1 або в довіднику [8].

Таблиця 3.1 – Значення коефіцієнтів h_f , h_j , h_s , моль·кДж⁻¹, для визначення нижньої КМПП за хімічним складом горючої речовини

h_f	0,0399	h_s	10,602
h_C	3,929	h_{Si}	34,352
h_H	4,476	h_P	27,944
h_O	-0,522	h_F	5,283
h_N	-0,494	h_{Cl}	-1,767

Якщо молекула горючої речовини має у своєму складі тільки атоми С, Н, О, N, Cl, то доцільно розраховувати нижню концентраційну межу поширення полум'я такої речовин за формулою (3.5) з урахуванням значень коефіцієнтів h_f і h_j , представлених у таблиці 3.2.

Глава 1. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я

Таблиця 3.2 – Значення коефіцієнтів h_f , h_j , h_s , моль·кДж⁻¹, для визначення НКМПП за хімічним складом горючої речовини у відсутності гетероатомів

h_f	h_j					h_s	
	h_C	h_H	h_O	h_N	h_{Cl}	$h_{C=C}$	$h^{-C} \nabla C-$
0,0246	9,134	2,612	-0,522	-0,494	-3,57	7,88	6,50

Відносне середнє квадратичне відхилення розрахунку при цьому не перевищує 9 %.

Для речовин, що відносяться до алканів, алкенів, спиртів або ароматичних вуглеводнів, похибка розрахунку нижньої КМПП за формулою (3.5) може бути зменшена, якщо використовувати значення коефіцієнтів, наведених у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Значення коефіцієнтів h_f , h_j , моль·кДж⁻¹, для визначення нижньої КМПП за формулою (3.5) для деяких класів речовин ($h_s = 0$ моль·кДж⁻¹)

Клас сполук	h_f	h_j		
		h_C	h_H	h_O
алкани	0,0399	3,919	4,483	–
алкени	0,0419	4,141	4,727	–
спирти	0,0432	4,287	4,889	-0,522
ароматичні вуглеводні	0,0489	4,904	5,569	–

Відносне середнє квадратичне відхилення розрахункових значень нижньої КМПП від експериментальних даних при використанні коефіцієнтів табл. 3.3 не перевищує 6 %.

Спрощений розрахунок нижньої КМПП органічних та елементоорганічних сполук можна провести з урахуванням адитивних внесків хімічних елементів і зв'язків різного типу за формулою:

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

$$\varphi_H = \frac{100}{\sum_j h_j m_j + \sum_s h_s \ell_s}, \% , \quad (3.6)$$

де h_j – параметр j -го елемента в молекулі речовини;

m_j – число атомів j -го елемента в молекулі речовини;

h_s – параметр s -го типу хімічного зв'язку в молекулі речовини;

ℓ_s – число хімічних зв'язків s -го типу в молекулі речовини.

Коефіцієнти h_j та h_s наведені у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Значення коефіцієнтів h_j , h_s для визначення нижньої КМПП за формулою (3.6)

h_i									h_s
h_C	h_H	h_O	h_N	h_S	h_{Si}	h_F	h_{Cl}	$h_J, h_{Br.}$	$h_{C \equiv C}$
10,1	1,5	-2,2	0,8	10,9	1,3	-2,6 ^{**} -4,2 ^{**}	-1,0	0	16,84

*) якщо $m_H \geq m_F$

***) якщо $m_H < m_F$

За цими ж коефіцієнтами можна провести розрахунок нижньої КМПП бромвмісних сполук, яка не підкоряється загальній залежності, а визначається за формулою:

$$\varphi_H = \frac{88,3 + 226 \frac{n_{Br}}{n_C}}{\sum_j h_j m_j}, \% , \quad (3.7)$$

де n_{Br} , n_C – відповідно число атомів броду та карбону в молекулі горючої речовини.

Глава 1. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я

Найменші похибки розрахунку НКМПП спостерігаються для органічних та хлорорганічних сполук, однак достатньо висока точність зберігається і для елементоорганічних сполук, які містять F, J, S, Si. Наведені формули не дозволяють розрахувати нижню КМПП водню, гідрозину, сірководню, сульфиду карбону, кінетика горіння яких та адіабатична температура горіння суттєво відрізняються від аналогічних параметрів більшості органічних сполук. Така залежність спостерігається і для бромвмісних сполук, які, до того ж, мають властивості інгібувати процес окиснення [5].

Методика розрахунку нижньої КМПП за хімічним складом горючої речовини

1. Визначити за довідником [7] або за таблицею 8 додатків теплоту утворення горючої речовини (якщо розрахунок НКМПП проводять за формулою (3.45)).

2. Визначити тип і число розрахункових структурних компонентів горючої речовини та їх енергетичний внесок.

2.1. Визначити тип та число атомів у хімічній будові горючої речовини.

2.2. Визначити тип та число розрахункових типів хімічних зв'язків у хімічній будові горючої речовини (наявність зв'язків $C \equiv C$ або $-C \underset{O}{\nabla} C-$).

2.3. Встановити значення параметрів h_j та h_s визначених типів атомів та хімічних зв'язків у хімічній будові горючої речовини залежно від хімічного складу горючої речовини за табл. 3.1, 3.2, 3.3 або 3.4.

3. Розрахувати НКМПП залежно від хімічного складу

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів горючої речовини за формулою (3.5), (3.6) або (3.7).

4. Визначити нижню безпечну КМПП за формулою (3.1).

Приклад розв'язання задачі

Визначити область безпечних концентрацій пари оцтової кислоти $C_2H_4O_2$ в суміші з повітрям.

Розв'язання

1. Визначаємо теплоту утворення оцтової кислоти за таблицею 8 додатків: $\Delta H_f^0 = -437,3 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$.

2. Особливих розрахункових типів хімічних зв'язків у хімічній будові оцтової кислоти немає. Визначаємо тип та число атомів у хімічній будові речовини. Враховуючи, що до складу оцтової кислоти входять лише атоми С, Н, О, виписуємо відповідні значення h_j із таблиці 3.2. Для полегшення розрахунків складаємо таблицю:

Тип j-го атома	Число атомів, m_j	h_j
С	2	9,134
Н	4	2,612
О	2	-0,522

3. Розраховуємо нижню концентраційну межу поширення полум'я оцтової кислоти за формулою (3.5):

$$\varphi_n = \frac{100}{1 + 0,0246 \cdot (-437,3) + (9,134 \cdot 2 + 2,612 \cdot 4 - 0,522 \cdot 2)} = 5,6\%.$$

4. Розраховуємо нижню безпечну КМПП за формулою (3.1):

$$\Phi_{\text{нб}} = 0,9(5,6 - 0,21) = 4,8 \%$$

Висновок: область безпечних концентрацій пари оцтової кислоти в суміші із повітрям лежить в межах від 0 % до 4,8 %.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати, за яких значень залишкової концентрації *o*-ксилолу C_8H_{10} в технологічному апараті можна проводити ремонтні роботи.

Розв'язання

Ремонтні роботи в технологічному апараті можна проводити, якщо залишкова концентрація пари горючої речовини в повітряному просторі апарата є безпечною ($\Phi_{\text{без}} < \Phi_{\text{нб}}$).

1. Визначаємо теплоту утворення *o*-ксилолу за довідником [7]: $\Delta H_f^\circ = 18,99 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$.

2. Речовина *o*-ксилол відноситься до ароматичних вуглеводнів, тому розрахунок нижньої КМПП проводимо за формулою (3.5) з використанням коефіцієнтів, наведених у табл. 3.3:

$$\Phi_{\text{н}} = \frac{100}{1 + 0,0489 \cdot 18,99 + 4,904 \cdot 8 + 5,569 \cdot 10} = 1,03 \%$$

3. Розраховуємо нижню безпечну КМПП *o*-ксилолу за формулою (3.1):

$$\Phi_{\text{нб}} = 0,9(1,03 - 0,21) = 0,74 \%$$

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

Висновок: ремонтні роботи можна проводити, якщо залишкова концентрація пари *o*-ксилолу в повітряному просторі апарата не перевищує 0,74 %.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати нижню концентраційну межу поширення полум'я 1-бромбутану C_4H_9Br в суміші з повітрям.

Розв'язання

Через те що до складу речовини входять атоми бром, розрахунок НКМПП проводимо за рівнянням (3.7) з використанням коефіцієнтів табл. 3.4.

1. Особливих розрахункових типів хімічних зв'язків у хімічній будові 1-бромбутану немає. Визначаємо тип і число атомів у хімічній будові речовини та їх енергетичні внески:

Тип j-го атома	Число атомів, m_j	h_j
C	4	10,1
H	9	1,5
Br	1	0

2. Розраховуємо нижню концентраційну межу поширення полум'я 1-бромбутану за формулою (3.7):

$$\varphi_n = \frac{88,3 + 226 \frac{1}{4}}{4 \cdot 10,1 + 9 \cdot 1,5 + 1 \cdot 0} = 2,69 \%$$

Висновок: розраховане значення нижньої концентраційної межі поширення полум'я 1-бромбутану дорівнює 2,69 % (експериментально визначена величина НКМПП 1-бромбутану дорівнює 2,5 %).

§ 3. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я горючої речовини за апроксимаційною формулою

Більш простим методом розрахунку як нижньої, так і верхньої об'ємної концентраційної межі є емпіричний метод розрахунку за формулою:

$$\varphi_{н(в)} = \frac{100}{a\beta + b}, \%, \quad (3.8)$$

де β – стехіометричний коефіцієнт реакції горіння даної речовини в суміші з повітрям;

a , b – константи, що визначають для нижньої і верхньої КМПП із таблиці 3.5; для верхньої КМПП коефіцієнти a і b залежать від значення β .

Таблиця 3.5 – Коефіцієнти a , b для визначення КМПП за формулою (3.8)

Область застосування	Константи		
	a	b	
для НКМПП	8,684	4,769	
для ВКМПП	при $\beta \leq 8$	1,55	0,56
	при $\beta > 8$	0,768	6,554

Методика розрахунку КМПП горючої речовини за апроксимаційною формулою

1. Скласти рівняння реакції горіння горючої речовини. Визначити значення стехіометричного коефіцієнта реакції горіння β .

2. Визначити коефіцієнти a та b для нижньої та верхньої концентраційної межі поширення полум'я за таблицею 3.5.

3. Визначити безпечні КМПП за формулами (3.1, 3.2).

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

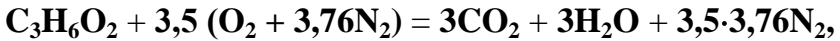
4. Якщо треба визначити масові КМПП, слід розрахувати молярну масу горючої речовини та скористатись формулою (3.3).

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати об'ємні й масові концентраційні межі поширення полум'я та область вибухобезпечних концентрацій пари етилформиату $C_3H_6O_2$ в суміші з повітрям за стандартних умов.

Розв'язання

1. Складаємо рівняння реакції горіння етилформиату:



$$\beta = 3,5.$$

2. Визначаємо коефіцієнти a та b для нижньої та верхньої концентраційної межі поширення полум'я за таблицею 3.5 і розраховуємо КМПП за формулою (3.8):

$$\varphi_n = \frac{100}{8,684 \cdot 3,5 + 4,679} = 2,85 \%,$$

$$\varphi_v = \frac{100}{1,55 \cdot 3,5 + 0,56} = 16,71 \%.$$

3. Визначаємо безпечні концентраційні межі поширення полум'я за формулами (3.1), (3.2):

$$\varphi_{нб} = 0,9(2,85 - 0,21) = 2,4 \%,$$

Глава 1. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я

$$\varphi_{\text{вб}} = 1,1(16,71 + 0,42) = 18,8 \%$$

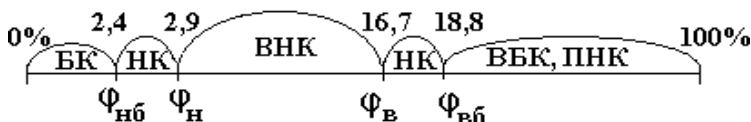
4. Визначаємо молярну масу етилформіату μ та масові КМПП за формулою (3.3) з урахуванням, що за стандартних умов молярний об'єм газу $V_{\mu} = 24,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$:

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

$$\varphi'_{\text{н}} = 10 \cdot 2,85 \frac{74}{24,4} = 86,1 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3},$$

$$\varphi'_{\text{в}} = 10 \cdot 16,71 \frac{74}{24,4} = 504,7 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}.$$

5. Для визначення вибухобезпечних концентрацій будемо шкалу концентрацій:



Висновок: концентраційні межі поширення полум'я етилформіату становлять $2,85 \div 16,71 \%$ або $86,1 \div 504,7 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$. Пара етилформіату в суміші з повітрям буде вибухобезпечною за концентрацій менше $2,4 \%$ та більше $18,8 \%$.

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

§ 4. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я горючої речовини за її хімічною будовою

Для більш точного визначення концентраційних меж поширення полум'я необхідно враховувати вплив хімічної будови горючої речовини на схильність її до окиснення.

Для розрахунку концентраційних меж за будовою горючої речовини використовують наступну формулу:

$$\varphi_{н(в)} = \frac{100}{\sum_s h_s \ell_s}, \%, \quad (3.9)$$

де $\varphi_{н(в)}^0$ – КМПП (нижня або верхня);

ℓ_s – число s-их структурних груп у хімічній формулі речовини;

h_s – внесок s-ої структурної групи, що визначають для нижньої і верхньої КМПП із таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Коефіцієнти h_s для визначення КМПП за хімічною будовою горючої речовини

Вид структурної групи	h_s	
	НКМПП	ВКМПП
C – C	3,75	-0,84
C = C	11,10	0,24
C \equiv 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 ^o	2,27	-1,77
C – Cl	0,71	0,71
O – H	0,52	1,25
N – H	1,90	0,69
N – N	13,84	13,84
ароматичне кільце	44,13	5,34

Глава 1. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я

Похибка розрахунку за формулою (3.9) не більша 9 %.

Методика розрахунку КМПП горючої речовини за хімічною будовою

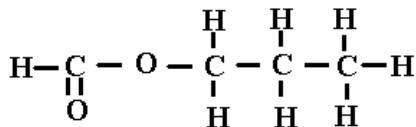
1. Записати структурну формулу горючої речовини.
2. Визначити вид та число структурних груп m_s в будові речовини. Для нижньої і верхньої КМПП вписати значення h_s для кожного встановленого типу хімічного зв'язку із таблиці 3.6.
3. Визначити нижню та верхню концентраційну межу поширення полум'я за формулою (3.9).

Приклад розв'язання задачі

Визначити умови утворення вибухонебезпечних концентрацій пари пропілформіату $C_3H_6O_2$.

Розв'язання

1. Записуємо структурну формулу пропілформіату:



2. Визначаємо вид та число структурних груп ℓ_s в будові речовини. Для нижньої і верхньої КМПП вписуємо значення h_s із таблиці 3.6 для кожного типу зв'язку. Для спрощення розрахунків складаємо таблицю:

Вид структурної групи	Число груп, ℓ_s	h_s	
		НКМПП	ВКМПП
C-C	2	3,75	-0,84
C-H	8	4,47	1,39
C-O	2	0,90	-1,40
C=O	1	3,12	1,31

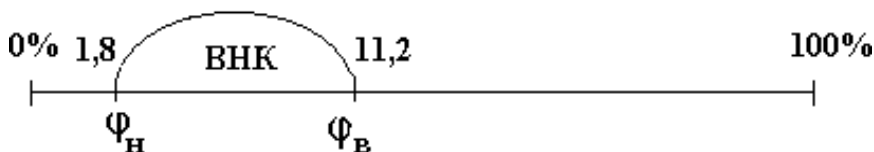
Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

3. Визначасмо нижню та верхню концентраційну межу поширення полум'я:

$$\varphi_{\text{Н}} = \frac{100}{3,75 \cdot 2 + 4,47 \cdot 8 + 0,90 \cdot 2 + 3,12 \cdot 1} = 1,8 \%,$$

$$\varphi_{\text{В}} = \frac{100}{(-0,84) \cdot 2 + 1,39 \cdot 8 + (-1,40) \cdot 2 + 1,31 \cdot 1} = 11,2 \%.$$

Для визначення вибухонебезпечних концентрацій будуємо шкалу концентрацій:



Висновок: пара етилформиату утворює вибухонебезпечне середовище в межах від 1,8 % до 11,2 %.

§ 5. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я суміші речовин

§ 5.1. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я суміші горючих речовин

У тих випадках, коли у виробництві використовується кілька різних горючих речовин і вони утворюють складну горючу суміш, концентраційні межі такої суміші розраховують, користуючись правилом Ле-Шательє, основою якого є припущення, що горючі властивості

Глава 1. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я складної суміші адитивні:

$$\varphi_{\text{н(в)сум}} = \frac{\sum \varphi_i}{\sum \frac{\varphi_i}{\varphi_{\text{н(в)}}_i}}, \% \quad (3.10)$$

де $\varphi_{\text{н(в)}}_i$ – нижня або верхня КМПП i -го горючого компонента суміші, %;

φ_i – вміст i -го компонента в суміші, %.

Проте, слід враховувати, що це правило не виконується для багатьох горючих сумішей, складові яких дуже відрізняються за своєю хімічною активністю або можуть взаємодіяти між собою. Відносно середнє квадратичне відхилення розрахункових значень КМПП сумішей від експериментальних даних при використанні формули (3.10) може досягати 30 %. Похибка розрахунку збільшується, якщо горюча суміш містить більше 75 % об. водню.

Методика розрахунку КМПП суміші горючих речовин за правилом Ле-Шательє

1. Визначити верхню або нижню концентраційну межу кожного горючого компонента газової суміші за довідником [7] або розрахувати за попередніми методиками.

2. Розрахувати КМПП суміші за її відсотковим складом та значеннями КМПП компонентів суміші за формулою (3.10).

Приклад розв'язання задачі

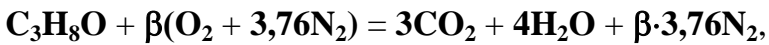
Розрахувати об'ємні концентраційні межі поширення полум'я та область вибухонебезпечних

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів
концентрацій суміші парів, яка складається із 20 об. % пропанолу C_3H_8O та 80 об. % етанолу C_2H_6O .

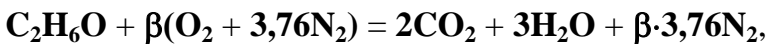
Розв'язання

1. Визначаємо верхню та нижню концентраційну межу кожного горючого компонента газової суміші. Розрахунок проводимо за апроксимаційною формулою (3.8).

1.1. Складаємо рівняння реакції горіння для кожного горючого компонента газової суміші:



$$\beta = 4,5;$$



$$\beta = 3.$$

1.2. Розраховуємо нижню і верхню КМПП компонентів суміші за формулою (3.7):

$$\varphi_{H_{C_3H_8O}} = \frac{100}{8,684 \cdot 4,5 + 4,679} = 2,29 \%,$$

$$\varphi_{B_{C_3H_8O}} = \frac{100}{1,55 \cdot 4,5 + 0,56} = 13,27 \%,$$

$$\varphi_{H_{C_2H_6O}} = \frac{100}{8,684 \cdot 3 + 4,679} = 3,25 \%,$$

$$\varphi_{B_{C_2H_6O}} = \frac{100}{1,55 \cdot 3 + 0,56} = 19,19 \%.$$

2. Розраховуємо КМПП суміші парів пропанолу та етанолу за її відсотковим складом та значенням КМПП компонентів суміші за формулою (3.10):

$$\varphi_{H_{\text{сум}}} = \frac{20 + 80}{\frac{20}{2,29} + \frac{80}{3,25}} = 3,0 \%,$$

$$\varphi_{V_{\text{сум}}} = \frac{20 + 80}{\frac{20}{13,27} + \frac{80}{19,19}} = 17,62 \%.$$

Висновок: область вибухонебезпечних концентрацій даної суміші горючих парів пропанолу та етанолу становить від 3,0 % до 17,62 %.

§ 5.2. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я суміші горючих газів з негорючими

Концентраційні межі поширення полум'я суміші горючих газів з негорючими можна визначити перерахунком КМПП, встановлених за формулою Ле-Шательє (3.10) для горючої складової газової суміші, за формулою:

$$\varphi_{H(V)_{\text{сум}}} = \frac{100\varphi_{H(V)_{\text{гор}}} \left(1 + \frac{\varphi_{\Sigma \text{нг}}}{100 - \varphi_{\Sigma \text{нг}}} \right)}{100 + \frac{\varphi_{H(V)_{\text{гор}}}}{100 - \varphi_{\Sigma \text{нг}}}}, \%, \quad (3.11)$$

де $\varphi_{H(V)_{\text{гор}}}$ – нижня або верхня КМПП, встановлені за формулою Ле-Шательє (3.10) для горючої складової

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів
газової суміші, %;

$\varphi_{\Sigma \text{нг}}$ – сумарна концентрація негорючих компонентів у газовій суміші, %.

Більш точний розрахунок враховує теплофізичні властивості негорючих газів, що входять до складу суміші, та відповідний ефект флегматизації.

Нижню КМПП сумішей горючих речовин з негорючими можна розрахувати за формулою:

$$\varphi_{\text{н}} = \frac{100}{1 + n_{\text{пов}}}, \%, \quad (3.12)$$

де $n_{\text{пов}}$ – питоме дійсне число молів повітря, що відповідає 1 молю вихідної суміші за нижньої концентраційної межі поширення полум'я; визначають за формулою:

$$n_{\text{пов}} = \sum_{k=1}^{\ell} \frac{\varphi_k}{\varphi_{\text{нк}}} - \frac{\left(\sum_{k=1}^{\ell} \varphi_k + \sum_{j=1}^m \varphi_j c_j \right)}{100}, \text{ моль моль}^{-1}, \quad (3.13)$$

де ℓ , m – число горючих (k) та негорючих (j) компонентів суміші відповідно;

φ_k – вміст k -го горючого компонента у суміші, %;

$\varphi_{\text{нк}}$ – нижня КМПП k -го горючого компонента суміші, %;

φ_j – вміст j -го негорючого компонента у суміші, %;

c_j – коефіцієнт, що характеризує j -ий негорючий компонент ($c_{\text{CO}_2} = 0,988$, $c_{\text{H}_2\text{O}} = 1,590$, $c_{\text{N}_2} = 1,247$).

Формула (3.12) є справедливою для розрахунку нижньої КМПП сумішей горючих газів, до складу яких входять С, Н, О, N, з негорючими газами CO_2 , H_2O , N_2 за

Глава 1. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я

початкової температури 25 °С за умов, що компоненти суміші не вступають у взаємодію за початкової температури і суміш не містить більше 75 % водню. Похибка розрахунку становить не більше 30 %.

Розрахунок *верхньої КМПП суміші* горючих газів з негорючими враховує ефект флегматизації:

$$\varphi_{\text{в сум}} = \frac{100}{\sum_{k=1}^l \frac{\varphi_k}{\varphi_{\text{в}k}} + \sum_{j=1}^m \frac{\varphi_j}{\varphi_{\text{в}j}}}, \% \quad (3.14)$$

де l , m – число горючих (k) та негорючих (j) компонентів суміші відповідно;

φ_k – вміст k -го горючого компонента у суміші, %;

$\varphi_{\text{в}k}$ – верхня КМПП k -го горючого компонента суміші, %;

φ_j – вміст j -го негорючого компонента у суміші, %;

$\varphi_{\text{в}j}$ – умовне значення верхньої КМПП j -го негорючого компонента суміші, %.

Умовне значення верхньої КМПП негорючого компонента розраховують за формулою:

$$\varphi_{\text{в}j} = \frac{\varphi_{\text{фл}}}{\left\{ 1 - \frac{\sum_{k=1}^l \frac{\varphi_k}{\varphi_{\text{в}k}}}{\sum_{k=1}^l \frac{\varphi_k}{\varphi_{\text{н}k}}} (1 - K_{\text{фл}}) \right\}}, \quad (3.15)$$

де $K_{\text{фл}}$ – коефіцієнт флегматизації;

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

$\varphi_{нк}$, $\varphi_{вк}$ – нижня та верхня КМПП к-го горючого компонента суміші, %;

$\varphi_{фл}$ – мінімальна флегматизуюча концентрація j-го негорючого компонента в суміші; розраховують за формулою:

$$\varphi_{фл} = 100 \frac{h_f \Delta H_{f_{сер}}^{\circ} + h'_{\phi} + \sum h'_i m_{i_{сер}}}{h''_{\phi} - 1 + \sum h''_i m_{i_{сер}}}, \% \quad (3.16)$$

де $\Delta H_{f_{сер}}^{\circ}$ – середня стандартна теплота утворення горючих складових даної суміші, кДж моль⁻¹;

$m_{i_{сер}}$ – середнє число атомів даного i-го типу у горючих компонентах суміші;

h_f , h_{ϕ} , h_i – коефіцієнти, які відповідають даному негорючому газу та атомам, що входять до складу горючих речовин суміші; визначають за таблицею 3.7.

Таблиця 3.7 – Коефіцієнти формули визначення мінімальної флегматизуючої концентрації негорючих компонентів

Коефіцієнти	Значення коефіцієнтів при розведенні		
	N ₂	H ₂ O (пара)	CO ₂
h'_{f} , моль·кДж ⁻¹	0,865·10 ⁻²	0,802·10 ⁻²	0,736·10 ⁻²
h'_{ϕ}	1,256	0,780	0,584
h'_C	2,528	1,651	1,292
h'_H	0,759	0,527	0,427
h'_O	0,197	0,446	0,570
h'_N	-0,151	-0,147	-0,133
h''_{ϕ}	2,800	2,236	2,020
h''_C	5,946	5,000	4,642
h''_H	1,486	1,250	1,160
h''_O	-2,973	-2,500	-2,321
h''_N	0	0	0

Глава 1. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я

Середню теплоту утворення горючих складових суміші та середнє число атомів даного типу розраховують як узагальнені параметри для суміші горючих газів:

$$\Delta H_{f_{\text{сер}}}^{\circ} = \frac{\sum_k \Delta H_{f_k}^{\circ} \varphi_k}{\sum_k \varphi_k}, \quad (3.17)$$

$$m_{i_{\text{сер}}} = \frac{\sum_k m_{i_k} \varphi_k}{\sum_k \varphi_k}, \quad (3.18)$$

де $\Delta H_{f_k}^{\circ}$ – стандартна теплота утворення k -го горючого компонента суміші, кДж моль⁻¹;

m_{i_k} – число атомів i -го типу в k -му горючому компоненті.

Для сумішей органічних речовин, окремо взятих молекулярного водню або оксиду карбону (II) коефіцієнти флегматизації $K_{\text{фл}}$ при використанні різних розріджувачів наведені в табл. 3.8.

Таблиця 3.8 – Значення коефіцієнта флегматизації $K_{\text{фл}}$

Флегматизатор	Флегматизація процесу горіння		
	органічних речовин	H ₂	CO
азот	0,100	0,003	0,020
діоксид карбону	0,190	0,018	0,096
водяна пара	0,160	-	-

Якщо у складі суміші наявні молекулярний водень або оксид карбону, розрахунок коефіцієнта флегматизації проводять за формулою:

$$K_{\text{фл}} = \frac{\sum_{k=1}^l \varphi_k}{\sum_{k=1}^l \frac{\varphi_k}{K_{\text{фл}k}}}, \quad (3.19)$$

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

Методика розрахунку КМПП суміші горючих газів з негорючими з використанням формули Ле-Шательє

1. Визначити нижню і верхню КМПП горючих компонентів суміші за довідником [7] або розрахунком за однією з формул (3.5) - (3.9).

2. Перерахувати концентрації горючих компонентів відносно горючої частини газової суміші.

3. За формулою Ле-Шательє (3.10) розрахувати нижню і верхню концентраційні межі поширення полум'я горючої складової газу.

4. Визначити концентраційні межі поширення полум'я суміші горючих газів з негорючими за формулою (3.11).

5. Зробити висновок про діапазон вибухонебезпечних концентрацій даної газової суміші.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати об'ємні концентраційні межі поширення полум'я та область вибухонебезпечних концентрацій коксового газу такого складу: H_2 - 57 %, CH_4 - 6,8 %, CO - 22,5 %, N_2 - 7,7 %, H_2O - 3,7 %, CO_2 - 2,3 %.

Розв'язання

Глава 1. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я

1. Визначаємо нижню та верхню концентраційні межі поширення полум'я кожного горючого компонента газової суміші за довідником [7]:

Горючий компонент суміші	$\varphi_{Н_2}$, %	$\varphi_{В_2}$, %
H ₂	4,1	75
CH ₄	5,3	14,1
CO	12,5	74

2. Визначаємо відсотковий склад горючої частини коксового газу.

Негорюча частина суміші складається з газів N₂, H₂O, CO₂ і становить:

$$\varphi^{\circ}_{\Sigma нг} = 7,7 + 3,7 + 2,3 = 13,7 \text{ \%}.$$

Перераховуємо відсотковий склад коксового газу на 100 % горючих компонентів:

$$\varphi_{H_2} = \frac{57 \cdot 100}{100 - 13,7} = 66,05 \text{ \%};$$

$$\varphi_{CH_4} = \frac{6,8 \cdot 100}{100 - 13,7} = 7,88 \text{ \%};$$

$$\varphi_{CO} = \frac{22,5 \cdot 100}{100 - 13,7} = 26,07 \text{ \%}.$$

3. Розраховуємо концентраційні межі поширення полум'я горючої складової суміші за формулою (3.10):

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

$$\varphi_{\text{гор.}} = \frac{100}{\frac{66,05}{4,1} + \frac{7,88}{5,3} + \frac{26,07}{12,5}} = 5,08 \%,$$

$$\varphi_{\text{вгор.}} = \frac{100}{\frac{66,05}{75} + \frac{7,88}{14,1} + \frac{26,07}{74}} = 55,81 \%.$$

4. Визначаємо концентраційні межі поширення полум'я суміші горючих газів з негорючими за формулою (3.11):

$$\varphi_{\text{нсум}} = \frac{100 \cdot 5,08 \left(1 + \frac{13,7}{100 - 13,7} \right)}{100 + \frac{5,08}{100 - 13,7}} = 5,9 \%;$$

$$\varphi_{\text{всум}} = \frac{100 \cdot 55,81 \left(1 + \frac{13,7}{100 - 13,7} \right)}{100 + \frac{55,81}{100 - 13,7}} = 64,3 \%.$$

5. Коксовий газ даного складу у суміші з повітрям є вибухонебезпечним у діапазоні концентрацій від 5,9 до 64,3 %.

Глава 1. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я

Методика розрахунку КМПП суміші горючих газів з негорючими з урахуванням ефекту флегматизації

1. Розрахунок нижньої КМПП суміші горючих газів з негорючими.

1.1. Визначити нижню КМПП кожного горючого компонента суміші за довідником [7] або розрахунком за формулами (3.5) - (3.9).

1.2. Розрахувати питоме дійсне число молів повітря, що відповідає 1 молу вихідної суміші за нижньої КМПП, за формулою (3.13).

1.3. Розрахувати нижню КМПП суміші горючих газів з негорючими за формулою (3.12).

2. Розрахунок верхньої КМПП суміші горючих газів з негорючими.

2.1. Визначити верхню концентраційну межу поширення полум'я кожного горючого компонента суміші за довідником [7] або розрахунком за формулами (3.8) чи (3.9).

2.2. Визначити флегматизуючу концентрацію кожного j -го негорючого компонента суміші.

2.2.1. Визначити стандартну теплоту утворення $\Delta H_{f_k}^{\circ}$ кожного горючого компонента суміші за довідником [7].

2.2.2. Розрахувати середню теплоту утворення $\Delta H_{f_{\text{сер}}}^{\circ}$ суміші горючих компонентів за формулою (3.17).

2.2.3. Розрахувати середнє число атомів i -го типу $m_{i_{\text{сер}}}$, які містяться у горючих компонентах, за формулою (3.18).

2.2.4. Розрахувати мінімальну флегматизуючу концентрацію кожного негорючого компонента суміші за формулою (3.16).

2.3. Визначити коефіцієнт флегматизації $K_{\text{фл}}$ за таблицею 3.8 або розрахунком за формулою (3.19).

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

2.4. Розрахувати умовну верхню КМПП $\varphi_{вj}$ для негорючого компонента суміші за формулою (3.15).

2.5. Розрахувати верхню КМПП суміші $\varphi_{в,сум}$ за формулою (3.14).

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати концентраційні межі поширення полум'я газової суміші, яка складається з 70 % етану, 20 % бутану, 2 % пари води, 8 % оксиду карбону (IV).

Розв'язання

1. Розраховуємо нижню КМПП суміші горючих газів з негорючими.

1.1. Визначаємо нижню КМПП кожного горючого компонента суміші [7]: $\varphi_{н C_2H_6} = 2,9 \%$; $\varphi_{н C_4H_{10}} = 1,8 \%$.

1.2. Розраховуємо питоме дійсне число молів повітря, що відповідає 1 молу вихідної суміші за нижньої концентраційної межі поширення полум'я, за формулою (3.13) з урахуванням, що $c_{H_2O} = 1,6$, $c_{CO_2} = 0,99$:

$$\begin{aligned} n_{пов} &= \left(\frac{70}{2,9} + \frac{20}{1,8} \right) - \frac{(70 + 20) + (2 \cdot 1,6 + 8 \cdot 0,99)}{100} = \\ &= 36,3 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \end{aligned}$$

1.3. Розраховуємо нижню КМПП суміші горючих газів із негорючими за формулою (3.12):

$$\varphi_{н,сум} = \frac{100}{1 + 36,3} = 2,68 \%$$

Глава 1. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я

2. Розраховуємо верхню КМПП суміші горючих газів з негорючими.

2.1. Визначаємо верхню КМПП кожного горючого компонента суміші [7]: $\varphi_{в\text{C}_2\text{H}_6} = 15\%$; $\varphi_{н\text{C}_4\text{H}_{10}} = 9,1\%$.

2.2. Визначаємо флегматизуючу концентрацію кожного j-го негорючого компонента суміші.

2.2.1. Визначаємо стандартну теплоту утворення кожного горючого компонента суміші за довідником [7]: $\Delta H_{f\text{C}_2\text{H}_6}^{\circ} = -84,68 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$; $\Delta H_{f\text{C}_4\text{H}_{10}}^{\circ} = -126 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$.

2.2.2. Розраховуємо середню теплоту утворення $\Delta H_{f\text{сер}}^{\circ}$ суміші горючих компонентів за формулою (3.17):

$$\Delta H_{f\text{сер}}^{\circ} = \frac{(-84,68) \cdot 70 + (-126) \cdot 20}{70 + 20} = -93,9 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$$

1.

2.2.3. Розраховуємо середнє число атомів i-го типу $m_{i\text{сер}}$, які містяться у горючих компонентах, за формулою (3.18).

Атомів карбону в молекулі етану 2, а в молекулі бутану – 4, отже середнє число атомів карбону:

$$m_{\text{C}} = \frac{2 \cdot 70 + 4 \cdot 20}{70 + 20} = 2,4.$$

Атомів гідрогену в молекулі етану 6, а в молекулі бутану – 10, отже середнє число атомів гідрогену:

$$m_{\text{H}} = \frac{6 \cdot 70 + 10 \cdot 20}{70 + 20} = 6,9.$$

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

2.2.4. Розраховуємо мінімальні флегматизуючі концентрації пари води та оксиду карбону (IV) в суміші за формулою (3.16) з використанням коефіцієнтів табл. 3.7:

$$\varphi_{\text{фл}_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{0,8 \cdot 10^{-2}(-93,9) + 0,78 + 1,65 \cdot 2,4 + 0,53 \cdot 6,9}{2,236 - 1 + [5 \cdot 2,4 + 1,25 \cdot 6,9]} \cdot 100 = 36,9\%;$$

$$\varphi_{\text{фл}_{\text{CO}_2}} = \frac{0,74 \cdot 10^{-2}(-93,9) + 0,58 + 1,29 \cdot 2,4 + 0,43 \cdot 6,9}{2,236 - 1 + [4,64 \cdot 2,4 + 1,16 \cdot 6,9]} \cdot 100 = 29,0\%.$$

2.3. Визначаємо коефіцієнт флегматизації $K_{\text{фл}}$ за таблицею 3.8. Оскільки горючі компоненти газової суміші відносяться до органічних речовин, коефіцієнти флегматизації становлять $K_{\text{фл}_{\text{H}_2\text{O}}} = 0,16$, $K_{\text{фл}_{\text{CO}_2}} = 0,19$.

2.4. Розраховуємо умовну верхню КМПП $\varphi_{\text{в}_j}$ води та оксиду карбону (IV) для даної суміші за формулою (3.15):

$$\varphi_{\text{в}_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{36,9}{\left\{ \left[\frac{70}{15} + \frac{20}{9,1} \right] \left(1 - \frac{70}{2,9} + \frac{20}{1,8} \right) (1 - 0,16) \right\}} = 54,5 \%,$$

$$\varphi_{\text{в}_{\text{CO}_2}} = \frac{29,0}{\left\{ \left[\frac{70}{15} + \frac{20}{9,1} \right] \left(1 - \frac{70}{2,9} + \frac{20}{1,8} \right) (1 - 0,19) \right\}} = 44,2 \%.$$

2.5. Розраховуємо верхню КМПП суміші $\varphi_{в, сум}$ за формулою (3.14):

$$\varphi_{в, сум} = \frac{100}{\left(\frac{70}{15} + \frac{20}{9,1}\right) + \left(\frac{2}{54,5} + \frac{8}{44,2}\right)} = 14,1 \text{ \%}.$$

Висновок: суміш горючих газів, що складається з 70 % етану та 20 % бутану з домішками негорючих газів, 2 % пари води та 8 % оксиду карбону (IV), має концентраційні межі поширення полум'я $2,68 \div 14,1 \text{ \%}$.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати верхню концентраційну межу поширення полум'я коксового газу такого складу: водень – 20 %, оксид карбону (II) – 8 %, метан – 53 %, азот – 19 % з урахуванням ефекту флегматизації негорючим компонентом газової суміші.

Розв'язання

1. Визначаємо стандартні теплоти утворення та КМПП горючих компонентів коксового газу за довідником [7]:

Горючий компонент суміші	ΔH_f^0 , кДж·моль ⁻¹	φ_H , %	$\varphi_{в,}$ %
H ₂	0	4,1	75
CH ₄	-74,85	5,3	14,1
CO	-110,5	12,5	74

2. Розраховуємо флегматизуючу концентрацію негорючого компонента суміші.

2.1. Розраховуємо середню теплоту утворення

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів
 $\Delta H_{f_{\text{сер}}}^{\circ}$ суміші горючих компонентів за формулою (3.17):

$$\Delta H_{f_{\text{сер}}}^{\circ} = \frac{0 \cdot 20 + (-74,85) \cdot 53 + (-110,5) \cdot 8}{20 + 53 + 8} =$$

$$= -59,9 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

2.2. Розраховуємо середнє число атомів і-го типу $m_{i_{\text{сер}}}$, які містяться у горючих компонентах, за формулою (3.18):

$$m_{\text{C}} = \frac{1 \cdot 53 + 1 \cdot 8}{20 + 53 + 8} = 0,75,$$

$$m_{\text{H}} = \frac{2 \cdot 20 + 4 \cdot 53}{20 + 53 + 8} = 3,1.$$

2.3. Розраховуємо мінімальну флегматизуючу концентрацію азоту за формулою (3.16) з використанням значень таблиці 3.7:

$$\varphi_{\text{дө}} = 100 \frac{0,865 \cdot 10^{-2} (-59,9) + 1,256 + 2,528 \cdot 0,75 + 0,759 \cdot 3,1}{2,8 - 1 + 5,946 \cdot 0,75 + 1,486 \cdot 3,1} = 39,4\%.$$

3. Через те що у складі горючої суміші наявні молекулярний водень та оксид карбону, коефіцієнт флегматизації азоту розраховуємо за формулою (3.19) з урахуванням значень таблиці 3.8:

$$K_{\text{фл}} = \frac{20 + 53 + 8}{\frac{20}{0,003} + \frac{53}{0,1} + \frac{8}{0,02}} = 0,011.$$

4. Розраховуємо умовну верхню КМПП $\varphi_{вj}$ азоту за формулою (3.15):

$$\varphi_{вN_2} = \frac{39,4}{\left\{ 1 - \frac{\frac{20}{75} + \frac{53}{14,1} + \frac{8}{74}}{\frac{20}{4,1} + \frac{53}{5,3} + \frac{8}{12,5}} (1 - 0,011) \right\}} = 54,35 \%$$

5. Розраховуємо верхню КМПП суміші $\varphi_{всум}$ за формулою (3.14):

$$\varphi_{всум} = \frac{100}{\left(\frac{20}{75} + \frac{53}{14,1} + \frac{8}{74} \right) + \frac{19}{54,35}} = 22,3 \%$$

Висновок: верхня концентраційна межа поширення полум'я коксового газу заданого складу дорівнює 22,3 %.

§ 6. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я за підвищених температур середовища

Вплив температури горючого середовища, відмінної від стандартної (25 °С), на КМПП враховується рівнянням:

$$\varphi_{н(в)}(t) = \varphi_{н(в)} \left(1 - \frac{t - 25}{Z} \right), \quad (3.20)$$

де $\varphi_{н(в)}$ – значення нижньої або верхньої КМПП за

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів стандартних умов, %;

Z – константа межі: для нижньої КМПП $Z = 1250$, для верхньої КМПП $Z = -800$;

t – температура середовища, °С.

Приклад розв’язання задачі

Визначити, як зміниться ступінь небезпеки пропану C_3H_8 , що міститься в повітряному просторі технологічного апарата в концентрації 2,2 %, якщо температура апарата зростає до 100 °С.

Розв’язання

1. Визначаємо нижню і верхню КМПП пропану за довідником [7]: $\varphi_n = 2,3$ %, $\varphi_v = 9,4$ %.

2. Розраховуємо КМПП пропану за температури горючої суміші 100 °С за формулою (3.20):

$$\varphi_{n(t=100^\circ\text{C})} = 2,3 \left(1 - \frac{100 - 25}{1250} \right) = 2,16 \%;$$

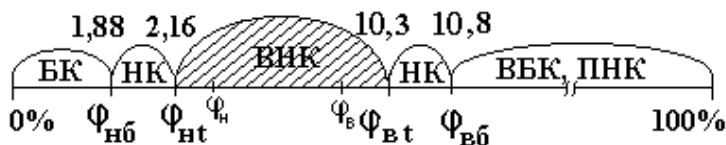
$$\varphi_{v(t=100^\circ\text{C})} = 9,4 \left(1 - \frac{100 - 25}{(-800)} \right) = 10,28 \%.$$

3. Визначаємо безпечні КМПП горючої речовини за формулами (3.1), (3.2):

$$\varphi_{nb}^0 = 0,9(2,3 - 0,21) = 1,88 \%;$$

$$\varphi_{vb}^0 = 1,1(9,4 + 0,42) = 10,8 \%.$$

4. Для оцінки ступеня небезпеки пропану за підвищеної температури будують концентраційну шкалу:



Висновок: за умови підвищення температури технологічного процесу від стандартної до 100 °С, КМПП розширюються і фактична концентрація пропану 2,2 % потрапляє в область вибухонебезпечних концентрацій (за температури 100 °С область вибухонебезпечних концентрацій знаходиться у межах 2,16 – 10,3 %), тому експлуатація технологічного процесу за даних умов забороняється.

§ 7. Розрахунок нижньої концентраційної межі поширення полум'я пилу (аерозолю)

При класифікації пилу горючих речовин за ступенем пожежної небезпеки враховують, що пил у завислому стані (аерозоль) може горіти у кінетичному режимі, тобто із вибухом [13], [14]. Тому за основний параметр пожежної небезпеки аерозолю приймають концентраційні межі поширення полум'я. Оскільки великі концентрації пилу, які дорівнюють верхній концентраційній межі поширення полум'я, не можуть довго утримуватися у повітрі, пожежовибухонебезпека аерозолю характеризується, насамперед, величиною нижньої КМПП [8].

Нижньою концентраційною межею поширення полум'я пилу називають найменшу концентрація пилу в повітрі, за якої суміш здатна займатися від джерела запалювання з подальшим поширенням горіння на весь об'єм аерозолю.

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

Пил в осілому стані (аерогель) горить подібно до подрібненого твердого матеріалу, може самоспалахувати і самозайматися, тому для оцінки пожежонебезпечних властивостей аерогелю використовують температуру самоспалахування.

Пожежна небезпека пилу залежить від багатьох факторів, насамперед, від фізико-хімічних властивостей та дисперсності (ступеня подрібнення) твердого горючого матеріалу. Чим більшою за розмірами є часточка пилу, тим їй важче нагрітися і перейти у газоподібний стан за рахунок різних фізичних та хімічних процесів (випаровування, сублімації чи розкладання). Найбільшою пожежовибухонебезпекою характеризується середньодисперсний пил (з розміром часток близько 40÷50 мкм), часточки якого відносно швидко прогриваються та справляють значний тепловий вплив на швидке запалювання наступної (сусідньої) часточки аерозолу. За подальшого зменшення розмірів часточок пилу їм складніше передати “естафету горіння” одна одній. Тому для характеристики пожежної небезпеки пилу використовують не об’ємні КМПП, а масові ($\text{г} \cdot \text{м}^{-3}$), а також розрізняють пожежовибухонебезпеку дрібнодисперсного і середньодисперсного пилу.

Надійних методів розрахунку нижньої межі поширення полум’я аерозолу не розроблено через велику кількість факторів, що значною мірою впливають на пожежовибухонебезпеку таких систем. Орієнтовно масову нижню КМПП пилу залежно від його дисперсності можна розрахувати за формулами [5]:

дрібнодисперсний аерозоль (< 10 мкм):

$$\varphi'_n = 0,41\mu\varphi_n, \text{г} \cdot \text{м}^{-3}; \quad (3.21)$$

Глава 1. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я

середньодисперсний аерозоль (40÷50 мкм):

$$\varphi'_H = 0,164\mu\varphi_H, \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (3.22)$$

де μ – молярна маса речовини, $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$;

φ_H – об'ємна нижня КМПП даної речовини у газоподібному стані, %.

Треба пам'ятати, що в техніці найчастіше зустрічається полідисперсний пил. Пожежна небезпека такого пилу буде залежати найбільше від енергетичних характеристик матеріалу, з якого отримано пил. В цьому випадку нижню масову КМПП аерозолі можна розрахувати за формулою Шоневальда:

$$\varphi'_H = a + \frac{b \cdot 10^6}{Q'_H}, \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (3.23)$$

де Q'_H – масова теплота згоряння, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$;

a , b – сталі рівняння, які залежать від виду горючої речовини (табл. 3.9).

Таблиця 3.9 – Значення коефіцієнтів a і b для визначення нижньої концентраційної межі поширення полум'я пилу за формулою Шоневальда

Пил	a	b
технічний	-0,604	1,194
палива	-7,952	1,394
металевий	-1,54	1,132
органічних речовин	-2,524	1,235

Забезпечення пожежовибухобезпеки технологічних процесів, в яких обертається горючий пил, зумовлюється

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів підтриманням робочої концентрації аерозолі нижче нижньої безпечної концентраційної межі поширення полум'я аерозолі [5], яку можна розрахувати за формулою:

$$\varphi'_{\text{нб}} = 0,9(\varphi'_n - 0,41\varphi'_n) = 0,53\varphi'_n, \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}. \quad (3.24)$$

За ступенем пожежовибухонебезпеки горючий пил поділяють на дві групи і чотири класи залежно від значення нижньої масової КМПП пилу у стані аерозолі (табл. 3.10).

Таблиця 3.10 – Класифікація горючого пилу за ступенем пожежовибухонебезпеки

I група	вибухонебезпечний пил	$\varphi'_n \leq 65 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$
1 клас	найбільш вибухонебезпечний пил	$\varphi'_n \leq 15 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$
2 клас	вибухонебезпечний пил	φ'_n від 15 до 65 $\text{г} \cdot \text{м}^{-3}$
II група	пожежонебезпечний пил	$\varphi'_n > 65 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$
3 клас	найбільш пожежонебезпечний пил	$t_{\text{cc}} \leq 250 \text{ }^\circ\text{C}$
4 клас	пожежонебезпечний пил	$t_{\text{cc}} > 250 \text{ }^\circ\text{C}$

Методика розрахунку нижньої КМПП пилу залежно від його дисперсності

1. Визначити нижню КМПП речовини у газоподібному стані за довідником [7] або розрахунком за однією із формул (3.5) - (3.9).

2. Визначити масову нижню КМПП пилу перерахунком за формулами (3.21) чи (3.22) залежно від дисперсності пилу.

3. Розрахувати нижню безпечну КМПП за формулою (3.24) та визначити ступінь пожежовибухонебезпеки даного пилу за таблицею 3.10.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати нижню концентраційну межу поширення полум'я дрібно- та середньодисперсного пилу нафталіну $C_{10}H_8$, якщо відомо, що його стандартна теплота утворення дорівнює $152 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$. Визначити ступінь пожежовибухонебезпеки аерозолі нафталіну.

Розв'язання

1. Розраховуємо нижню КМПП нафталіну за формулою (3.5).

Визначаємо тип та число атомів у хімічній будові речовини. Особливих розрахункових типів хімічних зв'язків у хімічній будові горючої речовини немає. Випишуємо значення h_j із таблиці 3.2.

Для полегшення розрахунків складаємо таблицю:

Тип j-го атома	Число атомів, m_j	h_j
C	10	9,134
H	8	2,612

$$\Phi_H = \frac{100}{1 + 0,0246 \cdot 152 + (9,134 \cdot 10 + 2,612 \cdot 8)} = 0,85 \%$$

2. Розраховуємо молярну масу нафталіну та нижню масову КМПП пилу за формулами (3.21), (3.22):

$$\mu = 10 \cdot 12 + 8 \cdot 1 = 128 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1};$$

середньодисперсний пил: $\phi'_H = 0,164 \cdot 128 \cdot 0,85 = 17,8 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$;

дрібнодисперсний пил: $\phi'_H = 0,41 \cdot 128 \cdot 0,85 = 44,6 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$.

3. Розраховуємо нижню безпечну КМПП аерозолі нафталіну за формулою (3.24):

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

середньодисперсний пил: $\varphi'_{\text{нб}} = 0,53 \cdot 17,8 = 9,5 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$;

дрібнодисперсний пил: $\varphi'_{\text{нб}} = 0,53 \cdot 44,6 = 23,6 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$.

Висновок: оскільки значення φ'_n лежать у межах від $15 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$ до $65 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$, пил нафталіну відноситься до 2 класу I групи і є вибухонебезпечним.

Методика розрахунку нижньої КМПП пилу за формулою Шоневальда

1. Розрахувати нижчу масову теплоту згоряння речовини.

1.1. Для речовини індивідуального складу визначити нижчу молярну теплоту згоряння за законом Гесса або за довідником [7] та перерахувати молярну теплоту згоряння у масову за формулою:

$$Q'_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{гор}} \cdot 1000}{\mu_{\text{гр}}}, \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

1.2. Для речовини або матеріалу складного складу розрахувати нижчу масову теплоту згоряння за формулою Менделєєва:

$$Q'_n = 339,4\varphi_C + 1256,8\varphi_H + 108,9(\varphi_S - \varphi_O - \varphi_N) - 25,1(9\varphi_H + W), \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1},$$

де φ_C , φ_H , φ_S , φ_O , φ_N , W – відповідно масовий відсотковий вміст карбону, гідрогену, сульфуру, кисню, нітрогену та води в горючій речовині.

Глава 1. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я

2. Провести розрахунок нижньої масової КМПП за формулою (3.23).

3. Розрахувати нижню безпечну КМПП за формулою (3.24) та визначити ступінь пожежовибухонебезпеки даного пилу за табл. 3.10.

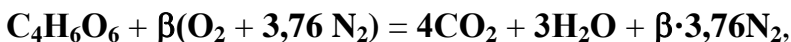
Приклад розв'язання задачі

Розрахувати нижню масову КМПП полідисперсного пилу винної кислоти $C_4H_6O_6$ ($\Delta H_f^\circ = -836$ кДж·моль⁻¹, $\mu = 150$ кг·кмоль⁻¹) і визначити групу та клас його пожежовибухонебезпеки.

Розв'язання

1. Розраховуємо нижчу масову теплоту згоряння винної кислоти.

1.1. Складаємо рівняння реакції горіння винної кислоти:



$$\beta = 2,5.$$

1.2. Визначаємо молярну теплоту згоряння речовини за законом Гесса:

$$Q_n = |(-393,78) \cdot 4 + (-241,84) \cdot 3 - (-836)| = 1465 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$$

1.

1.3. Перераховуємо молярну теплоту згоряння в масову:

$$Q'_n = \frac{1465 \cdot 1000}{150} = 9764,3 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

2. Розраховуємо нижню масову КМПП винної кислоти за формулою Шоневальда.

Оскільки винна кислота є органічною речовиною, вибираємо за табл. 3.9 сталі рівняння $a = -2,524$, $b = 1,235$.

$$\varphi'_H = -2,524 + \frac{1,235 \cdot 10^6}{9764,3} = 123,9 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}.$$

3. Розраховуємо нижню безпечну КМПП винної кислоти за формулою (3.24):

$$\varphi'_{\text{нб}} = 0,53 \cdot 123,9 = 65,7 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}.$$

Висновок: оскільки полідисперсний пил винної кислоти має $\varphi'_H > 65 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$, він відноситься до другої групи пожежонебезпечних пилів. За довідником [7] визначаємо температуру самоспалахування винної кислоти: $t_{\text{cc}} = 411 \text{ }^\circ\text{C}$. Оскільки t_{cc} винної кислоти більше $250 \text{ }^\circ\text{C}$, її пил відноситься до 4 класу пожежної небезпеки.

Приклад розв'язання задачі

Визначити безпечну концентрацію аерозолі вугільного пилу такого складу: С – 78 %, Н – 5,3 %, О – 10,3 %, S – 2,82 %, N – 1,4 %, волога W – 0,78 %.

Розв'язання

1. Розраховуємо нижчу масову теплоту згоряння вугілля даного складу за формулою Менделєєва:

$$Q'_H = 339,4 \cdot 78,0 + 1256,8 \cdot 5,3 + 108,9(2,82 - 10,3 - 1,4) -$$

Глава 1. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я

$$- 25,1(9 \cdot 5,3 + 0,78) = 25650,4 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

2. Розраховуємо нижню масову КМПП аерозолі вугільного пилу за формулою Шоневальда.

Оскільки вугільний пил є пилом палива, вибираємо з табл. 3.9 сталі рівняння $a = -7,952$, $b = 1,394$.

$$\varphi'_{\text{н}} = -7,952 + \frac{1,394 \cdot 10^6}{25650,4} = 46,4 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}.$$

3. Розраховуємо нижню безпечну КМПП аерозолі вугільного пилу за формулою (3.24):

$$\varphi'_{\text{нб}} = 0,53 \cdot 46,4 = 24,6 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}.$$

Висновок: оскільки нижня масова КМПП вугільного пилу знаходиться в межах від 15 до 65 $\text{г} \cdot \text{м}^{-3}$, цей пил є вибухонебезпечним. Безпечною буде концентрація аерозолі вугільного пилу заданого складу менше, ніж 24,6 $\text{г} \cdot \text{м}^{-3}$.

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Для речовин, наведених у таблиці, розрахувати нижню об'ємну та масову концентраційні межі поширення полум'я

- а) за теплою згоряння речовини;
- б) за хімічною будовою речовини;
- в) за апроксимаційною формулою;
- г) за хімічним складом речовини.

№	Речовина		№	Речовина	
	назва	формула		назва	формула
1	амілметилкетон	$C_7H_{14}O$	16	метилацетат	$C_3H_6O_2$
2	аміловий спирт	$C_5H_{12}O$	17	метилгексан	C_7H_{16}
3	амілциклогексан	$C_{11}H_{22}$	18	метан	CH_4
4	ацетон	C_3H_6O	19	нонан	C_9H_{20}
5	бромциклогексан	$C_6H_{11}Br$	20	піперидин	$C_5H_{11}N$
6	бромтолуол	C_7H_7Br	21	пропіленгліколь	$C_3H_8O_2$
7	бутилфенол	$C_{10}H_{14}O$	22	етилбутират	$C_6H_{12}O_2$
8	бутаналь	C_4H_8O	23	етилбутиламін	$C_6H_{15}N$
9	валеролактон	$C_5H_8O_2$	24	хлорфенол	C_6H_5OCl
10	фторетилен	C_2H_3F	25	хлорпентан	C_5H_9Cl
11	дибутиловий ефір	$C_8H_{18}O$	26	хлорпропанонітрил	C_3H_4NCl
12	діетиламін	$C_4H_{11}N$	27	циклогексан	C_6H_{12}
13	ксилідин	$C_8H_{11}N$	28	циклогексантіол	$C_6H_{12}S$
14	пропіонова кислота	$C_3H_6O_2$	29	етилбутиловий ефір	$C_6H_{14}O$
15	саліциловий альдегід	$C_7H_6O_2$	30	гексилметилкетон	$C_8H_{16}O$

Глава 1. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я

2. Для речовин, наведених у таблиці, розрахувати безпечні концентрації для виникнення горіння та визначити ступінь пожежної небезпеки фактичної об'ємної або масової концентрації з використанням: а) апроксимаційної формули; б) хімічної структури речовини.

№	Речовина	$\varphi^{\circ}_{\text{факт}}, \%$	$\varphi'_{\text{факт}}, \text{Г} \cdot \text{М}^{-3}$
1	метан CH_4	5,0	45
2	етан C_2H_6	4,0	55
3	метилацетат $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$	3,0	65
4	пропан C_3H_8	2,0	75
5	бутан C_4H_{10}	1,0	85
6	пентан C_5H_{12}	4,5	95
7	декан $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$	3,5	105
8	метилгексан C_7H_{16}	2,5	115
9	бутанол $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	1,5	125
10	октанол $\text{C}_8\text{H}_{18}\text{O}$	0,5	135
11	мурашина кислота CH_2O_2	9,9	145
12	бутанова кислота $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	8,9	165
13	циклопентан C_5H_{10}	7,9	155
14	метилацетат $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$	6,9	175
15	діетиловий ефір $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	5,9	185
16	етилен C_2H_4	4,9	195
17	метанол CH_4O	3,9	205
18	діетиламін $\text{C}_4\text{H}_{11}\text{N}$	2,9	215
19	ксилідин $\text{C}_8\text{H}_{11}\text{N}$	1,9	225
20	етанол $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	0,9	235
21	акролеїн $\text{C}_3\text{H}_4\text{O}$	1,4	245
22	бутанон $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$	2,4	255
23	пропаналь $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	4,4	265
24	пропіламін $\text{C}_3\text{H}_9\text{N}$	6,4	275
25	гексанол $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$	8,4	285
26	метилциклопентан C_6H_{12}	10,4	295
27	саліциловий альдегід $\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_2$	12,4	305
28	пропілформіат $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	14,4	315
29	діетиламін $\text{C}_4\text{H}_{11}\text{N}$	16,4	25
30	дипропіловий ефір $\text{C}_3\text{H}_{14}\text{O}$	18,4	35

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

3. Для речовин, наведених у таблиці, розрахувати об'ємні концентраційні межі поширення полум'я та визначити область вибухонебезпечних концентрацій за температур, наведених у таблиці.

№	Речовина	Формула	Температура, °С
1	бутилметилкетон	$C_6H_{12}O$	50
2	бутилформіат	$C_5H_{10}O_2$	70
3	валеріанова к-та	$C_5H_{10}O_2$	100
4	гексилметилкетон	$C_8H_{16}O$	120
5	дибутиловий ефір	$C_8H_{18}O$	150
6	діоксан	$C_4H_8O_2$	200
7	діетиламін	$C_4H_{11}N$	60
8	метилциклогексан	C_7H_{14}	80
9	м-ксилол	C_8H_{10}	110
10	тетраметилбензол	$C_{10}H_{14}$	140
11	пропіленгліколь	$C_3H_8O_2$	190
12	октанова кислота	$C_8H_{16}O_2$	50
13	пентанол-2	$C_5H_{12}O$	70
14	метилциклопентан	C_6H_{12}	100
15	метоксиетилацетат	$C_5H_{10}O_3$	120
16	октаналь	$C_8H_{16}O$	150
17	октиловий спирт	$C_8H_{18}O$	200
18	піридин	C_5H_5N	60
19	пропаналь	C_3H_6O	80
20	пропіламін	C_3H_9N	110
21	пропіонова кислота	$C_3H_6O_2$	140
22	стирол	C_8H_8	190
23	толуол	C_7H_8	90
24	триметиламін	C_3H_9N	130
25	триметилгексан	C_9H_{20}	210

Глава 1. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я

4. Для речовин, наведених у таблиці, визначити, за яких концентрацій горючої речовини в суміші з повітрям за стандартних умов всередині технологічного обладнання будуть створюватися вибухобезпечні умови.

№	Речовина	Формула	№	Речовина	Формула
1	етиленгліколь	$C_2H_6O_2$	11	метилциклогексан	C_7H_{14}
2	етилтолуол	C_9H_{12}	12	фенілетиловий ефір	$C_8H_{10}O$
3	триметилгексан	C_9H_{20}	13	ксилідин	$C_8H_{11}N$
4	оцтова кислота	$C_2H_4O_2$	14	метилпентальдегід	$C_6H_{12}O$
5	додекан	$C_{12}H_{26}$	15	пропілциклогексан	C_9H_{18}
6	метанол	CH_4O	16	ізопропенілбензол	C_9H_{10}
7	метилформіат	$C_2H_4O_2$	17	метилбутират	$C_5H_{10}O_2$
8	пентанол-2	$C_5H_{12}O$	18	метоксиетилацетат	$C_5H_{10}O_3$
9	октан	C_8H_{18}	19	тетраметилбензол	$C_{10}H_{14}$
10	крезол	C_7H_8O	20	ноніловий спирт	$C_9H_{20}O$

5. Визначити групу пожежної небезпеки та розрахувати безпечні концентрації аерозолю твердих горючих речовин:

а) дрібнодисперсного пилу;

б) середньодисперсного пилу.

№	Речовина	Формула	№	Речовина	Формула
1	β -нафтол	$C_{10}H_8O$	11	фенол	C_6H_6O
2	фурадонін	$C_8H_6O_5N_4$	12	антрацен	$C_{14}H_{10}$
3	фталева кислота	$C_8H_6O_4$	13	сечовина	CH_4N_2O
4	дифеніл	$C_{12}H_{16}$	14	дихлорнафтохінон	$C_{10}H_4O_2Cl_2$
5	нітроацетофенон	$C_8H_7NO_3$	15	сахароза	$C_{12}H_{22}O_{11}$
6	фенілнафтіламін	$C_{16}H_{13}N$	16	бензофенон	$C_{13}H_{10}O_2$
7	нітратдіетиламін	$C_4H_{12}N_2O_2$	17	ацетанлід	C_8H_9ON
8	дифенілкарбінол	$C_{13}H_{12}O$	18	малеїнова кислота	$C_4H_4O_4$
9	кротонова кислота	$C_4H_6O_2$	19	саліцилова кислота	$C_7H_6O_3$
10	амінооцтова кислота	$C_2H_5NO_2$	20	нітрат етаноламіну	$C_2H_8N_2O_4$

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

6. Визначити групу пожежної небезпеки та розрахувати безпечну концентрацію технічного пилу речовин, склад яких наведено у таблиці.

№	Матеріал пилу	Елементний склад, % (мас)					
		C	H	O	N	S	H ₂ O
1	тирса соснова	45	10	37	3		5
2	тирса березова	51	6	35	5		3
3	бавовна	50	9	30	2		9
4	вугілля буре	59	17	13	6	3	2
5	вугілля коксове	75	6	12	3	1	3
6	вугілля пісне	89	4	4	1	1	1
7	антрацит	91	4	2	2		1
8	торф	42	5	15	7		10
9	торф	59	6	16	8		11
10	торф	58	7	14	5		12
11	торф	56	6	17	6		15
12	поліпропілен	85	15				
13	поліуретан	74	7	14	5		
14	гума	72	15	5		8	
15	гума	80	14	3		3	
16	гума	77	10	8		5	
17	ячмінь дроблений	44	6	46	3	1	
18	кукурудза дроблена	43	5	48	2	1	1
19	овес дроблений	47	7	43	3		
20	горох дроблений	46	6	37	6	1	4
21	борошно житнє	43	6	46	3	1	1
22	борошно пшеничне	47	7	40	4	1	1
23	молоко сухе	42	6	44	6	2	
24	крохмаль картопляний	44	7	45	3	1	
25	крохмаль кукурудзяний	42	6	43	5		4
25	цукор тростинний	42	8	46	2,5	0,5	1
27	дріжджі кормові	35	6	44	7	6	2
28	шрот соняшниковий	41	6	44	6	1	2
29	шрот соєвий	43	6	42	7	2	
30	шрот бавовни	45	6	47	5	1,5	

Глава 1. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я

7. Для речовин, наведених у таблиці, визначити ступінь небезпеки фактичних концентрацій ϕ_1 і ϕ_2 .

№	Речовина	Формула	Фактична концентрація	
			$\phi_1, \%$	$\phi_2, \%$
1	акролеїн	C_3H_4O	1,5	18,0
2	аліловий спирт	C_3H_6O	1,0	11,0
3	амілацетат	$C_5H_8O_2$	0,5	7,0
4	ацетон	C_3H_6O	2,0	8,0
5	ацетонітрил	C_2H_3N	3,3	4,0
6	бензол	C_6H_6	0,9	6,0
7	бутанон	C_4H_8O	8,0	12,0
8	валеріановий альдегід	$C_5H_{10}O$	0,5	2,0
9	гексадієн	C_6H_{10}	0,4	4,0
10	гексилметакрилат	$C_{10}H_{18}O_2$	2,0	16,0
11	гексилловий спирт	$C_6H_{14}O$	0,8	6,0
12	діоксан	$C_3H_8O_2$	1,0	10,0
13	метиламін	CH_5N	4,0	13,0
14	метилетилловий ефір	C_3H_8O	1,2	5,8
15	толуол	C_7H_8	3,5	20,0
16	діетилєнєліколь	$C_4H_{10}O_3$	0,5	15,1
17	ізопрєн	C_5H_8	1,0	14,1
18	ксєленол	$C_8H_{10}O$	1,5	13,1
19	лімонєн	$C_{10}H_{16}$	2,0	12,1
20	масляна кислота	$C_4H_8O_2$	2,5	11,1
21	ізопропіламін	C_3H_9N	1,8	11,0
22	нафтол	$C_{10}H_8O$	3,5	9,1
23	нітробєнзол	C_6H_5NO	4,0	8,1
24	ноніловий спирт	$C_9H_{20}O$	4,5	7,1
25	олєїнова кислота	$C_{18}H_{34}O_2$	6,0	0,1
26	єтілацетат	$C_4H_8O_2$	6,5	1,6
27	пірол	C_4H_5N	7,0	4,1
28	пропілен	C_3H_6	7,5	3,1
29	формальдегід	CH_2O	8,0	2,1
30	циклопєнтадієн	C_5H_6	8,5	1,1

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

8. Визначити ступінь пожежної небезпеки фактичної концентрації пари, що утворилась у результаті випаровування заданої кількості горючої речовини в об'ємі приміщення за стандартних умов. Вважати розподіл пари горючої речовини в об'ємі приміщення рівномірним.

№	Горюча рідина			Об'єм приміщення, м ³
	назва	формула	маса, кг	
1	аліловий спирт	C_3H_6O	10,0	150
2	ацетон	C_3H_6O	100,0	500
3	бензол	C_6H_6	30,0	500
4	бутанон	C_4H_8O	30,0	175
5	гексан	C_6H_{14}	14,0	150
6	діетиленгліколь	$C_5H_{10}O$	50,0	150
7	дипропілкетон	$C_7H_{14}O$	25,0	200
8	діетиламін	$C_4H_{11}N$	10,0	144
9	етилформиат	$C_3H_6O_2$	30,0	200
10	метилциклогексан	C_7H_{14}	20,0	175
11	метилбензол	C_7H_8	20,0	144
12	метоксиетилацетат	$C_5H_{10}O_3$	30,0	150
13	мурашина кислота	CH_2O_2	50,0	200
14	октан	C_8H_{18}	20,0	150
15	пропаналь	C_3H_6O	15,0	144
16	пропіламін	C_3H_9N	15,0	144
17	пропілбутират	$C_7H_{14}O_2$	40,0	50
18	пропілетилкетон	$C_5H_{12}O$	20,0	144
19	пропілметилкетон	$C_6H_{12}O$	35,0	250
20	етилацетат	$C_4H_8O_2$	5,0	200
21	тетрагідрофуран	C_4H_8O	10,0	150
22	<i>m</i> -толуїдін	C_7H_9N	15,0	100
23	триметиламін	C_3H_9N	25,0	50
24	циклогексан	C_6H_{12}	20,0	250
25	етилнітрат	$C_2H_5O_3N$	30,0	320

Глава 1. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я

9. Для газових сумішей, склад яких наведено у таблиці, визначити область вибухонебезпечних концентрацій за формулою Ле-Шательє.

№	Склад горючого газу, %										
	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	CO ₂	N ₂	H ₂ O
1		20	60	20							
2	20	30	50								
3	10	45			40			5			
4	60		35			5					
5		15	35	25				25			
6						20	25	50	5		
7				5	25	55		5	10		
8			15	40	25	15				5	
9				50	10		20			15	5
10		15	45			25			5		10
11	15	10	20	40				10			5
12		15	10	20	40			10		5	
13			15	10	20	40		10	5		
14				5	10	20	40	18			7
15					15	10	20	40	7	3	5
16	40					25	10	20	2	3	
17	20	40					25	10		2	3
18	10	20	40					25	10	2	3
19	5	10	20	40		10			5	10	
20		5	10	20	40		10			5	10
21			5	10	20	40		20			5
22				5	10	20	40		25		
23					5	10	20	40		25	
24						5	10	20			25
25	40	15		10			5	10	20		

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

10. Для газових сумішей, склад яких наведено у таблиці, визначити з урахуванням флегматизуючого ефекту негорючих домішок:

- а) нижню КМПП та область безпечних концентрацій;
- б) верхню КМПП та область вибухобезпечних, але пожежонебезпечних концентрацій.

№	Склад горючого газу, %										
	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	CO ₂	N ₂	H ₂ O
1		20	60						20		
2		40	50							10	
3	10	45			40				5		
4	60		35							5	
5						35	25	25			15
6			25		45	20			5		5
7			25	5				50	10	10	
8			15	40		15			15	5	
9			10	30			20			15	5
10		15	25		20	25			5	10	
11	15	10	20	40				10			5
12		15	10	20	40			10		5	
13			15	10	20	40		10	5		
14				5	10	20	40	18			7
15					15	10	20	40	7	3	5
16	40					25	10	20	2	3	
17	20	40					25	10		2	3
18	10	20	40					25	10	2	3
19	5	10	20	40		10			5	10	
20		5	10	20	40		10			5	10
21			5	10	20	40		20			5
22				5	10	20	40		25		
23					5	10	20	40		25	
24						5	10	20			25
25	40	15		10			5	10	20		

Глава 1. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я

11*. Розрахувати температуру і тиск під час вибуху пилу дифенілу ($C_{12}H_{10}$) стехіометричної концентрації. Внутрішня енергія вибухової суміші за стандартних умов дорівнює $8,36 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$. Початковий тиск – $101,3 \text{ кПа}$, теплота згорання дифенілу – $6239 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$. У процесі вибуху бере участь 90% пилу.

ГЛАВА 2. ПАРАМЕТРИ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ РІДИН

Для механізму горіння рідин найважливішою обставиною є те, що температура їх кипіння завжди є нижчою, ніж температура самоспалахування. Отже, перш ніж виникне швидка реакція окиснення, речовина перейде із рідкого стану в газоподібний, а горіння буде гомогенним [1] – [3], [5], [12].

Рідина може випаровуватися у відкритий або закритий простір. При випаровуванні в закритому просторі через певний час встановлюється *динамічна рівновага* – стан системи, за якого кількість рідини, що випаровується, дорівнює кількості сконденсованої пари. Відбувається насичення газової фази, а пара, що утворюється при динамічній рівновазі в системі, називається *насиченою парою*. Якщо рідина знаходиться в незакритому об'ємі, то частина пари весь час дифундує в навколишній простір. При цьому кількість речовини, що випарувалася, буде більшою, ніж кількість сконденсованої речовини. Динамічна рівновага не встановлюється, пара є *ненасиченою*, а випаровування буде тривати, доки вся рідина не випарується.

Концентрація пари над поверхнею рідини залежить від її температури. За збільшення температури рідини зростає інтенсивність її випаровування, що зумовлює зростання концентрації та тиску пари. Таким чином, пожежну небезпеку горючої рідини можна оцінювати не за концентрацією її пари, а за температурою самої рідини.

Для встановлення пожежної небезпеки насиченої пари рідини замість концентраційних меж можна вказати температури рідини, за яких ці концентрації

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

утворюються, – *температурні межі поширення полум'я*.

Температурними межами поширення полум'я (ТМПП) (нижньою або верхньою) називають такі температури рідини, за яких над її поверхнею утворюється насичена пара в концентрації, що відповідає нижній або верхній концентраційній межі поширення полум'я.

За температур нижче нижньої температурної межі концентрація насиченої пари буде нижче нижньої концентраційної межі і тому буде безпечною. За температур вище верхньої температурної межі горіння насиченої пари всередині технологічного обладнання не можливе через нестачу окисника, тобто кінетичного вибухового горіння не буде. Однак таку пару можна запалити при виході її із ємності у повітря, тобто можливе горіння у дифузійному режимі. Отже, насичена пара в даній області температур є вибухобезпечною, але пожежонебезпечною.

Температурні межі поширення полум'я, так само як і концентраційні межі, не є постійними величинами і залежать від ряду чинників, основними з яких є:

- вміст кисню в окиснювальному середовищі ($\varphi_{\text{O}_2} \uparrow t_{\text{H}} \downarrow, t_{\text{B}} \uparrow$);
- домішки негорючих рідин або негорючих газів у пароповітряному середовищі ($\varphi_{\text{нр}}, \varphi_{\text{нг}} \uparrow t_{\text{H}} \uparrow, t_{\text{B}} \downarrow$);
- загальний тиск системи ($P_{\text{заг}} \uparrow t_{\text{H}} \uparrow, t_{\text{B}} \uparrow$);
- потужність джерела запалювання ($E_{\text{дз}} \uparrow t_{\text{H}} \downarrow, t_{\text{B}} \uparrow$).

Через те що за зміни зовнішніх умов температурні межі поширення полум'я можуть змінюватися, для забезпечення пожежної безпеки під час експлуатації горючих рідин визначають не тільки температурні межі, але і **безпечні температурні межі**, нижче або вище

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів
яких пароповітряна суміш, що утворюється над поверхнею рідини, гарантовано не буде займатися.

Таким чином, для рідин характерними є наступні області температур і відповідних їм концентрацій насиченої пари:



Рис. 3.2 – Температурна шкала пожежовибухонебезпеки горючих рідин:

БК – область безпечних концентрацій насиченої пари;

НК – область небезпечних концентрацій насиченої пари;

ВНК – область вибухонебезпечних концентрацій пари;

ВБК, ПНК – область вибухобезпечних, але пожежонебезпечних концентрацій пари.

Практичне значення температурних меж поширення полум'я

Використання параметрів 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) провести порівняльну оцінку пожежної небезпеки двох рідин;

2) визначити ступінь пожежної небезпеки насиченої пари рідини в ємностях і закритих технологічних апаратах за фактичної температури;

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

3) визначити область безпечних температур роботи технологічного обладнання.

Для забезпечення пожежної безпеки технологічних процесів потрібно обирати температурний режим роботи апаратів таким чином, щоб робочі концентрації знаходилися поза зоною небезпечних концентрацій. Тому *безпечні робочі температури* повинні бути нижче нижньої безпечної або вище верхньої безпечної температурної межі поширення полум'я:

$$t_{\text{роббез}} < t_{\text{нб}} \quad \text{або} \quad t_{\text{роббез}} > t_{\text{вб}}.$$

4) визначити найбільш пожежовибухонебезпечний час року для використання даної горючої речовини.

За однакової температури концентрація пари над рідиною у відкритому об'ємі завжди є меншою, ніж у закритому, за рахунок втрат речовини через її дифузію у навколишнє середовище. Тому для досягнення концентрації пари, рівної нижній КМПП, необхідно дещо збільшити температуру рідини. Така температура рідини називається *температурою спалаху*, вона є важливим параметром для визначення ступеня пожежовибухонебезпеки рідини на відкритому просторі.

Температура спалаху ($t_{\text{сн}}$) – 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.

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

Стійке горіння над поверхнею рідини за даної температури не встановлюється через те, що інтенсивність випаровування рідини є меншою за інтенсивність вигорання пароповітряної суміші. За збільшення температури рідини інтенсивність випаровування рідини збільшується і стає рівною інтенсивності вигорання пароповітряної суміші.

Температура займання (t_3) – 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.

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

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

Практичне значення температури спалаху

1. Показник температури спалаху прийнято за основу класифікації рідин за ступенем їх пожежної небезпеки. Розрізняють горючі і легкозайmistі рідини. До **горючих (ГР)** відносять рідини з температурою спалаху в закритому тиглі більше за 61°C . Горючі рідини спалахують від джерела запалювання тільки за підвищеної температури. Рідини із температурою спалаху в закритому тиглі 61°C і нижче відносять до класу **легкозайmistих рідин (ЛЗР)**. Легкозайmistі рідини з температурою спалаху 28°C і нижче відносять до **особливо небезпечних рідин**.

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

2. Температуру спалаху використовують для визначення категорії пожежної небезпеки приміщень та будівель, умов безпечного транспортування, зберігання, застосування рідин, вибору рівня захисту обладнання та інтенсивності подавання водопінних засобів гасіння під час пожежі.

§ 1. Розрахунок тиску насиченої пари

Залежність між тиском і концентрацією насиченої пари можна знайти зі співвідношення:

$$\begin{aligned} 100 \% \text{ парогазової суміші} & - P_{\text{заг}} \\ \varphi_{\text{нп}} \% \text{ пари рідини} & - P_{\text{нп}} \end{aligned}$$

Звідси можна виразити взаємозв'язок між концентрацією і тиском насиченої пари:

$$P_{\text{нп}} = P_{\text{заг}} \frac{\varphi_{\text{нп}}}{100}, \text{ кПа} \quad (3.25)$$

$$\text{або} \quad \varphi_{\text{нп}} = 100 \frac{P_{\text{нп}}}{P_{\text{заг}}}, \%, \quad (3.26)$$

де $\varphi_{\text{нп}}$ – об'ємна концентрація насиченої пари в пароповітряній суміші над поверхнею рідини, %;

$P_{\text{нп}}$ – тиск насиченої пари, кПа;

$P_{\text{заг}}$ – загальний тиск пароповітряної суміші над поверхнею рідини, кПа.

Знаючи тиск насиченої пари, можна розрахувати фактичну концентрацію цієї пари і визначити ступінь її пожежної небезпеки за схемою, представленою на рис. 3.2.

Фазовий перехід речовини з рідкого стану в

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів газоподібний описується рівнянням Клапейрона-Клаузіуса, яке визначає залежність тиску насиченої пари від температури рідини та її виду (теплоти випаровування):

$$\frac{d \ln P_{\text{нп}}}{dT} = \frac{\Delta H_{\text{вип рід}}}{RT_{\text{рід}}^2},$$

де $\Delta H_{\text{вип рід}}$ – молярна теплота випаровування і-го горючого компонента; кДж·моль⁻¹;

$T_{\text{рід}}$ – температура рідини, К.

Для того щоб розрахувати тиск насиченої пари *індивідуальної рідини* за будь-якої температури рідини, інтегруємо рівняння Клапейрона-Клаузіуса, вважаючи, що значення теплоти пароутворення не залежить від температури:

$$\ln \frac{P_{\text{нп}}(T_2)}{P_{\text{нп}}(T_1)} = \frac{\Delta H_{\text{вип рід}}}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{рід}_1}} - \frac{1}{T_{\text{рід}_2}} \right). \quad (3.27)$$

Тиск насиченої пари *індивідуальної рідини* або деяких сумішей рідин залежно від температури рідини можна визначити за *рівнянням Антуана*:

$$\lg P_{\text{нп}} = A - \frac{B}{t_{\text{рід}} + C_a} \quad \text{або} \quad P_{\text{нп}} = 10^{A - \frac{B}{t_{\text{рід}} + C_a}}, \quad (3.28)$$

де $t_{\text{рід}}$ – температура рідини, °С;

A , B , C_a – константи, що визначаються для кожної

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

рідини за довідником [7] або [9] (для деяких речовин наведені у табл. 8 додатків).

Для багатьох поширених горючих рідин тиск насиченої пари визначений для ряду температур і зведений у довідниках у вигляді таблиць (для деяких рідин такі дані наведено у табл. 9 додатків). У цьому випадку розрахувати тиск насиченої пари за визначеної температури рідини можна методом *лінійної інтерполяції*, використовуючи схему:

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

де t_{ϕ} – фактична температура рідини, за якої визначається тиск насиченої пари $P_{\text{нп}}(t_{\phi})$;

t_1, t_2 – значення температур рідини, що є найближчими до заданої температури t_{ϕ} , °C;

$P_{\text{нп}}(t_1), P_{\text{нп}}(t_2)$ – тиск насиченої пари за відповідних температур рідини, визначається за довідниковими даними (наприклад, табл. 9 додатків).

Розрахунок тиску насиченої пари за даної температури проводять за формулою:

$$P_{\text{нп}}(t_{\phi}) = P_{\text{нп}}(t_1) + \frac{(t_{\phi} - t_1)(P_{\text{нп}}(t_2) - P_{\text{нп}}(t_1))}{t_2 - t_1}. \quad (3.29)$$

У разі визначення ступеня пожежної небезпеки *суміші рідин* слід мати на увазі, що взаємна розчинність двох рідин змінюється в широких межах: від практично повної

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів
нерозчинності до змішаності у будь-яких співвідношеннях з утворенням однорідного розчину [12]. Таким чином, суміші двох рідин можна розділити на три основні групи: суміші взаємно розчинних рідин; суміші рідин, що змішуються частково; суміші рідин, практично не розчинних одна в одній. Органічні рідини, близькі за своєю хімічною будовою й властивостями, зазвичай змішуються у всіх співвідношеннях, утворюючи однорідні розчини, наприклад, суміші бензолу й толуолу, етилового й бутилового спиртів і т.п. Прикладом суміші рідин, частково розчинних одна в одній, є суміші ацетону й води, ефіру й води, ізобутилового спирту й води та багато інших. До третьої групи сумішей відносяться суміші бензину й води, толуолу й води та інші.

Пожежну небезпеку становить пара, яка утворюється над поверхнею суміші рідини, за умови, що фактична концентрація пари перевищує нижню концентраційну межу поширення полум'я пароповітряної суміші. Фактичну концентрацію пари суміші рідин можна визначити за величиною тиску насиченої пари.

Тиск насиченої пари частково розчинних і нерозчинних одна в одній рідин визначають як суму тиску компонентів суміші:

$$P_{\text{сум}} = \sum_i P_{\text{нас}i}, \quad (3.30)$$

де $P_{\text{нас}i}$ – 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 мольного вмісту за

формулою:

$$P_{\text{сум}} = \sum_i P_{\text{ши}_i} r_{\mu_i}, \quad (3.31)$$

де r_{μ_i} – мольна частка i -го компонента суміші, яку розраховують за формулою:

$$r_{\mu_i} = \frac{\frac{c_i}{\mu_i}}{\sum_{i=1}^k \frac{c_i}{\mu_i}}, \quad (3.32)$$

або

$$r_{\mu_i} = \frac{\frac{\varphi_i \rho_i}{\mu_i}}{\sum_{i=1}^k \frac{\varphi_i \rho_i}{\mu_i}}, \quad (3.33)$$

де c_i – масова концентрація i -го компонента у складі суміші, мас. %;

φ_i – об'ємна концентрація i -го компонента у складі суміші, %;

ρ_i – густина i -го компонента у складі суміші рідин, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

μ_i – молярна маса i -го компонента суміші, $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$;

k – число компонентів суміші.

Фактична концентрація пари суміші визначається подібно до формули (3.26), але замість тиску насиченої пари індивідуальної рідини необхідно враховувати тиск насиченої пари суміші рідин за даної температури.

$$\Phi_{\text{нп, сум}} = 100 \frac{P_{\text{нп, сум}}}{P_{\text{заг}}}, \% \quad (3.34)$$

Ступінь пожежовибухонебезпеки суміші рідин за будь-якого атмосферного тиску або температури рідини визначають шляхом порівняння фактичної концентрації пароповітряної суміші з концентраційними межами поширення полум'я, які визначають за відсотковим складом цієї суміші та значеннями нижньої та верхньої КМПП складових суміші за формулами (3.10) або (3.11).

Методика визначення ступеня пожежної небезпеки індивідуальної рідини за тиском насиченої пари

1. Визначити концентраційні межі поширення полум'я горючої речовини за довідником [7] або розрахувати за формулами (3.8), (3.9).

2. Розрахувати тиск насиченої пари рідини за даної температури за формулою (3.28) чи (3.29). Залежно від обраного методу розрахунку спочатку для даної горючої речовини визначити:

2.1. константи Антуана за довідником [7] або [9] чи за таблицею 8 додатків (якщо розрахунок проводити за формулою (3.28));

2.2. два значення температури t_1 і t_2 , що будуть найближчими до заданої температури $t_{\text{ф}}$, та відповідні до цих температур значення тиску насиченої пари $P_{\text{нп}(t_1)}$, $P_{\text{нп}(t_2)}$ за довідником [9] або за таблицею 9 додатків (якщо розрахунок проводити за формулою (3.29)).

3. Розрахувати фактичну концентрацію насиченої

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

пари рідини за формулою (3.26).

4. Порівняти фактичну концентрацію насиченої пари рідини з КМПП та встановити ступінь пожежної небезпеки насиченої пари горючої рідини за даних умов з використанням концентраційної шкали (див. рис. 3.1).

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати тиск та фактичну концентрацію насиченої пари етилацетату $C_4H_8O_2$ за температури $20^\circ C$ та атмосферного тиску 105 кПа. Визначити ступінь пожежної небезпеки насиченої пари етилацетату за даних умов.

Розв'язання

1. Визначаємо концентраційні межі поширення полум'я етилацетату за довідником [7]: $\varphi_H = 2\%$; $\varphi_B = 11,4\%$.

2. Розраховуємо тиск насиченої пари етилацетату за даної температури за формулою (3.28).

За таблицею 8 додатків визначаємо константи Антуана етилацетату: $A = 6,2267$; $B = 1244,95$; $C_a = 217,88$.

$$\lg P_{\text{нас}} = 6,2267 - \frac{1244,95}{(217,88 + 20)} = 0,993;$$

$$P_{\text{нас}} = 10^{0,993} = 9,84 \text{ кПа.}$$

3. Розраховуємо фактичну концентрацію насиченої пари етилацетату за формулою (3.26):

$$\varphi_{\text{ф}} = 100 \frac{9,84}{105} = 9,37 \%$$

4. Визначаємо ступінь пожежної небезпеки

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів насиченої пари етилацетату за даних умов.

Висновок: оскільки фактична концентрація насиченої пари етилацетату за даних умов є у межах від нижньої до верхньої КМПП ($\varphi_{\text{н}} = 2 \% < \varphi_{\text{ф}} = 9,37 \% < \varphi_{\text{в}} = 11,4 \%$), вона є вибухонебезпечною.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати тиск та концентрацію насиченої пари етилформиату $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$ за температури 5°C та загального тиску $101,3$ кПа. Визначити ступінь пожежовибухонебезпеки насиченої пари за даних умов.

Розв'язання

1. Визначаємо нижню та верхню КМПП етилформиату за довідником [7]: $\varphi_{\text{н}} = 2,85 \%$; $\varphi_{\text{в}} = 16,71 \%$.

2. Розраховуємо тиск насиченої пари за даної температури за формулою (3.29).

За таблицею 9 додатків визначаємо дві температури t_1 і t_2 , значення яких є найближчими до заданої температури $t_{\text{ф}} = 5^\circ\text{C}$, та відповідні їм тиски насиченої пари:

$$t_{\text{ф}} = 5^\circ\text{C} \cdot \begin{cases} t_1 = -11,5^\circ\text{C} \rightarrow P_{\text{нн}}(t_1) = 5,33 \text{ кПа} \\ t_2 = 5,4^\circ\text{C} \rightarrow P_{\text{нн}}(t_2) = 13,33 \text{ кПа} \end{cases} \cdot P_{\text{нн}}(t_{\text{ф}}) = ?$$

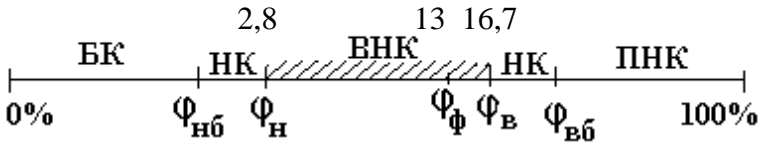
$$P_{\text{нн}} = 5,333 + \frac{(13,33 - 5,333)(5 - (-11,5))}{(5,4 - (-11,5))} = 13,14 \text{ кПа.}$$

3. Розраховуємо фактичну концентрацію насиченої пари за даних умов за формулою (3.26):

$$\varphi_{\text{ф}} = 100 \frac{13,14}{101,3} = 13,0 \%$$

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

4. Визначаємо ступінь пожежної небезпеки насиченої пари етилформіату за даних умов. Для цього будемо концентраційну шкалу та відкладаємо на ній отримані значення.



Висновок: фактична концентрація насиченої пари етилформіату за даних умов є у межах від нижньої до верхньої КМПП ($\varphi_H = 2,85 \% < \varphi_\phi = 13,0 \% < \varphi_B = 16,71 \%$), отже, вона є вибухонебезпечною.

Методика визначення ступеня пожежної небезпеки суміші рідин за тиском насиченої пари

1. Розрахувати тиск насиченої пари кожного компонента суміші горючих рідин за формулою (3.28) або (3.29).

2. Визначити молярну масу кожного компонента суміші μ_i .

3. Для взаєморозчинних рідин розрахувати мольні частки компонентів r_{μ_i} за формулою (3.32 або 3.33).

4. Розрахувати тиск насиченої пари суміші рідин за формулою (3.30) або (3.31) залежно від типу розчину рідин.

5. Розрахувати фактичну концентрацію пари суміші рідин за формулою (3.34).

6. Визначити процентний вміст кожного компонента суміші у газовій фазі за формулою:

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

для взаєморозчинних рідин:
$$\varphi_i = 100 \frac{P_{\text{нп}i} r_{\mu_i}}{P_{\text{сум}}}, \%, \quad (3.35)$$

для взаємонерозчинних рідин:
$$\varphi_i = 100 \frac{P_{\text{нп}i}}{P_{\text{сум}}}, \%. \quad (3.36)$$

7. Визначити концентраційні межі поширення полум'я кожного компонента суміші за довідником [7] або розрахувати за формулами (3.8), (3.9).

8. Визначити концентраційні межі поширення полум'я пароповітряної суміші, що утворюється над поверхнею рідини, за формулами (3.10) або (3.11).

9. Порівняти фактичну концентрацію пароповітряної суміші із концентраційними межами поширення полум'я даної суміші, зробити висновок щодо ступеня її пожежної небезпеки.

Приклад розв'язання задачі

Визначити, чи буде утворюватись вибухонебезпечна концентрація парів розчинника № 648 за температури 20°C і атмосферного тиску 101 кПа.

Розв'язання

Розчинник № 648 – суміш горючих рідин, склад якої, згідно довідника [7], представлено у таблиці:

№	Компонент суміші	Формула	Вміст, мас. %
1	бутилацетат	$C_6H_{12}O_2$	50
2	етиловий спирт	C_2H_6O	10
3	бутиловий спирт	$C_4H_{10}O$	20
4	толуол	C_7H_8	20

1. Розраховуємо тиск насиченої пари кожного компонента суміші за температури 20 °C за рівнянням

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

(3.28), для чого спочатку для кожної горючої рідини визначаємо константи Антуана за довідником [7]:

бутилацетат: $A = 6,252$, $B = 1430,418$, $C_a = 210,745$;

$$\lg P_{\text{нн1}} = 6,252 - \frac{1430,418}{210,745 + 20} = 0,053;$$

$$P_{\text{нн1}} = 10^{0,053} = 1,13 \text{ кПа};$$

етиловий спирт: $A = 7,812$, $B = 1918,508$, $C_a = 252,125$;

$$\lg P_{\text{нн2}} = 7,812 - \frac{1918,508}{252,125 + 20} = 0,76;$$

$$P_{\text{нн2}} = 10^{0,76} = 5,75 \text{ кПа};$$

бутиловий спирт: $A = 8,922$, $B = 2664,684$, $C_a = 279,64$;

$$\lg P_{\text{нн3}} = 8,922 - \frac{2664,684}{279,64 + 20} = 0,029;$$

$$P_{\text{нн3}} = 10^{0,029} = 1,06 \text{ кПа};$$

толуол: $A = 6,051$, $B = 1328,171$, $C_a = 217,713$;

$$\lg P_{\text{нн4}} = 6,051 - \frac{1328,171}{217,713 + 20} = 0,46;$$

$$P_{\text{нн4}} = 10^{0,46} = 2,88 \text{ кПа}.$$

2. Визначаємо за довідником [7] молярні маси компонентів суміші μ_i :

бутилацетат $C_6H_{12}O_2$: $\mu_1 = 116 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

1;

етиловий спирт C_2H_6O : $\mu_2 = 46 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$;
бутиловий спирт $C_4H_{10}O$: $\mu_3 = 74 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$;
толуол C_7H_8 : $\mu_4 = 92 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$.

3. Розраховуємо мольні частки компонентів r_{μ_i} за формулою (3.32):

$$r_{\mu_1} = \frac{\frac{50}{116}}{\frac{50}{116} + \frac{10}{46} + \frac{20}{74} + \frac{20}{92}} = 0,38;$$

$$r_{\mu_2} = \frac{\frac{10}{46}}{\frac{50}{116} + \frac{10}{46} + \frac{20}{74} + \frac{20}{92}} = 0,19;$$

$$r_{\mu_3} = \frac{\frac{20}{74}}{\frac{50}{116} + \frac{10}{46} + \frac{20}{74} + \frac{20}{92}} = 0,24;$$

$$r_{\mu_4} = \frac{\frac{20}{92}}{\frac{50}{116} + \frac{10}{46} + \frac{20}{74} + \frac{20}{92}} = 0,19.$$

4. Розраховуємо тиск насиченої пари розчинника № 648 за формулою (3.31), враховуючи, що всі компоненти суміші є взаєморозчинними рідинами:

$$P_{\text{нп сум}} = 1,13 \cdot 0,38 + 5,75 \cdot 0,19 + 1,06 \cdot 0,24 + 2,88 \cdot 0,19 = 2,32 \text{ кПа.}$$

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

5. Розраховуємо фактичну концентрацію пари розчинника № 648 за формулою (3.34):

$$\varphi_{\text{ф}} = 100 \frac{2,32}{101} = 2,30 \%$$

6. Розраховуємо процентний вміст кожного компонента в газовій фазі за формулою (3.35):

$$\varphi_1 = 100 \frac{1,13 \cdot 0,38}{2,32} = 18,5 \%$$

$$\varphi_2 = 100 \frac{5,75 \cdot 0,19}{2,32} = 47,1 \%$$

$$\varphi_3 = 100 \frac{1,06 \cdot 0,24}{2,32} = 11,0 \%$$

$$\varphi_4 = 100 \frac{2,88 \cdot 0,19}{2,32} = 23,6 \%$$

7. Визначасмо за довідником [7] концентраційні межі поширення полум'я кожного компонента розчинника № 648:

бутилацетат $C_6H_{12}O_2$: $\varphi_{H_1} = 1,35 \%$, $\varphi_{B_1} = 9,0 \%$;

етилловий спирт C_2H_6O : $\varphi_{H_2} = 3,6 \%$, $\varphi_{B_2} = 17,7 \%$;

бутиловий спирт $C_4H_{10}O$: $\varphi_{H_3} = 1,8 \%$, $\varphi_{B_3} = 10,9 \%$;

толуол C_7H_8 : $\varphi_{H_4} = 1,3 \%$, $\varphi_{B_4} = 6,8 \%$.

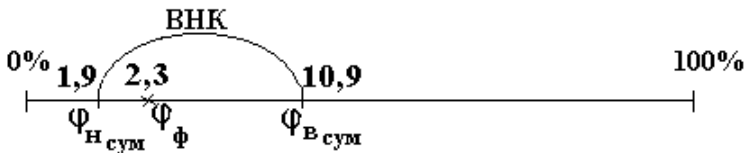
8. Розраховуємо концентраційні межі поширення полум'я пароповітряної суміші, що утворилася над поверхнею розчинника № 648, за формулою:

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

$$\varphi_{H_{\text{сум}}} = \frac{18,5 + 47,1 + 11,0 + 23,6}{\frac{18,5}{1,35} + \frac{47,1}{3,6} + \frac{11,0}{1,8} + \frac{23,6}{1,3}} = 1,9\%;$$

$$\varphi_{V_{\text{сум}}} = \frac{18,5 + 47,0 + 10,9 + 23,6}{\frac{18,5}{9,0} + \frac{47,0}{17,7} + \frac{10,9}{10,9} + \frac{23,6}{6,8}} = 10,9\%.$$

9. Для визначення ступеня пожежної небезпеки фактичної концентрації суміші парів, що утворюється над поверхнею розчинника № 648 за температури 20 °С і атмосферного тиску 101 кПа, будуюмо шкалу концентрацій даної пароповітряної суміші і порівнюємо фактичну концентрацію з концентраційними межами поширення полум'я даної суміші.



Висновок: фактична концентрація парів суміші $\varphi_{\text{ф}} = 2,3\%$ є вибухонебезпечною, оскільки знаходиться в межах від нижньої до верхньої концентраційної межі поширення полум'я.

§ 2. Розрахунок температурних меж поширення полум'я

За певних температур рідини концентрація її насиченої пари стає рівною нижній або верхній концентраційній межі поширення полум'я. Такі температури називають *температурними межами поширення полум'я*. Як і для концентраційних меж, розрізняють нижню і верхню температурну межу поширення полум'я рідини, які можна визначити за допомогою розрахункових методів.

§ 2.1. Розрахунок температурних меж поширення полум'я індивідуальної горючої рідини

Для розрахункового визначення температурних меж поширення полум'я (ТМПП) можна використовувати залежність тиску насиченої пари від температури рідини, яка виражається *рівнянням Антуана* (3.28), та взаємозв'язок тиску насиченої пари з її концентрацією (3.25):

$$\lg P_{\text{нп}} = A - \frac{B}{t_{\text{рід}} + C_a}; \quad t_{\text{рід}} = \frac{B}{A - \lg P_{\text{нп}}} - C_a, \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$P_{\text{нп}} = P_{\text{заг}} \frac{\varphi_{\text{нп}}}{100}, \text{ кПа};$$

$$\text{звідси } t_{\text{рід}} = \frac{B}{A - \lg(0,01P_{\text{заг}} \varphi_{\text{нп}})} - C_a, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3.37)$$

Якщо в рівняння (3.37) підставити концентрацію насиченої пари, відповідну нижній або верхній концентраційній межі поширення полум'я, можна отримати значення температури рідини, що відповідає

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів
нижній або верхній температурній межі поширення полум'я:

$$t_{н(в)} = \frac{B}{A - \lg(0,01P_{заг} \varphi_{н(в)})} - C_a, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3.38)$$

де $t_{н(в)}$ – нижня або верхня температурна межа поширення полум'я, $^\circ\text{C}$;

A , B , C_a – константи рівняння Антуана, що визначають за довідником [7] або за таблицею 8 додатків;

$P_{заг}$ – загальний атмосферний тиск, кПа;

$\varphi_{н(в)}$ – нижня або верхня концентраційна межа поширення полум'я, %.

Похибка розрахунку за формулою (3.38) визначається похибкою розрахунку концентраційної межі поширення полум'я.

Якщо для даної рідини відома залежність тиску насиченої пари від температури, температурні межі поширення полум'я можна визначити методом *лінійної інтерполяції* за формулою:

$$t_{н(в)} = t_1 + \frac{(t_2 - t_1)(P_{нпн(в)} - P_{нп(t_1)})}{P_{нп(t_2)} - P_{нп(t_1)}}, \quad (3.39)$$

де $P_{нпн(в)}$ – тиск насиченої пари горючої рідини, що відповідає нижній або верхній КМПП, кПа; розраховується за формулою (3.25), в яку підставляється концентрація насиченої пари, що дорівнює відповідно нижній або верхній КМПП;

$P_{нп(t_1)}$, $P_{нп(t_2)}$ – значення тиску насиченої пари, що є найближчими до $P_{нпн}$ або $P_{нпв}$, кПа;

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

t_1, t_2 – значення температур рідини, що відповідають тиску насиченої пари $P_{\text{нп}}(t_1), P_{\text{нп}}(t_2), ^\circ\text{C}$.

Значення $P_{\text{нп}}(t_1), P_{\text{нп}}(t_2), t_1, t_2$ визначають за довідником [9] або за табл. 9 додатків.

Більш точно температурні межі поширення полум'я можна визначити з урахуванням того факту, що лінійною є функція $\lg P_{\text{нп}} = A - \frac{B}{T_{\text{рід}}}$. Тоді методом лінійної інтерполяції:

$$T_{\text{н(в)}} = \frac{1}{\frac{1}{T_2} + \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \frac{\lg P_{\text{нпн(в)}} - \lg P_{\text{нп}(T_2)}}{\lg P_{\text{нп}(T_2)} - \lg P_{\text{нп}(T_1)}}}, \text{К.} \quad (3.40)$$

У тих випадках, коли залежність тиску насиченої пари від температури не відома, для речовин, що складаються з С, Н, О, N, значення нижньої і верхньої температурної межі поширення полум'я можна визначити з урахуванням *структури горючої речовини* за формулою:

$$t_{\text{н(в)}} = a_0 + a_1 t_{\text{кип}} + \sum_j a_j I_j, ^\circ\text{C}, \quad (3.41)$$

де a_0 – розмірний коефіцієнт, який дорівнює:

для нижньої ТМПП: $a_0 = -62,46 ^\circ\text{C}$;

для верхньої ТМПП: $a_0 = -41,43 ^\circ\text{C}$;

a_1 – безрозмірний коефіцієнт, який дорівнює:

для нижньої ТМПП: $a_1 = 0,655$;

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

для верхньої ТМПП: $a_1 = 0,723$;

$t_{\text{кип}}$ – температура кипіння горючої рідини, °С;

ℓ_j – число структурних груп j -го типу;

a_j – емпіричний коефіцієнт, що характеризує внесок j -ої структурної групи, наведений у таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Коефіцієнти для визначення ТМПП за структурою речовини

Вид зв'язку	$a_j, ^\circ\text{C}$		Вид зв'язку	$a_j, ^\circ\text{C}$	
	$t_{\text{н}}$	$t_{\text{в}}$		$t_{\text{н}}$	$t_{\text{в}}$
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			

Середнє квадратичне відхилення розрахунку за формулою (3.41) становить 9 °С.

Для деяких класів речовин встановлений безпосередній зв'язок температурних меж поширення полум'я з температурою кипіння. Для таких речовин ТМПП легко можна розрахувати з використанням констант гомологічного ряду за емпіричною формулою:

$$t_{\text{н(в)}} = kt_{\text{кип}} - \ell, ^\circ\text{C}, \quad (3.42)$$

де k і ℓ – емпіричні коефіцієнти гомологічних рядів горючих рідин; визначають за таблицею 3.12.

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

Таблиця 3.12 – Константи k і ℓ гомологічних рядів для визначення 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-фенілалкани	$\text{C}_6\text{H}_5(\text{CH}_2)_n\text{CH}_3$	0,6751	70,2	-	-
нормальні насичені 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 мурашиної кислоти (форміати)	$\text{HCOO}(\text{CH}_2)_n\text{CH}_3$	0,5359	47,6	0,6050	25,0
складні ефіри оцтової кислоти (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	-	-

Середнє квадратичне відхилення розрахунку за формулою (3.42) не перевищує 10°C .

Як вже було сказано вище, ТМПП можуть змінюватися за умови зміни зовнішніх умов, тому для гарантованого забезпечення пожежної безпеки експлуатації горючих рідин визначають безпечні температурні межі.

Безпечні температурні межі поширення полум'я можна розрахувати за формулами:

$$t_{\text{нб}} = 0,9(t_{\text{н}} - K_6), \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (3.43)$$

$$t_{\text{вб}} = 1,1(t_{\text{в}} + K_6), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3.44)$$

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

де $t_{нб}$, $t_{вб}$ – відповідно нижня безпечна та верхня безпечна температурні межі поширення полум'я, °С;

t_n , t_v – відповідно нижня та верхня температурні межі поширення полум'я, °С.

$K_б$ – коефіцієнт безпеки, який для індивідуальних речовин і нафтопродуктів становить 10,5 °С, для сумішей горючих рідин – 14 °С.

Застосування температурних меж поширення полум'я значно спрощує визначення ступеня пожежної небезпеки горючих рідин. Для цього необхідно порівняти фактичну температуру рідини з ТМПП та зробити висновок щодо ступеня пожежної небезпеки насиченої пари горючої речовини, що утворилася за даної температури, відповідно до схеми, представленої на рис. 3.2.

Методика визначення ступеня пожежної небезпеки горючих рідин з використанням температурних меж поширення полум'я

1. Розрахувати нижню та верхню ТМПП рідини за стандартних умов за одним із наведених способів за формулами (3.38)-(3.42). Якщо параметри навколишнього середовища відрізняються від стандартних, необхідно використовувати формулу (3.38), яка враховує зміни КМПП та загального тиску пароповітряної суміші.

1.1. Розрахунок ТМПП за константами Антуана:

- визначити нижню та верхню концентраційні межі поширення полум'я горючої речовини за довідником [7] або розрахунком за формулами (3.8) або (3.9);

- визначити константи Антуана за довідником [7] або за таблицею 8 додатків;

- розрахувати ТМПП за формулою (3.38).

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

1.2. Розрахунок ТМПП методом лінійної інтерполяції:

- визначити нижню та верхню концентраційні межі поширення полум'я горючої речовини за довідником [7] або розрахунком за формулами (3.8) або (3.9);

- визначити значення тиску насиченої пари, що відповідають нижній та верхній концентраційній межі поширення полум'я за формулою (3.25);

- для значень тиску насиченої пари, що відповідають нижній та верхній КМПП даної горючої рідини, за таблицею 9 додатків знайти найближче менше та найближче більше значення тиску та відповідні їм температури;

- розрахувати ТМПП за формулою (3.39).

1.3. Розрахунок ТМПП за хімічною структурою горючої речовини:

- визначити температуру кипіння рідини за довідником [7] або за таблицею 9 додатків (температура кипіння рідини відповідає тиску її насиченої пари, рівному зовнішньому тиску);

- записати структурну формулу горючої рідини та визначити число структурних груп даного типу ℓ_j та відповідний даній структурній групі коефіцієнт a_j за таблицею 3.11;

- розрахувати ТМПП за формулою (3.41).

1.4. Розрахунок ТМПП за константами гомологічного ряду:

- визначити температуру кипіння рідини за довідником [7] або за таблицею 9 додатків;

- встановити гомологічний ряд, до якого відноситься дана горюча речовина; відповідно до

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів встановленого гомологічного ряду визначити константи k і ℓ для нижньої та верхньої ТМПП за таблицею 3.12;

- розрахувати ТМПП за формулою (3.42).

2. Розрахувати безпечні ТМПП горючої рідини за формулами (3.43) та (3.44).

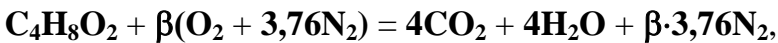
3. Порівняти фактичну температуру рідини з ТМПП та зробити висновок щодо ступеня пожежної небезпеки насиченої пари горючої речовини, що утворилася за даної температури.

Приклад розв'язання задачі

Визначити температурні межі поширення полум'я етилацетату $C_4H_8O_2$, якщо загальний тиск пароповітряної суміші дорівнює 95 кПа.

Розв'язання

1. Розраховуємо нижню та верхню концентраційні межі поширення полум'я етилацетату за формулою (3.8).



$$\beta = 5;$$

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

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

2. Визначаємо константи Антуана етилацетату за таблицею 8 додатків: $A = 6,2267$; $B = 1244,95$; $C_a = 217,88$.

3. Визначаємо температурні межі поширення полум'я етилацетату з урахуванням загального тиску

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

пароповітряної суміші за формулою (3.38):

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

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

Висновок: температурні межі поширення полум'я етилацетату $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ за атмосферного тиску 95 кПа дорівнюють $t_{\text{н}} = -8 \text{ } ^\circ\text{C}$, $t_{\text{в}} = 22,9 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Приклад розв'язання задачі

Визначити, за яких температур всередині технологічного обладнання насичена пара бутанової кислоти $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ утворює вибухонебезпечні концентрації. Загальний тиск пароповітряної суміші дорівнює 101,3 кПа.

Розв'язання

1. Визначаємо нижню та верхню концентраційні межі поширення полум'я бутанової кислоти за довідником [7]: $\varphi_{\text{н}} = 2,0 \text{ } \%$, $\varphi_{\text{в}} = 10,3 \text{ } \%$.

2. Розраховуємо тиск насиченої пари на нижній та верхній концентраційній межі поширення полум'я за формулою (3.25):

$$P_{\text{нп(н)}} = \varphi_{\text{н}}^0 \frac{P_{\text{заг}}}{100} = 2,0 \frac{101,3}{100} = 2,02 \text{ кПа};$$

$$P_{\text{нп(в)}} = \varphi_{\text{в}}^0 \frac{P_{\text{заг}}}{100} = 10,3 \frac{101,3}{100} = 10,4 \text{ кПа}.$$

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

3. За таблицю 9 додатків визначаємо значення тиску насиченої пари бутанової кислоти, найближчі до розрахованих, P_1 (менше від розрахованого значення) та P_2 (більше від розрахованого значення), а також відповідні їм температури t_1 і t_2 як для нижньої, так і для верхньої ТМПП:

$$P_{\text{нп(н)}} = 2,02 \text{ кПа} \rightarrow$$

$$\rightarrow \begin{array}{l} \cdot \cdot P_{\text{нп}(t_1)} = 1,33 \text{ кПа} \rightarrow t_1 = 61,5 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \cdot \\ \cdot \cdot P_{\text{нп}(t_2)} = 5,33 \text{ кПа} \rightarrow t_2 = 88,0 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \cdot \end{array} \rightarrow t_{\text{н}} = ?$$

$$P_{\text{нп(в)}} = 10,4 \text{ кПа} \rightarrow$$

$$\rightarrow \begin{array}{l} \cdot \cdot P_{\text{нп}(t_1)} = 5,33 \text{ кПа} \rightarrow t_1 = 88,0 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \cdot \\ \cdot \cdot P_{\text{нп}(t_2)} = 13,33 \text{ кПа} \rightarrow t_2 = 108,0 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \cdot \end{array} \rightarrow t_{\text{в}} = ?$$

4. Визначаємо температурні межі поширення полум'я за формулою (3.39):

$$t_{\text{н}} = 61,5 + \frac{(88,0 - 61,5)(2,02 - 1,333)}{(5,333 - 1,333)} = 71,7 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{в}} = 88,0 + \frac{(108,0 - 88,0)(10,4 - 5,333)}{(13,33 - 5,333)} = 105,2 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Висновок: насичена пара бутанової кислоти $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ утворює вибухонебезпечну концентрацію всередині технологічного обладнання в діапазоні температур від $71,7 \text{ }^\circ\text{C}$ до $105,2 \text{ }^\circ\text{C}$.

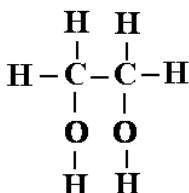
Приклад розв'язання задачі

Визначити безпечний температурний режим експлуатації закритого технологічного устаткування, в якому обертається етиленгліколь $C_2H_6O_2$. Встановити ступінь пожежної небезпеки насиченої пари етиленгліколю за стандартних умов.

Розв'язання

1. Визначаємо за довідником [7] температуру кипіння етиленгліколю: $t_{\text{кип}} = 197,8 \text{ }^\circ\text{C}$.

2. Записуємо структурну формулу етиленгліколю:



Визначаємо число структурних груп j -го типу і відповідні коефіцієнти a_j кожної структурної групи за таблицею 3.11. Для спрощення розрахунків складаємо таблицю:

Вид структурної групи	Число груп, ℓ_i	a_j	
		НТМПП	ВТМПП
C-C	1	-0,909	0,570
C-H	4	-0,009	-1,158
C-O	2	0,110	1,267
O-H	2	19,80	17,80

3. Розраховуємо температурні межі поширення полум'я етиленгліколю за формулою (3.41):

$$\begin{aligned}
 t_{\text{н}} = & -62,46 + 0,655 \cdot 197,8 + \\
 & + (-0,909) \cdot 1 + (-0,009) \cdot 4 + 0,11 \cdot 2 + 19,8 \cdot 2 = 105,9 \text{ }^\circ\text{C};
 \end{aligned}$$

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

$$t_{\text{в}} = -41,43 + 0,723 \cdot 197,8 + \\ + 0,57 \cdot 1 + (-1,158) \cdot 4 + 1,267 \cdot 2 + 17,8 \cdot 2 = 135,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

4. Розраховуємо безпечні температурні межі поширення полум'я за формулами (3.43), (3.44), враховуючи, що коефіцієнт безпеки K_6 для індивідуальної речовини становить $10,5 \text{ } ^\circ\text{C}$:

$$t_{\text{нб}} = 0,9(105,9 - 10,5) = 85,9 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{вб}} = 1,1(135,6 + 10,5) = 160,7 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Висновок: температурні межі поширення полум'я етиленгліколю $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$ становлять $t_{\text{н}} = 105,9 \text{ } ^\circ\text{C}$, $t_{\text{в}} = 135,6 \text{ } ^\circ\text{C}$. Безпечні концентрації насиченої пари етиленгліколю утворюються за температур експлуатації менше, ніж $t_{\text{нб}} = 85,9 \text{ } ^\circ\text{C}$. За стандартних умов насичена пара етиленгліколю є безпечною, через те що фактична температура $25 \text{ } ^\circ\text{C} < t_{\text{нб}} = 85,9 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Приклад розв'язання задачі

Визначити безпечні температури технологічного процесу, в якому обертається етилформіат $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$, якщо загальний атмосферний тиск дорівнює $101,3 \text{ кПа}$.

Розв'язання

1. Визначаємо за довідником [7] температуру кипіння етилформіату: $t_{\text{кип}} = 54,3 \text{ } ^\circ\text{C}$.

2. Визначаємо гомологічний ряд, до якого відноситься етилформіат, та значення констант k і ℓ для нижньої та верхньої ТМПП за табл. 3.12.

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

Етилформіат відноситься до складних ефірів мурашиної кислоти, отже $k_n = 0,5359$, $l_n = 47,6$; $k_b = 0,6050$, $l_b = 25,0$.

3. Визначаємо температурні межі поширення полум'я за формулою (3.42):

$$t_n = 0,5359 \cdot 54,3 - 47,6 = -18,5 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_b = 0,605 \cdot 54,3 - 25,0 = 7,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

4. Визначаємо безпечні температурні межі поширення полум'я за формулами (3.43), (3.44), враховуючи, що коефіцієнт безпеки для індивідуальної речовини становить $10,5 \text{ } ^\circ\text{C}$:

$$t_{nb} = 0,9(-18,5 - 10,5) = -26,1 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_{vb} = 1,1(7,8 + 10,5) = 20,1 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Для визначення безпечних робочих температур технологічного процесу, в якому обертається етилформіат, будемо шкалу температур, аналогічно до рис. 3.2.



Висновок: температурні межі поширення полум'я етилформіату дорівнюють: $t_n = -18,5 \text{ } ^\circ\text{C}$, $t_b = 7,8 \text{ } ^\circ\text{C}$; безпечні робочі температури технологічного процесу, в якому обертається етилформіат $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$ за даних умов, менше, ніж $t_{nb} = -26,1 \text{ } ^\circ\text{C}$, та більше, ніж $t_{vb} = 20,1 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

Приклад розв'язання задачі

Визначити ступінь небезпеки насиченої пари пропанолу C_3H_8O , що обертається у закритому технологічному процесі за температури $15\text{ }^\circ\text{C}$ і тиску $101,3\text{ кПа}$.

Розв'язання

1. Визначаємо нижню та верхню ТМПП пропанолу за довідником [7]: $t_n = 21,0\text{ }^\circ\text{C}$, $t_b = 55,0\text{ }^\circ\text{C}$.

2. Визначаємо безпечні ТМПП горючої рідини за формулами (3.43), (3.44), з урахуванням, що коефіцієнт безпеки для індивідуальної рідини дорівнює $10,5\text{ }^\circ\text{C}$:

$$t_{нб} = 0,9(21,0 - 10,5) = 9,5\text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_{вб} = 1,1(55,0 + 10,5) = 72,0\text{ }^\circ\text{C}.$$

3. Для визначення ступеня небезпеки пропанолу за температури $15\text{ }^\circ\text{C}$ будемо температурну шкалу відповідно до рис. 3.2:



Висновок: температура пропанолу C_3H_8O $15\text{ }^\circ\text{C}$ потрапляє в область небезпечних температур (менших за $t_n = 21,0\text{ }^\circ\text{C}$, але більших за $t_{нб} = 9,5\text{ }^\circ\text{C}$), отже концентрація насиченої пари пропанолу за даних умов є небезпечною, і за зміни зовнішніх умов (наприклад, збільшення потужності теплового імпульсу) можливе виникнення вибуху.

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

Приклад розв'язання задачі

Визначити, за якої температури бензолу концентрація його насиченої пари буде дорівнювати 2 %, якщо загальний тиск пароповітряної суміші становить 103 кПа.

Розв'язання

1. Зв'язок між температурою рідини та концентрацією її насиченої пари дає рівняння (3.37). Для його вирішення визначаємо константи Антуана бензолу за табл. 8 додатків: $A = 5,6139$; $B = 902,275$; $C_a = 178,10$.

2. Розраховуємо температуру бензолу, за якої концентрація його насиченої пари буде дорівнювати 2 %, з урахуванням, що загальний тиск пароповітряної суміші становить 103 кПа:

$$t_{\text{рід}} = \frac{902,275}{5,6139 - \lg(0,01 \cdot 103 \cdot 2)} - 178,1 = -7,9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Висновок: за температури мінус 7,9 °С та тиску 103 кПа концентрація насиченої пари бензолу дорівнює 2 %.

§ 2.2. Розрахунок температурних меж поширення полум'я суміші рідин

Для розрахунку температурних меж поширення полум'я *суміші горючих рідин* необхідно знати тиск насиченої пари, що утворюється над сумішшю рідин, у вигляді функції від температури, наприклад, у вигляді формул (3.37) або (3.39). Для цього необхідно знати *константи Антуана суміші* заданого складу (для деяких сумішей дивись табл. 6 додатків) або значення *тиску насиченої пари суміші* за декількох температур, які перекривають

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів
передбачувані температурні межі поширення полум'я.

Розрахунок температурних меж поширення полум'я суміші взаєморозчинних горючих рідин можна провести за *методом сум*, якщо відома залежність тиску насиченої пари від температури для кожного з компонентів суміші [8]. Розрахунок проводять за формулою (3.45), яка обертається у тотожність за температури $t_{н(в)сум}$:

$$\sum_i r_{\mu_i} 10^{\frac{B_i (t_{н(в)сум} - t_{н(в)i})}{(t_{н(в)сум} + C_{a_i})(t_{н(в)i} + C_{a_i})}} = 1, \quad (3.45)$$

де r_{μ_i} – молярна частка і-го компонента в рідкій фазі;

B_i, C_{a_i} – константи рівняння Антуана для і-го компонента суміші;

$t_{н(в)i}, t_{н(в)сум}$ – нижня або верхня температурна межа поширення полум'я відповідно і-го компонента та суміші горючих рідин.

Середня квадратична похибка розрахунку за формулою (3.45) становить 10 °С для нижньої температурної межі і не перевищує 20 °С для верхньої межі.

Якщо залежність тиску насиченої пари від температури не відома хоча б для одного компонента, то нижню температурну межу поширення полум'я суміші взаєморозчинних горючих рідин можна розрахувати за методом сум з використанням значень теплоти випаровування та температурних меж поширення полум'я компонентів суміші. Із рівнянь (3.25), (3.27) та (3.31) можна отримати формулу (3.46), яка перетворюється у тотожність за температури $t_{нсум}$:

$$\sum_i r\mu_i \cdot \exp\left[\frac{\Delta H_{\text{вип}_i}}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{н}_i}} - \frac{1}{T_{\text{н}_{\text{сум}}}}\right)\right] = 1, \quad (3.46)$$

де $\Delta H_{\text{вип}_i}$ – молярна теплота випаровування i -го горючого компонента;

R – універсальна газова стала;

$T_{\text{н}_i}$, $T_{\text{н}_{\text{сум}}}$ – нижня температурна межа поширення полум'я відповідно i -го компонента та суміші рідин, К.

Якщо теплоти випаровування рідин не відомі, співвідношення $\frac{\Delta H_{\text{вип}_i}}{R}$ для i -го компонента можна розрахувати за інтерполяційною формулою [5]:

$$\frac{\Delta H_{\text{вип}_i}}{R} = -2918,6 + 19,6(t_{\text{кип}_i} + 273),$$

де $t_{\text{кип}_i}$ – температура кипіння i -го компонента, °С.

Для *суміші взаєморозчинних горючих та негорючих рідин* розрахунок нижньої температурної межі поширення полум'я за методом сум проводять за формулою (3.46) з урахуванням того, що для негорючого компонента вводять так звану умовну нижню температурну межу поширення полум'я, яку визначають за формулою:

$$T_{\text{н}_j} = \frac{B_j}{A_j - \lg \frac{P_{\text{заг}}}{\gamma - 1}} - C_{a_j} + 273, \text{ К}, \quad (3.47)$$

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів
де A_j , B_j , C_a – константи Антуана для даного негорючого компонента;

$P_{\text{зар}}$ – загальний тиск пароповітряної суміші, кПа;

γ – параметр, що характеризує флегматизуючий або інгібіруючий вплив негорючого компонента в паровій фазі (див. табл. 3.13).

Таблиця 3.13 – Значення параметра γ , констант Антуана, теплоти випаровування найбільш поширених у техніці негорючих рідин

Речовина	γ	A	B	C_a	$\frac{\Delta H_{\text{вип}}}{\text{кДжмоль}^{-1}}$
вода	1,13	3,901	422,95	100,9	44,0
тетрахлорметан	4,80	7,665	1910,8	0	1,27

*) температура рідини в рівнянні Антуана вимірюють у К.

Середньоквадратична похибка розрахунку за формулою (3.46) становить 10 °С.

Рівняння (3.45) і (3.46) вирішують методом послідовних наближень. Спочатку задаються температурою у першому наближенні T_1 , значення якої приблизно відповідає шуканій температурній межі поширення полум'я суміші рідин, і розраховують суму у лівій частині рівняння. Отримане значення порівнюють з 1 і, залежно від співвідношення, задаються другим значенням температури T_2 , за якої також розраховують суму у лівій частині рівняння. Шукану температурну межу поширення полум'я знаходять за методом лінійної інтерполяції за формулою:

$$T_{\text{н(в)}}_{\text{сум}} = T_1 + \frac{(T_2 - T_1)(1 - \Sigma_1)}{(\Sigma_2 - \Sigma_1)}, \quad (3.48)$$

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

де $T_{н(в)_{\text{сум}}}$ – нижня або верхня температурна межа поширення полум'я суміші рідин;

T_1 – температура суміші рідин у першому наближенні;

T_2 – температура суміші рідин у другому наближенні;

Σ_1 – значення суми у лівій частині рівняння (3.45) або (3.46), розраховане за температури T_1 ;

Σ_2 – значення суми у лівій частині рівняння (3.45) або (3.46), розраховане за температури T_2 .

Орієнтовну оцінку нижньої температурної межі поширення полум'я бінарної суміші взаєморозчинних рідин, які не утворюють азеотропних сумішей, можна провести за *апроксимаційною формулою*:

$$t_{н_{\text{сум}}} = \frac{\varphi_A \cdot t_{нА} + \varphi_B \cdot t_{нВ} - f(t_{нА} - t_{нВ})}{100}, \quad (3.49)$$

де А, В – компоненти горючої суміші (за компонент А обирають рідину з більшим значенням нижньої температурної межі поширення полум'я);

φ_A, φ_B – концентрація компонентів суміші в рідкій фазі, мас. %;

$t_{нА}, t_{нВ}$ – нижня ТМПП компонентів суміші, °С;

f – емпіричний коефіцієнт, що визначається за відсотковим складом суміші за таблицею 3.14; враховує нелінійний характер інтенсивності випаровування компонентів бінарної суміші рідин залежно від її складу.

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

Таблиця 3.14 – Емпіричний коефіцієнт f для визначення нижньої ТМПП суміші взаєморозчинних рідин залежно від складу

φ_A , мас. %	φ_B , мас. %	f	φ_A , мас. %	φ_B , мас. %	f
100	0	0	50	50	26
95	5	12	45	55	23,9
90	10	20	40	60	21,7
85	15	26	35	65	19,4
80	20	29,2	30	70	17
75	25	30,4	25	75	14,5
70	30	30,3	20	80	11,9
65	35	30	15	85	9,2
60	40	29	10	90	6,5
55	45	27,6	5	95	3,3

Приклад розв'язання задачі

Визначити, за яких температур розчинник М утворює вибухонебезпечні концентрації насиченої пари, якщо загальний тиск пароповітряної суміші становить 102 кПа.

Розв'язання

Розчинник М – легкозаймиста рідина, що являє собою суміш взаєморозчинних рідин.

Вибухонебезпечні концентрації насиченої пари горючої рідини утворюються в інтервалі температур між нижньою та верхньою температурною межею поширення полум'я. Визначення температурних меж розчинника М можна провести за формулою (3.38). Для цього необхідно знати константи Антуана розчинника та значення нижньої та верхньої концентраційної межі поширення полум'я.

Із табл. 6 додатків виписуємо значення констант Антуана розчинника М в межах температур $0 \div 50$ °С:

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

$A = 8,057$, $B = 2083,566$, $C_a = 267,735$. Нижня концентраційна межа поширення полум'я 2,8 %.

Для визначення верхньої концентраційної межі поширення полум'я пари, що утворюється над поверхнею суміші взаєморозчинних рідин, скористаємося методикою, викладеною в § 1 глави 2 даного розділу.

1. Розраховуємо нижню температурну межу поширення полум'я розчинника М за формулою (3.38):

$$t_n = \frac{B}{A - \lg(0,01P_{\text{заг}}\varphi_n)} - C_a =$$

$$= \frac{2083,566}{8,057 - \lg(0,01 \cdot 102 \cdot 2,8)} - 267,735 = 6,4^\circ \text{C}.$$

2. Визначаємо верхню концентраційну межу поширення полум'я пари розчинника М за формулою Ле-Шательє (для суміші горючих газів).

Склад розчинника та основні параметри пожежної небезпеки компонентів розчинника згідно довідника [7] представлено в таблиці:

№	Компонент суміші	Молярна маса	Константи Антуана			φ_B , %	Вміст, мас. %
			A	B	C_a		
1	бутилацетат $C_6H_{12}O_2$	116	6,252	1430,418	210,745	9,0	30
2	етиловий спирт C_2H_6O	46	7,812	1918,508	252,125	17,7	60
3	ізобутиловий спирт $C_4H_{10}O$	74	7,830	2058,392	245,642	11,4	5
4	етилацетат $C_4H_8O_2$	88	6,227	1244,951	217,881	11,4	5

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

2.1. Розраховуємо мольні частки компонентів r_{μ_i} за формулою (3.32):

$$r_{\mu_1} = \frac{\frac{30}{116}}{\frac{30}{116} + \frac{60}{46} + \frac{5}{74} + \frac{5}{88}} = 0,15;$$

$$r_{\mu_2} = \frac{\frac{60}{46}}{\frac{30}{116} + \frac{60}{46} + \frac{5}{74} + \frac{5}{88}} = 0,77;$$

$$r_{\mu_3} = \frac{\frac{5}{74}}{\frac{30}{116} + \frac{60}{46} + \frac{5}{74} + \frac{5}{88}} = 0,04;$$

$$r_{\mu_4} = \frac{\frac{5}{88}}{\frac{30}{116} + \frac{60}{46} + \frac{5}{74} + \frac{5}{88}} = 0,04.$$

2.2. Розраховуємо тиск насиченої пари кожного компонента суміші за температури 20 °С за рівнянням (3.28):

$$\text{бутилацетат: } \lg P_{\text{нш1}} = 6,252 - \frac{1430,418}{210,745 + 20} = 0,053;$$

$$P_{\text{нш1}} = 10^{0,053} = 1,13 \text{ кПа};$$

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

етиловий спирт: $\lg P_{\text{нп}2} = 7,812 - \frac{1918,508}{252,125 + 20} = 0,76;$

$$P_{\text{нп}2} = 10^{0,76} = 5,75 \text{ кПа};$$

ізобутиловий спирт: $\lg P_{\text{нп}3} = 7,830 - \frac{2058,392}{245,642 + 20} = 0,081;$

$$P_{\text{нп}3} = 10^{0,081} = 1,21 \text{ кПа};$$

етилацетат: $\lg P_{\text{нп}4} = 6,2267 - \frac{1244,951}{217,881 + 20} = 0,99;$

$$P_{\text{нп}4} = 10^{0,99} = 9,84 \text{ кПа.}$$

2.3. Розраховуємо тиск насиченої пари розчинника М за формулою (3.31), враховуючи, що всі компоненти суміші є взаєморозчинними рідинами:

$$P_{\text{нп сум}} = 1,13 \cdot 0,15 + 5,75 \cdot 0,77 + 1,21 \cdot 0,04 + 9,84 \cdot 0,04 = 5,04 \text{ кПа.}$$

2.4. Розраховуємо процентний вміст кожного компонента в газовій фазі за формулою (3.35):

$$\varphi_1 = 100 \frac{1,13 \cdot 0,15}{5,04} = 3,36 \%;$$

$$\varphi_2 = 100 \frac{5,75 \cdot 0,77}{5,04} = 87,85 \%;$$

$$\varphi_3 = 100 \frac{1,21 \cdot 0,04}{5,04} = 0,96 \%;$$

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

$$\varphi_4 = 100 \frac{9,84 \cdot 0,04}{5,04} = 7,81 \%$$

2.5. Розраховуємо верхню концентраційну межу поширення полум'я пароповітряної суміші, що утворилася над поверхнею розчинника М, за формулою (3.10):

$$\varphi_{\text{в сум}} = \frac{3,36 + 87,85 + 0,96 + 7,81}{\frac{3,36}{9,0} + \frac{87,85}{17,7} + \frac{0,96}{11,4} + \frac{7,81}{11,4}} = 16,3 \%$$

3. Розраховуємо верхню температурну межу поширення полум'я розчинника М за формулою (3.38):

$$\begin{aligned} t_{\text{в}} &= \frac{B}{A - \lg(0,01P_{\text{заг}} \varphi_{\text{в}})} - C_{\text{а}} = \\ &= \frac{2083,566}{8,057 - \lg(0,01 \cdot 102 \cdot 16,3)} - 267,735 = 36,6^{\circ} \text{C}. \end{aligned}$$

Перерахунки тиску насиченої пари кожного компонента суміші та розчинника М за температури 37 °С показали, що склад пароповітряної суміші не змінюється.

Висновок: насичена пара розчинника М утворює вибухонебезпечні концентрації в інтервалі температур від 6,4 °С до 36,6 °С, якщо загальний тиск пароповітряної суміші дорівнює 102 кПа.

Методика розрахунку ТМПП суміші горючих рідин за тиском її насиченої пари

1. Визначити за довідником [7] температурні та концентраційні межі поширення полум'я кожного компонента суміші або розрахувати за попередніми методиками.

2. Визначити орієнтовний інтервал пошуку температурних меж поширення полум'я суміші за діапазоном нижньої ТМПП та верхньої ТМПП компонентів суміші ($t_{н1} \div t_{н2}$, $t_{в1} \div t_{в2}$).

3. Розрахувати тиск насиченої пари кожного компонента суміші за визначених температур за формулою (3.28) або (3.29).

4. Для взаєморозчинних рідин розрахувати мольну частку кожного компонента суміші за формулою (3.32) або (3.33).

5. Розрахувати сумарний тиск насиченої пари суміші рідин за визначених температур залежно від типу розчину рідин за формулою (3.30) або (3.31).

6. Визначити вміст кожного компонента суміші у газовій фазі за визначених температур за формулою (3.35) або (3.36).

7. Розрахувати КМПП пароповітряної суміші за формулами (3.10) або (3.11) для кожної температури відповідно до вмісту компонентів у пароповітряній суміші.

8. Визначити тиск насиченої пари суміші рідин, яка відповідає концентраційним межам поширення полум'я пароповітряної суміші, за формулою (3.25).

9. Розрахувати ТМПП суміші рідин за інтерполяційною формулою (3.39).

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

Приклад розв'язання задачі

Визначити ступінь небезпеки насиченої пари суміші рідин, яка складається з 51 % мас. бензолу C_6H_6 та 49 % мас. хлорбензолу C_6H_5Cl , якщо температура суміші рідин дорівнює $t_f = 5\text{ }^\circ\text{C}$, а загальний тиск пароповітряної суміші $P_{\text{заг}} = 100\text{ кПа}$.

Розв'язання

1. Визначаємо за довідником [7] температурні та концентраційні межі поширення полум'я компонентів суміші:

Компонент суміші	КМПП		ТМПП	
	φ_H	φ_B	t_H	t_B
бензол	1,43 %	8,0 %	-15,0 $^\circ\text{C}$	13,0 $^\circ\text{C}$
хлорбензол	1,4 %	9,8 %	28,0 $^\circ\text{C}$	62,0 $^\circ\text{C}$

2. Визначаємо орієнтовні інтервали пошуку нижньої та верхньої ТМПП суміші за відповідними температурними межами поширення полум'я компонентів:

межі пошуку $t_{H_{\text{сум}}}$: -15 – 28 $^\circ\text{C}$;

межі пошуку $t_{B_{\text{сум}}}$: 13 – 62 $^\circ\text{C}$.

Оскільки бензол є більш леткою рідиною, має менші значення температурних меж, враховуючи значний вміст його в суміші, зменшуємо верхнє значення діапазону пошуку ТМПП (приблизно на 50 %):

межі пошуку $t_{H_{\text{сум}}}$: -15 – 6 $^\circ\text{C}$;

межі пошуку $t_{B_{\text{сум}}}$: 13 – 37 $^\circ\text{C}$.

3. Розраховуємо тиск насиченої пари кожного компонента суміші за визначених температур за формулою Антуана (3.28) (константи Антуана кожного компонента визначаємо за таблицею 8 додатків):

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

Рідина	A	B	C _a
бензол	5,6139	902,275	178,10
хлорбензол	6,3861	1607,316	235,351

$$P_{\text{нп}} \text{C}_6\text{H}_6 (-15^\circ \text{C}) = 10^{\frac{5,6139 - \frac{902,275}{-15+178,10}}{10}} = 1,21 \text{ кПа};$$

$$P_{\text{нп}} \text{C}_6\text{H}_6 (6^\circ \text{C}) = 10^{\frac{5,6139 - \frac{902,275}{6+178,10}}{10}} = 5,13 \text{ кПа};$$

$$P_{\text{нп}} \text{C}_6\text{H}_6 (13^\circ \text{C}) = 10^{\frac{5,6139 - \frac{902,275}{13+178,10}}{10}} = 7,76 \text{ кПа};$$

$$P_{\text{нп}} \text{C}_6\text{H}_6 (37^\circ \text{C}) = 10^{\frac{5,6139 - \frac{902,275}{37+178,10}}{10}} = 26,3 \text{ кПа}.$$

$$P_{\text{нп}} \text{C}_6\text{H}_5\text{Cl} (-15^\circ \text{C}) = 10^{\frac{6,3861 - \frac{1607,316}{-15+235,351}}{10}} = 0,12 \text{ кПа};$$

$$P_{\text{нп}} \text{C}_6\text{H}_5\text{Cl} (6^\circ \text{C}) = 10^{\frac{6,3861 - \frac{1607,316}{6+235,351}}{10}} = 0,53 \text{ кПа};$$

$$P_{\text{нп}} \text{C}_6\text{H}_5\text{Cl} (13^\circ \text{C}) = 10^{\frac{6,3861 - \frac{1607,316}{13+235,351}}{10}} = 0,81 \text{ кПа};$$

$$P_{\text{нп}} \text{C}_6\text{H}_5\text{Cl} (37^\circ \text{C}) = 10^{\frac{6,3861 - \frac{1607,316}{37+235,351}}{10}} = 3,05 \text{ кПа}.$$

4. Розраховуємо мольну частку кожного компонента суміші за формулою (3.32):

$$\mu_{\text{C}_6\text{H}_6} = 78 \text{ Г} \cdot \text{МОЛЬ}^{-1}; \quad \mu_{\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}} = 112,5 \text{ Г} \cdot \text{МОЛЬ}^{-1};$$

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

$$r_{\mu_{C_6H_6}} = \frac{\frac{51}{78}}{\frac{51}{78} + \frac{49}{112,5}} = 0,6; \quad r_{\mu_{C_6H_5Cl}} = \frac{\frac{49}{112,5}}{\frac{51}{78} + \frac{49}{112,5}} = 0,4.$$

5. Розраховуємо сумарний тиск насиченої пари суміші бензолу та хлорбензолу за визначених температур. Через те що компоненти суміші є взаєморозчинними, розрахунок проводимо за формулою (3.31):

$$P_{\text{нп сум}} (-15^\circ \text{C}) = 0,6 \cdot 1,2 + 0,4 \cdot 0,12 = 0,8 \text{ кПа};$$

$$P_{\text{нп сум}} (6^\circ \text{C}) = 0,6 \cdot 5,13 + 0,4 \cdot 0,54 = 3,3 \text{ кПа};$$

$$P_{\text{нп сум}} (13^\circ \text{C}) = 0,6 \cdot 7,76 + 0,4 \cdot 0,81 = 5,0 \text{ кПа};$$

$$P_{\text{нп сум}} (37^\circ \text{C}) = 0,6 \cdot 26,3 + 0,4 \cdot 3,05 = 17,0 \text{ кПа}.$$

6. Визначаємо вміст кожного компонента суміші у газовій фазі за визначених температур за формулою (3.35):

$$t_{\text{рід}} = -15^\circ \text{C}: \quad \varphi_{C_6H_6} = 100 \frac{0,6 \cdot 1,2}{0,8} = 93,5 \%;$$

$$\varphi_{C_6H_5Cl} = 100 \frac{0,4 \cdot 0,12}{0,8} = 6,5 \%;$$

$$t_{\text{рід}} = 6^\circ \text{C}: \quad \varphi_{C_6H_6} = 100 \frac{0,6 \cdot 5,13}{3,3} = 93,5 \%;$$

$$\varphi_{C_6H_5Cl} = 100 \frac{0,4 \cdot 0,54}{3,3} = 6,5 \%;$$

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

$$t_{\text{рід}} = 13 \text{ }^\circ\text{C}: \quad \varphi_{\text{C}_6\text{H}_6} = 100 \frac{0,6 \cdot 7,76}{5,0} = 93,5 \%;$$

$$\varphi_{\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}} = 100 \frac{0,4 \cdot 0,81}{5,0} = 6,5 \%;$$

$$t_{\text{рід}} = 37 \text{ }^\circ\text{C}: \quad \varphi_{\text{C}_6\text{H}_6} = 100 \frac{0,6 \cdot 26,3}{17} = 92,8 \%;$$

$$\varphi_{\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}} = 100 \frac{0,4 \cdot 3,05}{17} = 7,2 \%.$$

Розрахунки показали, що в діапазоні температур рідини від мінус 15 °С до 37 °С склад пароповітряної суміші майже не змінюється. Приймаємо склад пароповітряної суміші таким: пара бензолу – 93 %, пара хлорбензолу – 7 %.

7. Розраховуємо концентраційні межі поширення полум'я пароповітряної суміші за формулою (3.10):

$$\varphi_{\text{н}_{\text{сум}}} = \frac{100}{\frac{93}{1,43} + \frac{7}{1,40}} = 1,43 \%;$$

$$\varphi_{\text{в}_{\text{сум}}} = \frac{100}{\frac{93}{8,0} + \frac{7}{9,8}} = 8,1 \%.$$

8. Розраховуємо значення тиску насиченої пари за формулою (3.25), що відповідають нижній та верхній концентраційній межі поширення полум'я пароповітряної суміші:

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

$$P_{\text{нп(н)}} = \frac{1,43 \cdot 100}{100} = 1,43 \text{ кПа};$$

$$P_{\text{нп(в)}} = \frac{8,1 \cdot 100}{100} = 8,1 \text{ кПа}.$$

9. Розраховуємо температурні межі поширення полум'я за інтерполяційною формулою (3.40):

$$P_{\text{нп(н)}} = 1,43 \text{ кПа} \rightarrow$$

$$\rightarrow \begin{cases} P_{\text{нп}t_1} = 0,8 \text{ кПа}, T_1 = -15 + 273 = 258 \text{ К} \\ P_{\text{нп}t_2} = 3,3 \text{ кПа}, T_2 = 6 + 273 = 279 \text{ К} \end{cases} \cdot T_{\text{н}} = ?$$

$$T_{\text{н}} = \frac{1}{\frac{1}{279} + \left(\frac{1}{279} - \frac{1}{258} \right) \frac{\lg 1,43 - \lg 3,3}{\lg 3,3 - \lg 0,8}} = 266,2 \text{ К} = -6,8^\circ \text{С}.$$

$$P_{\text{нп(в)}} = 8,1 \text{ кПа} \rightarrow$$

$$\rightarrow \begin{cases} P_{\text{нп}t_1} = 5,0 \text{ кПа}, T_1 = 13 + 273 = 288 \text{ К} \\ P_{\text{нп}t_2} = 17,0 \text{ кПа}, T_2 = 37 + 273 = 310 \text{ К} \end{cases} \cdot T_{\text{в}} = ?$$

$$T_{\text{в}} = \frac{1}{\frac{1}{310} + \left(\frac{1}{310} - \frac{1}{288} \right) \frac{\lg 8,1 - \lg 17,0}{\lg 17,0 - \lg 4,98}} = 296,3 \text{ К} = 23,3^\circ \text{С}.$$

Висновок: за фактичної температури 5°С насичена пара заданої суміші бензолу та хлорбензолу є вибухонебезпечною, бо фактична температура рідини знаходиться в межах від нижньої до верхньої ТМПП

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

($t_n = -6,8 \text{ }^\circ\text{C} < t_f = 5 \text{ }^\circ\text{C} < t_b = 23,3 \text{ }^\circ\text{C}$). Розраховані температурні межі поширення полум'я близько збігаються з експериментальними даними, за якими $t_{n_{\text{експ}}} = -8 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{b_{\text{експ}}} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$.

Методика розрахунку температурних меж поширення полум'я сумішей взаєморозчинних рідин методом сум

1. Визначити характеристики компонентів суміші за довідниками [7], [9]: молярну масу, константи Антуана, температурні межі поширення полум'я, молярну теплоту випаровування (якщо розрахунки проводити за формулою (3.46)).

Якщо суміш має негорючий компонент, розрахувати умовну нижню температурну межу поширення полум'я негорючого компонента за формулою (3.47).

2. Розрахувати мольні частки кожного компонента суміші за формулою (3.32).

3. Розрахувати температурні межі поширення полум'я суміші горючих рідин шляхом послідовних наближень методом сум за формулою (3.45) або (3.46).

3.1. Прийняти у першому наближенні температурні межі поширення полум'я суміші, виходячи зі значень температурних меж поширення полум'я компонентів суміші.

3.2. Провести розрахунок температурних меж поширення полум'я за формулою (3.45) або (3.46) у першому наближенні. Порівняти одержаний результат з одиницею.

Провести розрахунок за формулою (3.45) або (3.46) у другому наближенні. Якщо отриманий результат менший за одиницю, у другому наближенні прийняти температурні межі поширення полум'я суміші більшими, ніж обрані у

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів
першому наближенні, на $5 \div 10$ °С. Якщо отриманий результат більший за одиницю, у другому наближенні температурні межі поширення полум'я суміші прийняти меншими, ніж обрані у першому наближенні, на $5 \div 10$ °С.

Якщо сума у лівій частині рівняння дорівнює “1”, відповідну температуру приймають за температурну межу поширення полум'я суміші.

3.3. Якщо значення суми, одержане у першому наближенні, менше одиниці, а у другому – більше одиниці, то температурні межі поширення полум'я суміші можна розрахувати за методом лінійної інтерполяції за формулою (3.48).

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати температурні межі поширення полум'я суміші, яка складається з 54,0 мас. % бензолу та 46,0 мас. % кумолу.

Розв'язання

1. Визначаємо параметри компонентів суміші за довідником [7]. Для зручності будуємо таблицю:

№	Компонент суміші	Вміст, мас. %	Константи Антуана			ТМПП, °С		Молярна маса
			A	B	C _a	t _н	t _в	
1	бензол C ₆ H ₆	54	5,614	902,275	178,10	-15,0	13,0	78
2	кумол C ₉ H ₁₂	46	6,067	1461,643	207,56	31	69	120

2. Розраховуємо мольні частки компонентів суміші за формулою (3.32):

$$r_{\mu_{C_6H_6}} = \frac{\frac{54}{78}}{\frac{54}{78} + \frac{46}{120}} = 0,64;$$

$$r_{\mu_{C_9H_{12}}} = \frac{\frac{46}{120}}{\frac{54}{78} + \frac{46}{120}} = 0,36.$$

3. Розраховуємо температурні межі поширення полум'я суміші за формулою (3.45).

3.1. Приймаємо у першому наближенні температурні межі поширення полум'я суміші, виходячи зі значень температурних меж поширення полум'я компонентів суміші.

Нижня температурна межа поширення полум'я знаходиться в межах від мінус 15 до 28 °С, приймаємо $t_{н1} = -5^\circ\text{C}$.

Верхня температурна межа поширення полум'я знаходиться в межах від 13 до 62 °С, приймаємо $t_{в1} = 20^\circ\text{C}$.

3.2. Розраховуємо суму у лівій частині рівняння (3.45) у першому наближенні:

- для нижньої ТМПП:

$$0,64 \cdot 10^{\frac{902,275(-5+15)}{(-5+178,1)(-15+178,1)}} + \\ + 0,36 \cdot 10^{\frac{1461,643(-5-31)}{(-5+207,56)(31+207,56)}} = 1,335 + 0,029 = 1,364 > 1;$$

- для верхньої ТМПП:

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

$$0,64 \cdot 10^{\frac{902,275(20-13)}{(20+178,1)(13+178,1)}} + \\ + 0,36 \cdot 10^{\frac{1461,643(20-69)}{(20+207,56)(69+207,56)}} = 0,940 + 0,026 = 0,966 < 1.$$

Оскільки у першому наближенні сума у лівій частині рівняння для нижньої ТМПП виявилася більшою за “1”, приймаємо у другому наближенні $t_{н2} = -10^{\circ}\text{C}$. Для верхньої ТМПП ліва частина рівняння виявилася меншою за “1”, тому приймаємо у другому наближенні $t_{в2} = 25^{\circ}\text{C}$.

Розраховуємо суму в лівій частині рівняння (3.45) у другому наближенні:

- для нижньої ТМПП:

$$0,64 \cdot 10^{\frac{902,275(-10+15)}{(-10+178,1)(-15+178,1)}} + \\ + 0,36 \cdot 10^{\frac{1461,643(-10-31)}{(-10+207,56)(31+207,56)}} = 0,93 + 0,019 = 0,949 < 1;$$

- для верхньої ТМПП:

$$0,64 \cdot 10^{\frac{902,275(25-13)}{(25+178,1)(13+178,1)}} + \\ + 0,36 \cdot 10^{\frac{1461,643(25-69)}{(25+207,56)(69+207,56)}} = 1,217 + 0,036 = 1,253 > 1.$$

3.3. Розраховуємо температурні межі поширення полум'я суміші рідин за методом лінійної інтерполяції за

формулою (3.48):

- для нижньої ТМПП:

$$\Sigma = 1 \cdot \begin{cases} \Sigma_1 = 1,364, t_{н1} = -5 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \Sigma_2 = 0,949, t_{н2} = -10 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \cdot t_{н\text{сум}} = ?$$

$$t_{н\text{сум}} = -5 + \frac{(-10 - (-5))(1 - 1,364)}{(0,949 - 1,364)} = -9,4 \text{ } ^\circ\text{C};$$

- для верхньої ТМПП:

$$\Sigma = 1 \cdot \begin{cases} \Sigma_1 = 0,966, t_{в1} = 20 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \Sigma_2 = 1,253, t_{в2} = 25 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \cdot t_{в\text{сум}} = ?$$

$$t_{в\text{сум}} = 20 + \frac{(25 - 20)(1 - 0,966)}{(1,253 - 0,966)} = 20,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Висновок: суміш, яка складається з 54,0 мас. % бензолу та 46,0 мас. % кумолу, має такі температурні межі поширення полум'я: $t_{н\text{сум}} = -9,5 \text{ } ^\circ\text{C}$, $t_{в\text{сум}} = 20,6 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати нижню температурну межу поширення полум'я суміші, що складається з 32,7 мас. % ізобутилового спирту та 67,3 мас. % етилового спирту.

Розв'язання

1. Визначаємо параметри компонентів суміші за довідниками [7], [9]. Для зручності заносимо їх у таблицю:

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

№	Компонент суміші	Вміст, мас. %	Параметри компонентів		
			$t_n, ^\circ\text{C}$	молярна маса	$\Delta H_{\text{вип}}, \text{кДж/моль}^{-1}$
1	ізобутиловий спирт $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	32,7	25	74	39,7
2	етиловий спирт $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	67,3	11	46	38,6

2. Розраховуємо мольні частки компонентів суміші за формулою (3.32):

$$r_{\mu_{\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}}} = \frac{\frac{32,7}{74}}{\frac{32,7}{74} + \frac{67,3}{46}} = 0,23;$$

$$r_{\mu_{\text{C}_2\text{H}_6\text{O}}} = \frac{\frac{63,5}{46}}{\frac{36,5}{74} + \frac{63,5}{46}} = 0,77.$$

3. Розраховуємо нижню температурну межу поширення полум'я суміші $t_{n_{\text{сум}}}$ за формулою (3.46).

3.1. Приймаємо у першому наближенні нижню температурну межу поширення полум'я суміші, виходячи зі значень температурних меж поширення полум'я компонентів суміші.

Оскільки нижня температурна межа поширення полум'я компонентів суміші становить 11 та 25°C , приймаємо $t_{n_1} = 15^\circ\text{C}$.

3.2. Розраховуємо суму в лівій частині рівняння (3.46) у першому наближенні:

$$\begin{aligned}
 & 0,23 \exp \left[\frac{39,3}{8,314 \cdot 10^{-3}} \left(\frac{1}{273 + 25} - \frac{1}{273 + 15} \right) \right] + \\
 & + 0,77 \exp \left[\frac{38,6}{8,314 \cdot 10^{-3}} \left(\frac{1}{273 + 11} - \frac{1}{273 + 15} \right) \right] = \\
 & = 0,133 + 0,962 = 1,095 > 1,0.
 \end{aligned}$$

Оскільки у першому наближенні сума в лівій частині рівняння виявилася більшою за “1”, приймаємо у другому наближенні $t_{н2} = 10^\circ \text{C}$ та повторюємо розрахунок:

$$\begin{aligned}
 & 0,23 \exp \left[\frac{39,3}{8,314 \cdot 10^{-3}} \left(\frac{1}{273 + 25} - \frac{1}{273 + 10} \right) \right] + \\
 & + 0,77 \exp \left[\frac{38,6}{8,314 \cdot 10^{-3}} \left(\frac{1}{273 + 11} - \frac{1}{273 + 10} \right) \right] = \\
 & = 0,132 + 0,725 = 0,857 < 1,0.
 \end{aligned}$$

3.3. Розраховуємо нижню температурну межу поширення полум'я суміші рідин за методом лінійної інтерполяції за формулою (3.48):

$$\Sigma = 1 \cdot \begin{matrix} \cdot \cdot \cdot \Sigma_1 = 1,095, t_{н1} = 15^\circ \text{C} \cdot \cdot \cdot \\ \cdot \cdot \cdot \Sigma_2 = 0,857, t_{н2} = 10^\circ \text{C} \cdot \cdot \cdot \end{matrix} \cdot t_{н\text{сум}} = ?$$

$$t_{н\text{сум}} = 15 + \frac{(10 - 15)(1 - 1,095)}{(0,857 - 1,095)} = 13,0^\circ \text{C}.$$

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

Висновок: суміш, яка складається з 32,7 % мас. ізобутилового спирту та 67,3 % мас. етилового спирту, має нижню температурну межу поширення полум'я $t_{н, сум} = 13,0$ °С.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати нижню температурну межу поширення полум'я суміші, що складається з 70 мас. % етилового спирту та 30 мас. % води.

Розв'язання

1. Визначаємо параметри компонентів суміші за довідниками [7], [9]. Для зручності дані заносимо в таблицю:

№	Компонент суміші	Вміст, мас. %	Параметри компонентів		
			$t_n, ^\circ\text{C}$	молярна маса	$\Delta H_{\text{вип}}, \text{кДжмоль}^{-1}$
1	етиловий спирт $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	70	11	46	38,6
2	вода H_2O	30		18	44,0

Розраховуємо умовну нижню температурну межу поширення полум'я води за формулою (3.47). Константи Антуана води: $A = 3,901$, $B = 422,95$, $C_a = 100,9$, загальний тиск пароповітряної суміші дорівнює 101,3 кПа.

$$\begin{aligned} T_{н\text{H}_2\text{O}} &= \frac{B}{A - \lg[P_{\text{заг}} / (\gamma - 1)]} - C_a = \\ &= \frac{422,95}{3,901 - \lg[101,3 / (1,13 - 1)]} - 100,95 = 318,3 \text{ К.} \end{aligned}$$

2. Розраховуємо мольні частки компонентів суміші за формулою (3.32):

$$r_{\mu_{C_2H_6O}} = \frac{\frac{70}{46}}{\frac{70}{46} + \frac{30}{18}} = 0,45;$$

$$r_{\mu_{H_2O}} = \frac{\frac{30}{18}}{\frac{70}{46} + \frac{7,3}{18}} = 0,56.$$

3. Розраховуємо нижню температурну межу поширення полум'я суміші $t_{n, \text{сум}}$ за формулою (3.46).

3.1. Оскільки нижня температурна межа поширення полум'я компонентів суміші становить 284 та 318,3 К, у першому наближенні приймаємо $T_{n1} = 288$ К.

3.2. Розраховуємо суму у лівій частині рівняння (3.46) у першому наближенні:

$$0,45e^{\frac{38,6}{8,314 \cdot 10^{-3}} \left(\frac{1}{284} - \frac{1}{288} \right)} + 0,56e^{\frac{44,0}{8,314 \cdot 10^{-3}} \left(\frac{1}{318,3} - \frac{1}{288} \right)} = \\ = 0,556 + 0,1 = 0,656 < 1,0.$$

Оскільки у першому наближенні сума в лівій частині рівняння виявилася значно меншою за "1", приймаємо у другому наближенні $T_{n2} = 298$ К та повторюємо розрахунок:

$$0,45e^{\frac{38,6}{8,314 \cdot 10^{-3}} \left(\frac{1}{284} - \frac{1}{298} \right)} + \\ + 0,56e^{\frac{44,0}{8,314 \cdot 10^{-3}} \left(\frac{1}{318,3} - \frac{1}{298} \right)} = 0,952 + 0,183 = 1,135 > 1,0.$$

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

3.3. Розраховуємо нижню температурну межу поширення полум'я суміші рідин за методом лінійної інтерполяції за формулою (3.48):

$$\Sigma = 1 \cdot \begin{cases} \cdot \Sigma_1 = 0,656, t_{н1} = 288 - 273 = 15^\circ \text{C} \cdot \\ \cdot \Sigma_2 = 1,135, t_{н2} = 298 - 273 = 25^\circ \text{C} \cdot \end{cases} \cdot t_{н\text{сум}} = ?,$$

$$t_{н\text{сум}} = 15 + \frac{(25 - 15)(1 - 0,656)}{(1,135 - 0,656)} = 22,2^\circ \text{C}.$$

Висновок: за розрахунком суміш, яка складається з 70 % мас. етилового спирту та 30 % мас. води, має нижню температурну межу поширення полум'я $t_{н\text{сум}} = 22,2^\circ \text{C}$, що близько збігається з експериментальними даними [5], за якими $t_{н\text{сум}} = 20^\circ \text{C}$.

Методика орієнтовного розрахунку нижньої температурної межі поширення полум'я бінарної суміші взаєморозчинних горючих рідин

1. Визначити нижню ТМПП компонентів суміші за довідником [7] або розрахувати за однією із формул (3.38) – (3.42). Обрати за компонент А рідину, яка має більше значення нижньої ТМПП.

2. Визначити коефіцієнт f відповідно до відсоткового вмісту компонентів суміші за таблицею 3.14.

3. Розрахувати нижню ТМПП суміші рідин за формулою (3.49).

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

Приклад розв'язання задачі

Визначити, за яких температур фактична концентрація насиченої пари суміші рідин, що складається з 45 % мас. ацетону та 55 % мас. толуолу, є безпечною.

Розв'язання

1. Визначаємо нижню ТМПП компонентів суміші за довідником [7]: ацетон $t_{nC_3H_6O} = -20,0$ °С, толуол $t_{nC_7H_8} = 0,0$ °С. Оскільки $t_{nC_3H_6O} < t_{nC_7H_8}$, за речовину А обираємо толуол.

2. Визначаємо коефіцієнт f за таблицею 3.14 з урахуванням того, що $\varphi_A = 55$ % мас.: $f = 27,6$.

3. Розраховуємо нижню ТМПП суміші рідин за формулою (3.49):

$$t_{n_{\text{сум}}} = \frac{55 \cdot 0 + 45 \cdot (-20) - 27,6(0 - (-20))}{100} = -14,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

4. Розраховуємо нижню безпечну ТМПП за формулою (3.43), враховуючи, що коефіцієнт безпеки для сумішей рідин становить 14 °С:

$$t_{нб} = 0,9(-14,5 - 14) = -25,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Висновок: фактична концентрація насиченої пари суміші рідин, що складається з 45 % мас. ацетону та 55 % мас. толуолу, є безпечною за температур менше, ніж мінус 25,6 °С.

§ 3. *Розрахунок температури спалаху індивідуальних рідин та їх сумішей*

Виникнення горіння пари рідини від джерела запалювання може статися тільки за умови, що концентрація пари в суміші з повітрям досягне значення нижньої концентраційної межі поширення полум'я φ_n . Якщо рідина знаходиться у відкритій посудині, частина пари весь час буде дифундувати у навколишній простір, і для досягнення концентрації пари, рівної нижній концентраційній межі, рідину необхідно нагріти до *температури спалаху*.

Як вже було сказано раніше, значення температури спалаху лежить в основі класифікації рідин за ступенем їх пожежної небезпеки (розрізняють горючі, легкозаймісті та особливо небезпечні рідини); цей параметр використовується під час визначення категорії пожежної небезпеки приміщень та будівель, а також умов безпечного транспортування, зберігання, застосування горючих рідин. Згідно [31] вважається, що *безпечною температурою експлуатації* рідини, яка знаходиться на відкритому просторі, є температура, на 35 °С менша, ніж температура спалаху в закритому тиглі:

$$t_{\text{безрід}} = t_{\text{сп}} - 35, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3.50)$$

Експериментальне значення температури спалаху залежить від умов проведення. Так, експериментально температуру спалаху визначають двома методами – у відкритому тиглі (в.т.) або у закритому тиглі (з.т.) [31]. Це зумовлює певні складнощі під час розробки коректного методу розрахунку цього параметра. Тому всі існуючі методи розрахунку носять орієнтовний характер.

§ 3.1. Розрахунок температури спалаху і температури займання індивідуальної горючої рідини

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

$$t_{\text{сп}} = t_{\text{кип}} - 18\sqrt{K_r}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3.51)$$

де K_r – коефіцієнт горючості речовини, який визначається за формулою:

$$K_r = 4n_C + 4n_S + n_H + n_N - 2n_O - 2n_{Cl} - 3n_F - 5n_{Br}, \quad (3.52)$$

де $n_C, n_S, n_H, n_N, n_O, n_{Cl}, n_F, n_{Br}$ – число відповідних атомів у складі молекули речовини.

Більш точно температуру спалаху в закритому і відкритому тиглі, а також температуру займання можна визначити з урахуванням *структури горючої речовини* за формулою:

$$t_{\text{сп}} = a_0 + a_1 t_{\text{кип}} + \sum a_j l_j, \quad (3.53)$$

де a_0 – коефіцієнт, «-73,14 °C» для визначення температури спалаху і «-47,78 °C» для температури займання;

a_1 – безрозмірний коефіцієнт; 0,659 для визначення температури спалаху і 0,882 для температури займання;

$t_{\text{кип}}$ – температура кипіння горючої рідини, °C;

a_j – емпіричний коефіцієнт, що характеризує внесок j -ої структурної групи, наведений у таблиці 3.15;

l_j – число структурних груп j -го виду в молекулі.

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

Таблиця 3.15 – Константи a_j структурних груп для визначення температури спалаху та займання

Вид структурної групи	$a_j, ^\circ\text{C}$		
	$t_{\text{сп (з.т.)}}$	$t_{\text{сп (вт.)}}$	$t_{\text{займ}}$
C – C	-2,03	3,63	0,027
C = C	1,72	-4,18	-8,98
C ... C (аром)	-0,28	6,48	-2,069
C – H	1,105	0,35	-2,118
C – O	2,47	4,62	-0,111
C = O	11,66	25,36	-0,826
C – N	14,15	-7,03	-5,876
C \equiv N	12,13		
O – H	23,90	44,29	8,216
N – H	5,83	18,15	-0,261
C – S	2,09	14,86	
C = S	-11,91		
Si – Cl	10,07	50,49	
Si – H	11,00	-4,58	
S – H	5,64	10,75	
P – O	3,27	22,23	
P = O	9,64	-9,86	
C – Si	-4,84		
C – F	3,33		
C – Cl	15,11		
C – Br	19,40		

Середнє квадратичне відхилення розрахунку за формулою (3.53) становить 10°C для температури спалаху і 15°C – для температури займання.

У межах одного гомологічного ряду значення температури спалаху рідин монотонно зростає зі збільшенням молярної маси. Внаслідок обробки чисельних експериментальних даних було отримано емпіричну формулу, що враховує лінійну залежність

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

температури спалаху від температури кипіння для певних *гомологічних класів хімічних сполук*:

$$t_{\text{сп}} = a + bt_{\text{кип}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3.54)$$

де a , b – емпіричні константи гомологічних рядів горючих рідин; визначають за таблицею 3.16.

Таблиця 3.16 – Емпіричні константи a і b для визначення температури спалаху в закритому тиглі

Клас речовин	Коефіцієнти		Клас речовин	Коефіцієнти	
	$a, \text{ } ^\circ\text{C}$	b		$a, \text{ } ^\circ\text{C}$	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

Середнє квадратичне відхилення розрахунку за формулою (3.54) не перевищує $5 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Для речовин, що складаються з С, Н, О, N, а також *галогенорганічних і елементоорганічних сполук*, які у своєму складі містять атоми S, Si, P і Cl, температуру спалаху в закритому тиглі можна розрахувати за формулою:

$$t_{\text{сп}} = C_0 + C_1 t_{\text{кип}} + C_2 Q_{\text{н}}, \quad (3.55)$$

де C_0 , C_1 , C_2 – емпіричні константи для різних класів сполук (таблиця 3.17);

$Q_{\text{н}}$ – нижча молярна теплота згоряння речовини, кДж·моль⁻¹.

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

Таблиця 3.17 – Емпіричні константи формули (3.55) для сполук деяких класів

Клас сполук	$C_0, ^\circ\text{C}$	C_1	$C_2, \text{К}$ моль·кДж ⁻¹
сполуки з атомами С, Н, О, N	-45,5	0,83	-0,0082
сполуки з атомами С, Н, О, N, Сl	-39,6	0,86	-0,0114
сполуки з атомами F, Br	-57,4	0,79	-0,0147
елементоорганічні сполуки з атомами S, Si, P, Сl	-45,5	0,83	-0,0082

Між температурою спалаху речовини у закритому тиглі й нижньою температурною межею поширення полум'я за умови, що $0 \leq t_{\text{сп}} \leq 160 ^\circ\text{C}$, існує *кореляційний зв'язок*, який описується формулою:

$$t_{\text{сп}} = 1,14(t_{\text{н}} + 2), ^\circ\text{C}, \quad (3.56)$$

де $t_{\text{н}}$ – нижня температурна межа поширення полум'я рідини, $^\circ\text{C}$.

Серед числових орієнтовних методів найбільш загальним і достатньо точним є розрахунок температури спалаху, а також температури займання індивідуальної речовини за *формулою В.І. Блінова*:

$$T_{\text{сп}} = \frac{A_{\text{Б}}}{D_0 \beta P_{\text{нп}}}, \text{К}, \quad (3.57)$$

де $T_{\text{сп}}$ – температура спалаху або займання, К;

D_0 – коефіцієнт дифузії пари рідини, $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$;

β – стехіометричний коефіцієнт кисню в рівнянні реакції горіння;

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

$P_{\text{нп}}$ – тиск насиченої пари рідини за температури спалаху або займання, кПа;

A_B – константа методу розрахунку, яка приймається при розрахунку температури спалаху:

- у закритому тиглі $A_B = 280 \text{ К} \cdot \text{кПа} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$,

- у відкритому тиглі $A_B = 427 \text{ К} \cdot \text{кПа} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$;

при розрахунку температури займання:

- для органічних речовин $A_B = 453 \text{ К} \cdot \text{кПа} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$;

- для фосфорорганічних сполук $A_B = 1333 \text{ К} \cdot \text{кПа} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Експериментальні значення коефіцієнта дифузії D_0 багатьох речовин наведені у довіднику [7]. Якщо такі дані відсутні, коефіцієнт дифузії пари у повітрі за нормальних умов з достатньою точністю можна розрахувати за формулою:

$$D_0 = \frac{1}{\sqrt{\sum_i n_i \Delta M_i}}, \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}, \quad (3.58)$$

де n_i – число атомів i -го типу у складі молекули;

ΔM_i – атомні складові, значення яких наведені у табл. 3.18.

Таблиця 3.18 – Значення атомних складових ΔM для різних типів атомів

Тип атома	ΔM	Тип атома	ΔM
C (аромат.)	25	O	17
C ($n_C \leq 8$)	$25 + 3n_C$	N	16
C ($n_C > 8$)	50	S	48
H	1	Cl	37

Оскільки тиск насиченої пари є функцією температури, безпосередньо визначити температуру

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів
спалаху за формулою (3.57) не можна. Тому спочатку, використовуючи відомі значення A_B , D_0 , β для даної речовини, із формули (3.57) визначають величину $T_{сп}P_{нп} = \frac{A_B}{D_0\beta}$, знаходять аналітичну залежність тиску

насиченої пари речовини від температури (наприклад, у вигляді формули Антуана (3.28)), а потім методом послідовних наближень знаходять $T_{сп}$. Для цього розраховують за різних температур добуток $TP_{нп}$, домагаючись мінімальної різниці між $TP_{нп}$ і $T_{сп}P_{нп}$.

Середньоквадратична похибка розрахунку за формулою (3.57) не перевищує 13 °С.

Методика розрахунку температури спалаху індивідуальної рідини та визначення класу її пожежної небезпеки

1. Визначити температуру кипіння рідини за довідником [7] або за таблицею 9 додатків.
2. Визначити температуру спалаху рідини за одним із наведених способів за формулами (3.51)-(3.56).
3. Визначити клас пожежної небезпеки рідини, порівнюючи температуру спалаху з 61 °С і 28 °С.
4. Розрахувати безпечну температуру експлуатації рідини за формулою (3.50).

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати температуру спалаху етилового ефіру пропанової кислоти $C_5H_{10}O_2$ за формулою Еллея. Визначити безпечну температуру експлуатації рідини та похибку розрахунку, якщо експериментальне значення

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

температури спалаху дорівнює 12 °С.

Розв'язання

1. Визначаємо температуру кипіння етилового ефіру пропанової кислоти за довідником [7]: $t_{\text{кип}} = 99,1^{\circ}\text{C}$.

2. Розраховуємо коефіцієнт горючості речовини за формулою (3.52):

$$n_{\text{C}} = 5, n_{\text{H}} = 10, n_{\text{O}} = 2;$$

$$K_r = 4 \cdot 5 + 10 - 2 \cdot 2 = 26.$$

3. Розраховуємо температуру спалаху пропанової кислоти за формулою (3.51):

$$t_{\text{сп}} = 99,1 - 18 \cdot \sqrt{26} = 7,3^{\circ}\text{C}.$$

Етиловий ефір пропанової кислоти відноситься до особливо небезпечних легкозаймистих рідин, через те що його температура спалаху менше 28 °С.

4. Розраховуємо безпечну температуру експлуатації рідини за формулою (3.50):

$$t_{\text{безрід}} = 7,3 - 35 = -27,7^{\circ}\text{C}.$$

Висновок: безпечна температура експлуатації етилового ефіру пропанової кислоти становить менше, ніж мінус 27,7 °С. Розраховане значення температури спалаху відрізняється від експериментально визначеного на 4,7 °С.

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

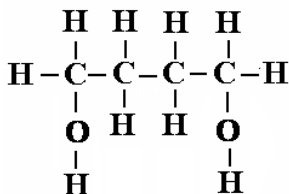
Приклад розв'язання задачі

Розрахувати температуру спалаху в закритому і відкритому тиглі, температуру займання бутандіолу-1,4 $C_4H_{10}O_2$ з урахуванням структури горючої рідини (за формулою (3.53)). Визначити клас пожежної небезпеки рідини та похибку розрахунку, якщо експериментальне значення температури спалаху дорівнює $121\text{ }^\circ\text{C}$, а температури займання – $132\text{ }^\circ\text{C}$.

Розв'язання

1. Визначаємо температуру кипіння бутандіолу-1,4 за довідником [7]: $t_{\text{кип}} = 228\text{ }^\circ\text{C}$.

2. Записуємо структурну формулу бутандіолу-1,4:



3. Визначаємо число структурних груп j -го типу та відповідні коефіцієнти a_j кожної структурної групи за таблицею 3.15.

Для спрощення розрахунків складаємо таблицю:

Вид структурної групи	Число груп, ℓ_j	$a_j, \text{ }^\circ\text{C}$		
		$t_{\text{сп}} (\text{з.т.})$	$t_{\text{сп}} (\text{в.т.})$	$t_{\text{займ}}$
C – C	3	-2,03	3,63	0,027
C – H	8	1,105	0,35	-2,118
C – O	2	2,47	4,62	0,111
O – H	2	23,90	44,29	8,216

4. Розраховуємо температуру спалаху бутандіолу-1,4

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

в закритому і відкритому тиглі і температуру займання за формулою (3.53):

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

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

$$t_{\text{займ}} = -47,78 + 0,882 \cdot 228 + 0,027 \cdot 3 + (-2,118) \cdot 8 + (-0,111) \cdot 2 + 8,216 \cdot 2 = 152,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Висновок: бутандіол-1,4 відноситься до горючих рідин, через те що має температуру спалаху в закритому тиглі більшу, ніж $61 \text{ } ^\circ\text{C}$. Розраховане значення температури спалаху в закритому тиглі $132,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ відрізняється від експериментально визначеного на $11 \text{ } ^\circ\text{C}$, а розрахункове значення температури займання відрізняється від експериментально визначеного на $20 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати температуру спалаху в закритому тиглі, безпечну температуру експлуатації та визначити клас пожежної небезпеки бутиланіліну $\text{C}_{10}\text{H}_{15}\text{N}$ за константами гомологічного ряду (за формулою (3.54)). Визначити розбіжність між розрахованим та експериментальним значенням температури спалаху, яке дорівнює $107 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Розв'язання

1. Із довідника [7] визначаємо температуру кипіння

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

бутиланіліну: $t_{\text{кип}} = 241 \text{ }^\circ\text{C}$.

2. За таблицею 3.16 визначаємо емпіричні константи гомологічного ряду алкіланілінів: $a = -21,94$; $b = 0,553$.

3. Розраховуємо температуру спалаху бутиланіліну за формулою (3.54):

$$t_{\text{сп}} = -21,94 + 0,553 \cdot 241 = 111,3 \text{ }^\circ\text{C}.$$

4. Розраховуємо безпечну температуру експлуатації бутиланіліну за формулою (3.50):

$$t_{\text{безрід}} = 111,3 - 35 = 76,3 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Висновок: бутиланілін відноситься до горючих рідин, через те що має температуру спалаху в закритому тиглі більшу, ніж $61 \text{ }^\circ\text{C}$. Розраховане значення температури спалаху $111,3 \text{ }^\circ\text{C}$ відрізняється від експериментально визначеного на $4,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Безпечна температура експлуатації бутиланіліну є меншою, ніж $76,3 \text{ }^\circ\text{C}$.

Приклад розв'язання задачі

Визначити температуру спалаху в закритому тиглі та клас пожежної небезпеки дихлорфенолу $\text{C}_6\text{H}_4\text{OCl}_2$ за формулою (3.55).

Розв'язання

1. Із довідника [7] визначаємо температуру кипіння дихлорфенолу та його молярну теплоту згоряння: $t_{\text{кип}} = 210 \text{ }^\circ\text{C}$, $Q_{\text{н}} = 2920 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$.

2. За таблицею 3.17 визначаємо емпіричні

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

константи класу сполук, що складаються із атомів С, Н, О, Сl: $C_0 = -39,6$, $C_1 = 0,86$, $C_2 = -0,0114$.

3. Розраховуємо температуру спалаху дихлорфенолу за формулою (3.55):

$$t_{\text{сп}} = -39,6 + 0,86 \cdot 210 - 0,0114 \cdot 2920 = 107,7 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Висновок: дихлорфенол є горючою рідиною, оскільки його температура спалаху в закритому тиглі дорівнює $107,7 \text{ } ^\circ\text{C}$ і є більшою, ніж $61 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати температуру спалаху *втор*-бутилбензолу $\text{C}_{10}\text{H}_{14}$ з урахуванням кореляційного зв'язку з нижньою температурною межею поширення полум'я (за формулою (3.56)) та порівняти її з експериментальною температурою спалаху в закритому тиглі, рівною $52 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Розв'язання

1. Із довідника [7] визначаємо нижню температурну межу поширення полум'я: $t_{\text{н}} = 47 \text{ } ^\circ\text{C}$.

2. Розраховуємо температуру спалаху в закритому тиглі *втор*-бутилбензолу за формулою (3.56):

$$t_{\text{сп}} = 1,14(47 + 2) = 55,9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Висновок: температура спалаху в закритому тиглі *втор*-бутилбензолу дорівнює $55,9 \text{ } ^\circ\text{C}$. Відхилення розрахунку від експерименту становить $3,9 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

Методика розрахунку температур спалаху та займання за формулою Блінова В.І.

1. Скласти рівняння реакції горіння речовини у повітрі, визначити стехіометричний коефіцієнт β .

2. Визначити за довідником [7] або таблицями додатків для даної горючої речовини такі параметри:

- коефіцієнт дифузії пари D_0 (або розрахувати за формулою (3.58));

- константи рівняння Антуана;

- нижню температурну межу поширення полум'я (або розрахувати за формулою (3.38)).

3. Визначити константу методу розрахунку A_B та

розрахувати величину $T_{сп}P_{нп} = \frac{A_B}{D_0\beta}$.

4. Визначити температуру спалаху у першому наближенні T_1 , орієнтуючись на значення нижньої температурної межі поширення полум'я.

5. Розрахувати тиск насиченої пари $P_{нп1}$ за температури T_1 за формулою (3.28).

6. Розрахувати добуток $T_1P_{нп1}$.

7. Визначити температуру спалаху у другому наближенні T_2 . Якщо за температури та тиску, прийнятих у першому наближенні, добуток $T_1P_{нп1}$ більший, ніж величина $T_{сп}P_{нпсп}$, температуру для розрахунку у другому наближенні T_2 прийняти меншою, ніж T_1 ; якщо значення $T_1P_{нп1}$ менше, ніж $T_{сп}P_{нпсп}$, то T_2 прийняти більшою, ніж T_1 .

8. Розрахувати тиск насиченої пари $P_{нп2}$ за температури T_2 за формулою (3.28).

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

9. Розрахувати добуток $T_2 P_{\text{нп}2}$.

10. Розрахувати температуру спалаху рідини $T_{\text{сп}}$ за методом лінійної інтерполяції:

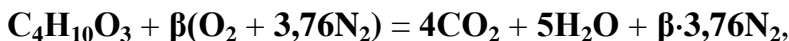
$$T_{\text{сп}} = T_1 + \frac{(T_2 - T_1)(T_{\text{сп}} P_{\text{нп}(\text{сп})} - T_1 P_{\text{нп}1})}{T_2 P_{\text{нп}2} - T_1 P_{\text{нп}2}}, \text{ К.} \quad (3.59)$$

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати температуру спалаху у закритому тиглі та температуру займання діетиленгліколю $C_4H_{10}O_3$ за нормального атмосферного тиску.

Розв'язання

1. Складаємо рівняння реакції горіння діетиленгліколю у повітрі, визначаємо стехіометричний коефіцієнт β :



$$\beta = 5.$$

2. Визначаємо такі параметри діетиленгліколю:

- константи рівняння Антуана за таблицею 8 додатків: $A = 7,2767$, $B = 2727,3$, $C_a = 273$.

- нижню температурну межу поширення полум'я за довідником [7]: $t_H = 118 \text{ }^\circ\text{C}$.

- коефіцієнт дифузії розрахунком за формулою (3.58):

$$D_o = \frac{1}{\sqrt{\sum_i 4(25 + 3 \cdot 4) + 1 \cdot 10 + 3 \cdot 17}} = 0,0692 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}.$$

3. Визначаємо константу методу розрахунку A_B і

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів
розраховуємо величину $\frac{A_B}{D_{oB}}$ для температури спалаху у закритому тиглі та для температури займання:

$$T_{\text{сп}} P_{\text{нпсп}} = \frac{A_B}{D_{oB}} = \frac{280}{0,0692 \cdot 5} = 809,3;$$

$$T_3 P_{\text{нпз}} = \frac{A_B}{D_{oB}} = \frac{453}{0,0692 \cdot 5} = 1309,2.$$

4. Визначаємо температуру для розрахунку у першому наближенні T_1 , орієнтуючись на значення нижньої температурної межі поширення полум'я:

$$T_1 = 118 + 273 = 391 \text{ К.}$$

5. Розраховуємо тиск насиченої пари $P_{\text{нп1}}$ за температури T_1 за формулою (3.28):

$$P_{\text{нп}} = 10^{\left(7,2767 - \frac{2727,3}{118+273}\right)} = 2,0 \text{ кПа.}$$

6. Розраховуємо добуток $T_1 P_{\text{нп1}}$ й порівнюємо його з величиною $\frac{A_B}{D_{oB}}$ для температури спалаху у закритому тиглі та для температури займання:

- для температури спалаху: $391 \cdot 2,0 = 782 < 809,3$,

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

- для температури займання: **$391 \cdot 2,0 = 782 < 1309,2$** .

7. Визначаємо температуру для розрахунку у другому наближенні T_2 .

Оскільки за температури, взятої у першому наближенні, $P_{\text{нп1}} T_1 < T_{\text{сп}} P_{\text{нпсп}}$ та $P_{\text{нп1}} T_1 < T_3 P_{\text{нп3}}$, приймаємо $T_2 > T_1$: $T_2 = 413 \text{ К}$ ($t_2 = 413 - 273 = 140^\circ$).

8. Розраховуємо тиск насиченої пари $P_{\text{нп2}}$ за температури T_2 за формулою (3.28):

$$P_{\text{нп}} = 10^{\left(7,2767 - \frac{2727,3}{140 + 273}\right)} = 4,7 \text{ кПа.}$$

9. Розраховуємо добуток $T_2 P_{\text{нп2}}$ і порівнюємо його з величиною $\frac{A_{\text{Б}}}{D_{\text{об}}}$ для температури спалаху у закритому тиглі та для температури займання:

- для температури спалаху: **$413 \cdot 4,7 = 1941 > 809,3$** ,

- для температури займання: **$413 \cdot 4,7 = 1941 > 1309,2$** .

10. Розраховуємо температуру спалаху діетиленгліколю у закритому тиглі та температуру займання за методом лінійної інтерполяції за формулою (3.59):

$$T_{\text{сп}} = 391 + \frac{(413 - 391)(809,3 - 782)}{(1941 - 782)} = 392 \text{ К};$$

$$T_3 = 391 + \frac{(413 - 391)(1309,2 - 782)}{(1941 - 782)} = 401 \text{ К.}$$

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

Висновок: температура спалаху діетиленгліколю в закритому тиглі дорівнює 392 К або 119 °С (за довідником [7] $t_{\text{сп(з.т.)}} = 124$ °С); температура займання дорівнює 401 К або 128 °С.

§ 3.2. Розрахунок температури спалаху суміші рідин

Розрахунок температури спалаху сумішей взаєморозчинних горючих рідин у закритому тиглі можна провести за *методом сум* аналогічно розрахунку температурних меж поширення полум'я суміші [5], [8].

Якщо відома температура спалаху та теплота випаровування (або температура кипіння) кожного компонента суміші, розрахунок проводиться методом послідовних наближень за формулою, яка обертається в тотожність за температури спалаху суміші $T_{\text{спсум}}$:

$$\sum_i r_{\mu_i} \cdot \exp \left[\frac{\Delta H_{\text{вип}_i}}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{сп}_i}} - \frac{1}{T_{\text{спсум}}} \right) \right] = 1, \quad (3.60)$$

де r_{μ_i} – молярна частка i -го компонента в рідкій фазі;

$\Delta H_{\text{вип}_i}$ – молярна теплота випаровування i -го компонента;

R – універсальна газова стала;

$T_{\text{сп}_i}$ – температура спалаху в закритому тиглі i -го компонента суміші рідин, К;

$T_{\text{спсум}}$ – температура спалаху суміші рідин, К.

Середня квадратична похибка розрахунку за

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

формулою (3.60) становить 9 °С.

Якщо відома залежність тиску насиченої пари від температури для кожного з компонентів суміші, розрахунок температури спалаху в закритому тиглі суміші взаєморозчинних горючих рідин можна провести за формулою, яка обертається в тотожність за температури $t_{\text{сп сум}}$:

$$\sum_i r_{\mu_i} 10^{Z_i} \frac{1642 - (t_{\text{сп}_i} + C_{a_i})}{1642 - (t_{\text{сп сум}} + C_{a_i})} = 1, \quad (3.61)$$

$$\text{де } Z_i = \frac{B_i (t_{\text{сп сум}} - t_{\text{сп}_i})}{(t_{\text{сп сум}} + C_{a_i})(t_{\text{сп}_i} + C_{a_i})};$$

B_i , C_{a_i} – константи рівняння Антуана для i -го компонента суміші;

$t_{\text{сп}_i}$, $t_{\text{сп сум}}$ – температура спалаху в закритому тиглі відповідно i -го компонента та суміші, °С.

Середня квадратична похибка розрахунку за формулою (3.61) становить 11 °С.

Температуру спалаху бінарної суміші горючих рідин, які належать до одного гомологічного ряду, можна розрахувати за формулою:

$$t_{\text{сп сум}} = t_{\text{сп}} + \Delta \left[g + (m - 1) X^m \right], \quad (3.62)$$

де $t_{\text{сп}}$ – температура спалаху легкокиплячого компонента суміші, °С;

Δ – гомологічна різниця за температурою спалаху гомологічного ряду, до якого належать компоненти суміші;

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

g – масова частка висококиплячого компонента суміші в рідкій фазі;

m – різниця між числом атомів карбону компонентів суміші;

X – коефіцієнт, що враховує нелінійний характер залежності температури спалаху від масової частки g (при $g \geq 0,5$ значення $X = 2g - 1$, при $g < 0,5$ значення $X = 0$).

Формула (3.62) може бути використана для розрахунку температури спалаху в закритому тиглі суміші рідин, які належать до гомологічних рядів спиртів і складних ефірів нормальної будови. Середньо-квадратична похибка розрахунку становить $2\text{ }^\circ\text{C}$ [5].

Орієнтовну оцінку температури спалаху в закритому тиглі бінарної суміші взаєморозчинних рідин, які не утворюють азеотропних сумішей, так само як нижню ТМПП суміші, можна провести за *апроксимаційною формулою*:

$$t_{\text{сп, сум}} = \frac{\varphi_A \cdot t_{\text{спA}} + \varphi_B \cdot t_{\text{спB}} - f(t_{\text{спA}} - t_{\text{спB}})}{100}, \quad (3.63)$$

де A, B – компоненти горючої суміші, причому за A обирається рідина з більшим значенням температури спалаху;

φ_A, φ_B – концентрація компонентів суміші в рідкій фазі, мас. %;

$t_{\text{спA}}, t_{\text{спB}}$ – температура спалаху в закритому тиглі компонентів суміші, $^\circ\text{C}$;

f – емпіричний коефіцієнт, який визначають за таблицею 3.14; враховує нелінійний характер інтенсивності випаровування компонентів бінарної суміші рідин залежно від її складу.

Методика розрахунку температури спалаху в закритому тиглі суміші взаєморозчинних рідин методом сум

1. Визначити характеристики компонентів суміші за довідниками [7], [9]: молярну масу, температуру спалаху, молярну теплоту випаровування або температуру кипіння (якщо розрахунки проводити за формулою (3.60)), константи Антуана (якщо розрахунки проводити за формулою (3.61)).

2. Розрахувати мольні частки кожного компонента суміші за формулою (3.32) або (3.33).

3. Розраховувати температуру спалаху суміші горючих рідин шляхом послідовних наближень методом сум за формулою (3.60) або (3.61).

3.1. Прийняти у першому наближенні температуру спалаху суміші, виходячи зі значень температур спалаху компонентів суміші. Провести розрахунок суми у лівій частині рівняння за формулою (3.60) або (3.61) у першому наближенні. Порівняти одержаний результат з одиницею.

3.2. Провести розрахунок суми за формулою (3.60) або (3.61) у другому наближенні. Якщо отриманий результат менший за одиницю, у другому наближенні прийняти температуру спалаху суміші більшою, ніж обрану у першому наближенні, на $5 \div 10$ °С. Якщо отриманий результат більший за одиницю, у другому наближенні температуру спалаху суміші прийняти меншою, ніж обрану у першому наближенні, на $5 \div 10$ °С. Якщо сума у лівій частині рівняння дорівнює "1", відповідну температуру прийняти за температуру спалаху суміші.

3.3. Якщо значення суми, одержане у першому наближенні, є меншим за одиницю, а у другому –

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів
 більшим за одиницю, то температуру спалаху суміші
 розрахувати за методом лінійної інтерполяції за
 формулою, аналогічною (3.48).

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати температуру спалаху суміші рідин, яка
 складається з 70 об. % н-гексанолу $C_6H_{14}O$ та 30 об. %
 етанолу C_2H_6O .

Розв'язання

1. Визначаємо параметри компонентів суміші за
 довідником [7]. Для зручності будуюмо таблицю:

№	Компонент суміші	Вміст, об. %	Молярна маса	$t_{\text{кип.}}^{\circ C}$	Густина ρ , $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$	$t_{\text{сп(з.т.)}}^{\circ C}$
1	гексиловий спирт $C_6H_{14}O$	70	102	155,7	815,3	60
2	етиловий спирт C_2H_6O	30	46	78,5	785	13

2. Розраховуємо мольні частки компонентів суміші
 за формулою (3.33):

$$r_{\mu_{C_6H_{14}O}} = \frac{\frac{70 \cdot 815}{102}}{\frac{70 \cdot 815}{102} + \frac{30 \cdot 785}{46}} = 0,52;$$

$$r_{\mu_{C_2H_6O}} = \frac{\frac{30 \cdot 785}{46}}{\frac{70 \cdot 815}{102} + \frac{30 \cdot 785}{46}} = 0,48.$$

3. Розраховуємо температуру спалаху суміші $t_{\text{сп сум}}$
 методом послідовних наближень за формулою (3.60).

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

3.1. Через те що теплоти випаровування компонентів суміші не відомі, співвідношення $\frac{\Delta H_{\text{вип}i}}{R}$ для і-го компонента можна розрахувати за інтерполяційною формулою:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta H_{\text{вип}C_6H_{14}O}}{R} &= -2918,6 + 19,6(t_{\text{кип}1} + 273) =, \\ &= -2918,6 + 19,6(155,7 + 273) = 5483,92 \text{ К};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\Delta H_{\text{вип}C_2H_6O}}{R} &= -2918,6 + 19,6(t_{\text{кип}2} + 273) = \\ &= -2918,6 + 19,6(78,5 + 273) = 3970 \text{ К}.\end{aligned}$$

3.2. Приймаємо температуру спалаху суміші у першому наближенні $t_{\text{сп}1} = 30^\circ\text{C}$, оскільки температура спалаху компонентів суміші становить 16°C та 60°C . Розраховуємо суму в лівій частині рівняння (3.60) у першому наближенні:

$$\begin{aligned}&0,48 \exp \left[3970,8 \left(\frac{1}{16 + 273} - \frac{1}{30 + 273} \right) \right] + \\ &+ 0,52 \exp \left[5483,9 \left(\frac{1}{60 + 273} - \frac{1}{30 + 273} \right) \right] = \\ &= 0,902 + 0,103 = 1,005 > 1.\end{aligned}$$

Оскільки у першому наближенні сума в лівій частині рівняння виявилася більшою за “1”, приймаємо у другому

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів
 наближенні $t_{сп2} = 25^{\circ}\text{C}$ та повторюємо розрахунок:

$$\begin{aligned}
 & 0,48 \cdot \exp\left[3970,8\left(\frac{1}{16 + 273} - \frac{1}{25 + 273}\right)\right] + \\
 & + 0,52 \cdot \exp\left[5483,9\left(\frac{1}{60 + 273} - \frac{1}{25 + 273}\right)\right] = \\
 & = 0,727 + 0,075 = 0,802 < 1.
 \end{aligned}$$

3.3. Розраховуємо температуру спалаху суміші рідин за методом лінійної інтерполяції:

$$\Sigma = 1 \cdot \begin{matrix} \cdot \cdot \cdot \Sigma_1 = 1,005, & t_{сп1} = 30^{\circ}\text{C} \cdot \cdot \cdot \\ \cdot \cdot \cdot \Sigma_2 = 0,802, & t_{сп2} = 25^{\circ}\text{C} \cdot \cdot \cdot \end{matrix} \cdot t_{спсум} = ?;$$

$$t_{нсум} = 30 + \frac{(25 - 30)(1 - 1,005)}{(0,802 - 1,005)} = 29,9^{\circ}\text{C}.$$

Висновок: суміш, яка складається з 70 % об. гексилового спирту та 30 % об. етилового спирту, має температуру спалаху в закритому тиглі $29,9^{\circ}\text{C}$.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати безпечну температуру експлуатації суміші рідин, яка складається з 20 об. % ацетону, 30 об. % бутанолу та 50 об. % дибутилового ефіру.

Розв'язання

1. Визначаємо параметри компонентів суміші за

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин
 довідником [7]. Для зручності складаємо таблицю:

Компонент суміші	Параметри компонентів суміші					
	$t_{сп(з.т.)}$, °C	густина, кг·м ⁻³	μ , кг·кмоль ⁻¹	константи Антуана		
				A	B	C _a
ацетон	-9	790,8	58,08	6,3755	1281,7	273,1
бутанол	41	809,8	47,02	8,7223	2664,7	279,6
дибутиловий ефір	25	764,6	130,2	6,4403	1648,4	230

2. Розраховуємо мольні частки компонентів суміші за формулою (3.33):

$$r_{\mu_{C_3H_6O}} = \frac{\frac{20 \cdot 790,8}{58,1}}{\frac{20 \cdot 790,8}{58,1} + \frac{30 \cdot 809,8}{47} + \frac{50 \cdot 764,4}{130,2}} = 0,252;$$

$$r_{\mu_{C_4H_{10}O}} = \frac{\frac{30 \cdot 809,8}{47}}{\frac{20 \cdot 790,8}{58,1} + \frac{30 \cdot 809,8}{47} + \frac{50 \cdot 764,4}{130,2}} = 0,477;$$

$$r_{\mu_{C_8H_{16}O}} = \frac{\frac{50 \cdot 764,4}{130,2}}{\frac{20 \cdot 790,8}{58,1} + \frac{30 \cdot 809,8}{47} + \frac{50 \cdot 764,4}{130,2}} = 0,271.$$

3. Розраховуємо $t_{сп_{сум}}$ методом послідовного наближення за формулою (3.61).

3.1. В першому наближенні приймаємо $t_{сп_1} = 20$ °C, оскільки значення температури спалаху компонентів суміші знаходиться в межах від мінус 9 до 41 °C.

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

Проводимо розрахунок за формулою (3.61):

$$\begin{aligned} & 0,252 \frac{1642 - (-9) - 273,1}{1642 - 20 - 273,1} 10^{\frac{1281,7(20 - (-9))}{(20 + 273,1)((-9) + 273,1)}} + \\ & + 0,477 \frac{1642 - 41 - 279,6}{1642 - 20 - 279,6} 10^{\frac{2664,7(20 - 41)}{(20 + 279,6)(41 + 279,6)}} + \\ & + 0,271 \frac{1642 - 25 - 230}{1642 - 20 - 230} 10^{\frac{1648,4(20 - 25)}{(20 + 230)(25 + 230)}} = \\ & = 0,778 + 0,123 + 0,29 = 1,1 > 1. \end{aligned}$$

3.2. Оскільки у першому наближенні сума у лівій частині рівняння виявилася більшою за “1”, розрахунок у другому наближенні проводять за температури $t_{\text{ст}2} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$\begin{aligned} & 0,252 \frac{1642 - (-9) - 273,1}{1642 - 15 - 273,1} 10^{\frac{1281,7(15 - (-9))}{(15 + 273,1)((-9) + 273,1)}} + \\ & + 0,477 \frac{1642 - 41 - 279,6}{1642 - 15 - 279,6} 10^{\frac{2664,7(15 - 41)}{(15 + 279,6)(41 + 279,6)}} + \\ & + 0,271 \frac{1642 - 25 - 230}{1642 - 15 - 230} 10^{\frac{1648,4(15 - 25)}{(15 + 230)(25 + 230)}} = \\ & = 0,651 + 0,087 + 0,147 = 0,885 < 1. \end{aligned}$$

3.3. Оскільки при розрахунку у першому

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

наближенні сума у лівій частині рівняння виявилася більшою за “1”, а у другому наближенні – меншою за “1”, можна провести розрахунок температури спалаху суміші за методом лінійної інтерполяції:

$$\Sigma = 1 \cdot \begin{cases} \cdot \Sigma_1 = 1,1, & t_{\text{сп}_1} = 20^\circ \text{C} \cdot \\ \cdot \Sigma_2 = 0,885, & t_{\text{сп}_2} = 15^\circ \text{C} \cdot \end{cases} \cdot t_{\text{сп}_{\text{сум}}} = ?$$

$$t_{\text{сп}_{\text{сум}}} = 20 + \frac{(15 - 20)(1 - 1,1)}{(0,885 - 1,1)} = 17,7^\circ \text{C}.$$

4. Розраховуємо безпечну температуру експлуатації суміші рідин за формулою (3.50):

$$t_{\text{безпід}} = 17,7 - 35 = -17,3^\circ \text{C}.$$

Висновок: розрахункове значення температури спалаху суміші рідин, що складається з 20 % об. ацетону, 30 % об. бутанолу та 50 % об. дибутилового ефіру, дорівнює 17,7 °С. Безпечна температура експлуатації суміші рідин не повинна перевищувати мінус 17,3 °С.

Методика розрахунку температури спалаху суміші рідин, які належать до одного гомологічного ряду

1. Визначити характеристики компонентів суміші за довідниками [7], [9]: молярну масу, густину, температуру спалаху легкокиплячого компонента (якщо даних немає, то розраховують).

2. Визначити за довідником [7] температури спалаху гомологів гомологічного ряду, до якого належать горючі

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів
компоненти суміші рідин. Знайти середнє значення гомологічної різниці Δ за температурою спалаху.

3. Розрахувати масову частку висококиплячого компонента, якщо склад суміші заданий в об'ємних відсотках, за формулою:

$$g = \frac{\varphi_{\text{в}} \rho_{\text{в}}}{\varphi_{\text{в}} \rho_{\text{в}} + \varphi_{\text{л}} \rho_{\text{л}}},$$

де $\varphi_{\text{в}}$, $\varphi_{\text{л}}$ – відповідно об'ємна концентрація висококиплячого та легкокиплячого компонентів, %;

$\rho_{\text{в}}$, $\rho_{\text{л}}$ – відповідно густина висококиплячого та легкокиплячого компонентів, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

4. Знайти різницю m між числом атомів карбону компонентів суміші.

5. Розрахувати температуру спалаху бінарної суміші рідин одного гомологічного ряду за формулою (3.62).

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати температуру спалаху в закритому тиглі суміші рідин, яка складається з 70 об. % гептанолу $\text{C}_7\text{H}_{16}\text{O}$ та 30 об. % бутанолу $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$.

Розв'язання

1. Визначаємо за довідником [7] параметри компонентів суміші рідин.

№	Компонент суміші	Вміст, об. %	Молярна маса	$t_{\text{кип}}^{\circ}\text{C}$	Густина ρ , $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$	$t_{\text{сп}}^{\text{(з.т.)}^{\circ}\text{C}}$
1	гептиловий спирт	70	116	176	816,7	116
2	бутиловий спирт	30	74	117	805,5	74

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

2. Знаходимо гомологічну різницю спиртів за температурою спалаху.

Спирт	Формула	Температура спалаху, °С	Δ
етиловий	C_2H_6O	13	–
пропіловий	C_3H_8O	23	10
бутиловий	$C_4H_{10}O$	35	12
пентиловий	$C_5H_{12}O$	48	13
гексиловий	$C_6H_{14}O$	60	12
гептиловий	$C_7H_{16}O$	74	14
октиловий	$C_8H_{18}O$	86	12

У середньому $\Delta = 12$ °С.

3. Розраховуємо масову частку висококиплячого компонента. Через те що температура кипіння гептанолу є більшою, ніж у бутанолу, за висококиплячий компонент приймаємо гептиловий спирт:

$$g = \frac{70 \cdot 816,7}{70 \cdot 816,7 + 30 \cdot 805,5} = 0,70.$$

4. Розраховуємо різницю m між числом атомів карбону в молекулах гептанолу $C_7H_{16}O$ та бутанолу $C_4H_{10}O$:

$$m = 7 - 4 = 3.$$

5. Розраховуємо температуру спалаху заданої бінарної суміші рідин за формулою (3.62).

Через те що масова частка гептилового спирту

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

$g \geq 0,5$, значення $X = 2 \cdot 0,7 - 1 = 0,4$.

$$t_{\text{сп, сум}} = 74 + 12(0,7 + (3 - 1)0,4^3) = 84 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Висновок: розрахункове значення температури спалаху суміші, яка складається з 70 об. % гептанолу та 30 об. % бутанолу, дорівнює 84 °С.

Методика орієнтовного розрахунку температури спалаху в закритому тиглі бінарної суміші взаєморозчинних горючих рідин

1. Визначити температури спалаху (з.т.) обох компонентів бінарної суміші за довідником [7] або розрахунком (формули (3.51 – 3.57)). Рідину з більшою температурою спалаху прийняти за рідину А.

2. Визначити коефіцієнт f відповідно до відсоткового вмісту компонентів суміші за таблицею 3.14.

3. Розрахувати температуру спалаху в закритому тиглі суміші взаєморозчинних горючих рідин за формулою (3.63).

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати температуру спалаху суміші рідин, яка складається з 35 % мас. етилформіату $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$ і 65 % мас. гексилформіату $\text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}_2$. Визначити клас пожежної небезпеки такої суміші.

Розв'язання

1. Визначаємо температуру спалаху в закритому тиглі кожного компонента суміші за довідником [7]:

$$t_{\text{сп } \text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2} = -20 \text{ }^\circ\text{C}, \quad t_{\text{сп } \text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}_2} = 48 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Оскільки гексилформіат має більшу температуру

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

спалаху, приймаємо його за компонент А.

2. Визначаємо коефіцієнт f за таблицею 3.14: оскільки вміст компонента А дорівнює 65 % мас., $f = 30$.

3. Розраховуємо температуру спалаху в закритому тиглі суміші за формулою (3.63):

$$t_{\text{сп сум}} = \frac{65 \cdot 48 + 35 \cdot (-20) - 30(48 - (-20))}{100} = 3,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Висновок: температура спалаху суміші рідин, яка складається з 35 % мас. етилформиату $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$ і 65 % мас. гексилформиату $\text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}_2$, дорівнює $3,8 \text{ } ^\circ\text{C}$. Оскільки температура спалаху (з.т.) даної суміші рідин є меншою за $28 \text{ } ^\circ\text{C}$, суміш відноситься до особливо небезпечних легкозаймистих рідин.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Для речовин, представлених у таблиці, розрахувати парціальний тиск насиченої пари за наведених у таблиці умов з використанням

- а) формули Антуана;
- б) методу лінійної інтерполяції.

№	Горюча речовина		Температура, °С	P _{заг} , кПа
	назва	формула		
1	метилацетат	C ₃ H ₆ O ₂	20	96
2	пропілциклогексан	C ₉ H ₁₈	25	98
3	бензол	C ₆ H ₆	90	98
4	кумол	C ₉ H ₁₂	85	99
5	пропанол	C ₃ H ₈ O	50	100
6	толуол	C ₇ H ₈	100	101
7	<i>m</i> -ксилол	C ₈ H ₁₀	80	101,3
8	ундеканол	C ₁₁ H ₂₄ O	45	102
9	аміловий спирт	C ₅ H ₁₂ O	40	103
10	бензиловий спирт	C ₇ H ₈ O	135	104
11	ацетон	C ₃ H ₆ O	-15	105
12	етилбензол	C ₈ H ₁₀	70	96
13	<i>n</i> -крезол	C ₇ H ₉ O	60	97
14	ізопропенілбензол	C ₉ H ₁₀	150	98
15	бутилформіат	C ₅ H ₁₀ O ₂	30	99
16	пропаналь	C ₃ H ₆ O	-25	100
17	декан	C ₁₀ H ₂₂	70	101
18	діоксан	C ₄ H ₈ O ₂	10	101,3
19	оцтова кислота	C ₂ H ₄ O ₂	15	102
20	діетилкетон	C ₅ H ₁₀ O	5	103

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

2. Для речовин, представлених у таблиці, розрахувати концентрацію насиченої пари за наведених у таблиці умов та визначити ступінь її пожежовибухонебезпеки.

№	Горюча речовина		Температура, °С	P _{зар} , кПа
	назва	формула		
1	акрилова кислота	C ₃ H ₄ O ₂	20	96
2	ацетонітрил	C ₂ H ₃ N	-15	104
3	бутанон	C ₄ H ₈ O	-5	105
4	ізобутилацетат	C ₆ H ₁₂ O ₂	10	96,5
5	бутилфенол	C ₁₀ H ₁₄ O	30	97
6	валеріанова кислота	C ₅ H ₁₀ O ₂	15	97
7	гептан	C ₇ H ₁₆	25	97,5
8	діацетоновий спирт	C ₆ H ₁₂ O ₂	35	104,5
9	дибутиловий ефір	C ₈ H ₁₈ O	45	103,5
10	ксилідин	C ₈ H ₁₁ N	55	102,5
11	метилпропіонат	C ₄ H ₈ O ₂	65	101,5
12	мурашина кислота	CH ₂ O ₂	75	100,5
13	нонан	C ₉ H ₂₀	85	99,5
14	октанова кислота	C ₈ H ₁₆ O ₂	95	98,5
15	октиловий спирт	C ₈ H ₁₈ O	105	98
16	пропіленгліколь	C ₃ H ₈ O ₂	115	99
17	пропілформіат	C ₄ H ₈ O ₂	40	100
18	тетраметилпентан	C ₉ H ₂₀	100	101
19	тридекан	C ₁₃ H ₂₈	145	102
20	етилциклогексан	C ₈ H ₁₆	-25	103
21	метилацетат	C ₃ H ₆ O ₂	20	96
22	дибутилкетон	C ₉ H ₁₈ O	20	104
23	метилпропілкетон	C ₅ H ₁₀ O	-5	105
24	циклогексан	C ₆ H ₁₂	15	98
25	ксилол	C ₈ H ₁₀	30	100

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

3. Для сумішей горючих рідин, представлених у таблиці, розрахувати фактичну концентрацію насиченої пари та визначити ступінь її пожежовибухонебезпеки за наведених у таблиці умов.

№	Горюча речовина		Вміст компонентів	t ₀ , °C	P _{заг} , кПа
	назва	формула			
1	метилацетат	C ₃ H ₆ O ₂	20 % мас.	20	96
	етилбензол	C ₈ H ₁₀	80 % мас.		
2	бензол	C ₆ H ₆	30 % об.	90	98
	кумол	C ₉ H ₁₂	70 % об.		
3	пропанол	C ₃ H ₈ O	40 % мас.	50	100
	толуол	C ₇ H ₈	60 % мас.		
4	бензол	C ₆ H ₆	50 % об.	25	101
	толуол	C ₇ H ₈	50 % об.		
5	ксилол	C ₈ H ₁₀	10 % об.	80	101
	метилбутилкетон	C ₆ H ₁₂ O	20 % об.		
	аміловий спирт	C ₅ H ₁₂ O	70 % об.		
6	бензиловий спирт	C ₇ H ₈ O	20 % мас.	35	104
	ацетон	C ₃ H ₆ O	30 % мас.		
	етилбензол	C ₈ H ₁₀	50 % мас.		
7	<i>n</i> -крезол	C ₇ H ₉ O	30 % об.	60	97
	ізопропілбензол	C ₉ H ₁₂	40 % об.		
	бутилформіат	C ₅ H ₁₀ O ₂	30 % об.		
8	пропаналь	C ₃ H ₆ O	40 % об.	25	101
	декан	C ₁₀ H ₂₂	50 % об.		
	діоксан	C ₄ H ₈ O ₂	10 % об.		
9	оцтова кислота	C ₂ H ₄ O ₂	5 % мас.	15	102
	діетилкетон	C ₅ H ₁₀ O	10 % мас.		
	дибутилкетон	C ₉ H ₁₈ O	85 % мас.		
10	метилпропілкетон	C ₅ H ₁₀ O	15 % об.	5	105
	анілін	C ₆ H ₇ N	30 % об.		
	бутанон	C ₄ H ₈ O	55 % об.		

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

6. Для речовин, представлених у таблиці, розрахувати нижню та верхню температурні межі поширення полум'я та визначити ступінь пожежовибухонебезпеки рідини за наведених у таблиці умов. Розрахунок провести із використанням:

- а) рівняння Антуана;
- б) методу лінійної інтерполяції;
- в) констант гомологічного ряду;
- г) за хімічною будовою.

№	Горюча речовина		Температура, °C	P _{заг} , кПа
	назва	формула		
1	метилацетат	C ₃ H ₆ O ₂	20	96
2	циклогексан	C ₆ H ₁₂	10	97
3	бензол	C ₆ H ₆	90	98
4	кумол	C ₉ H ₁₂	85	99
5	пропанол	C ₃ H ₈ O	50	100
6	толуол	C ₇ H ₈	100	101
7	ксилол	C ₈ H ₁₀	80	101,3
8	метилбутилкетон	C ₆ H ₁₂ O	45	102
9	аміловий спирт	C ₅ H ₁₂ O	40	103
10	бензиловий спирт	C ₇ H ₈ O	35	104
11	етилбензол	C ₈ H ₁₀	170	96
12	n-крезол	C ₇ H ₉ O	60	97
13	ізопропілбензол	C ₉ H ₁₂	150	98
14	бутилформіат	C ₅ H ₁₀ O ₂	30	99
15	пропаналь	C ₃ H ₆ O	25	100
16	декан	C ₁₀ H ₂₂	70	101
17	діоксан	C ₄ H ₈ O ₂	10	101,3
18	оцтова кислота	C ₂ H ₄ O ₂	15	102
19	діетилкетон	C ₅ H ₁₀ O	5	103
20	дибутилкетон	C ₉ H ₁₈ O	20	104

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

5*. Розчин складається із 30 % (мольних) пентану C_5H_{12} і 70 % (мольних) гексану C_6H_{14} . Розрахувати об'ємні й масові концентраційні межі поширення полум'я пари даної суміші за температур 0, 10, 20 °С. Вважати рідини взаєморозчинними.

6*. Розрахувати об'ємні і масові концентраційні межі поширення полум'я пари, що утворилася під час випаровування суміші рівних об'ємів пропілового і бутилового спиртів за нормальних умов. Густина пропілового спирту $804,3 \text{ кг}\cdot\text{м}^3$, бутилового спирту $810,4 \text{ кг}\cdot\text{м}^3$.

7. Для речовин, представлених у таблиці, розрахувати безпечні робочі температури при використанні даної речовини у закритому обладнанні.

№	Речовина		№	Речовина	
	назва	формула		назва	формула
1	стирол	C_8H_8	16	метилацетат	$C_3H_6O_2$
2	метилформіат	$C_2H_4O_2$	17	метанол	CH_4O
3	гексадекан	$C_{16}H_{34}$	18	діетиламін	$C_4H_{11}N$
4	бутаналь	C_4H_8O	19	ксилідин	$C_8H_{11}N$
5	метиламінол	$C_6H_{14}O$	20	етанол	C_2H_6O
6	пірол	C_4H_5N	21	метилацетат	$C_3H_6O_2$
7	декан	$C_{10}H_{22}$	22	метилгексан	C_7H_{16}
8	бутанон	C_4H_8O	23	пропаналь	C_3H_6O
9	бутанол	$C_4H_{10}O$	24	пропіламін	C_3H_9N
10	октанол -2	$C_8H_{18}O$	25	пропілформіат	$C_4H_8O_2$
11	хлорбензол	C_6H_5Cl	26	бензиловий спирт	C_7H_8O
12	анілін	C_6H_7N	27	піколін	C_6H_7N
13	бутилацетат	$C_6H_{12}O_2$	28	тетрагідрофуран	C_4H_8O
14	гліцерин	$C_3H_8O_3$	29	диметилформамід	C_3H_7ON
15	діоксан	$C_4H_8O_2$	30	метилпропілкетон	$C_5H_{10}O$

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

8. Для сумішей горючих рідин, представлених у таблиці, визначити безпечні робочі температури для використання їх у закритому обладнанні з використанням констант Антуана.

№	Горюча речовина	$P_{\text{заг}},$ кПа	№	Горюча речовина	$P_{\text{заг}},$ кПа
1	бензин авіаційний Б-70	96	11	уайт-спірит	96
2	бензин А-72 зимовий	97	12	олива трансформаторна	97
3	бензин АІ-93 літній	98	13	олива АМТ-300	98
4	бензин АІ-93 зимовий	99	14	олива АМТ-300Т	99
5	дизельне паливо "З"	100	15	розчинник Р-4	100
6	дизельне паливо "Л"	101	16	розчинник Р-5	101
7	керосин КО-20	101	17	розчинник Р-12	101
8	керосин КО-22	102	18	розчинник РМЛ	102
9	керосин КО-25	103	19	розчинник РМЛ-218	103
10	ксилол суміш ізомерів	104	20	розчинник РМЛ-315	104

9*. Цистерна ємністю 10 м^3 знаходиться у приміщенні об'ємом 150 м^3 . На половину об'єму цистерна заповнена ацетоном. Визначити концентрацію пари ацетону у повітрі приміщення після наповнення цистерни на 90 %. Температура середовища дорівнює $15 \text{ }^\circ\text{C}$, тиск – $101,3 \text{ кПа}$.

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

10. Для сумішей горючих рідин, представлених у таблиці, розрахувати нижню та верхню ТМПП та визначити ступінь пожежовибухонебезпеки за наведених у таблиці умов. Розрахунок провести із використанням:

- а) теплоти випаровування;
- б) констант Антуана;
- в) тиску насиченої пари.

№	Горюча речовина		Температура, °C	P _{заг.} , кПа
	назва	вміст		
1	метилацетат C ₃ H ₆ O ₂	20 % мас.	20	96
	циклогексан C ₆ H ₁₂	80 % мас.		
2	бутанова кислота C ₄ H ₈ O ₂	25 % об.	30	97
	октаналь C ₈ H ₁₆ O	75 % об.		
3	бензол C ₆ H ₆	30 % мас.	90	98
	кумол C ₉ H ₁₂	70 % мас.		
4	пропанол C ₃ H ₈ O	40 % об.	50	100
	толуол C ₇ H ₈	60 % об.		
5	метилбутилкетон C ₆ H ₁₂ O	25 % об.	80	101
	аміловий спирт C ₅ H ₁₂ O	75 % об.		
6	бензиловий спирт C ₇ H ₈ O	20 % мас.	35	104
	ацетон C ₃ H ₆ O	30 % мас.		
	етилбензол C ₈ H ₁₀	50 % мас.		
7	<i>n</i> -метилфенол C ₇ H ₉ O	30 % об.	60	97
	ізопропілбензол C ₉ H ₁₂	40 % об.		
	бутилформіат C ₅ H ₁₀ O ₂	30 % об.		
8	пропаналь C ₃ H ₆ O	40 % об.	25	101
	декан C ₁₀ H ₂₂	50 % об.		
	діоксан C ₄ H ₈ O ₂	10 % об.		
9	оцтова кислота C ₂ H ₄ O ₂	5 % мас.	15	102
	діетилкетон C ₅ H ₁₀ O	10 % мас.		
	дібутилкетон C ₉ H ₁₈ O	85 % мас.		
10	метилпропілкетон C ₅ H ₁₀ O	15 % об.	5	105
	анілін C ₆ H ₇ N	30 % об.		
	бутанон C ₄ H ₈ O	55 % об.		

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

11. Для сумішей горючих та негорючих рідин, представлених у таблиці, розрахувати нижню температуру межі поширення полум'я та визначити, за яких температур концентрація насиченої пари, що утворюється над сумішшю рідин, буде безпечною.

№	Склад суміші		
	компонент суміші	формула	вміст, мас. %
1	бутанол	$C_4H_{10}O$	60
	метанол	CH_4O	35
	вода	H_2O	5
2	етанол	C_2H_6O	60
	пропанол	C_3H_8O	32
	вода	H_2O	8
3	діоксан	$C_4H_8O_2$	32
	етанол	C_2H_6O	62
	вода	H_2O	6
4	діетиловий ефір	$C_4H_{16}O$	25
	діетилкетон	$C_5H_{10}O$	73
	вода	H_2O	2
5	бензол	C_6H_6	45
	толуол	C_7H_8	53
	тетрахлорметан	CCl_4	2
6	етилбензол	C_8H_{10}	70
	толуол	C_7H_8	27
	тетрахлорметан	CCl_4	3
7	гексан	C_6H_{14}	60
	гептан	C_7H_{16}	32
	тетрахлорметан	CCl_4	8
8	декан	$C_{10}H_{22}$	45
	гексан	C_6H_{14}	50
	тетрахлорметан	CCl_4	5
9	ацетон	C_3H_6O	70
	вода	H_2O	30
10	діетиловий ефір	$C_4H_{16}O$	97
	тетрахлорметан	CCl_4	3

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

12. Для горючих рідин, представлених у таблиці, розрахувати

12.1) температуру спалаху в закритому тиглі, визначити клас пожежної небезпеки та безпечні температури експлуатації з використанням

а) формули Еллея;

б) структури горючої речовини;

в) кореляційного зв'язку з нижньою температурною межею поширення полум'я;

г) констант гомологічного ряду.

12.2) температуру спалаху у відкритому тиглі та температуру займання.

№	Речовина	№	Речовина
1	ацетон C_3H_6O	21	стирол C_8H_8
2	анілін C_6H_7N	22	тетрагідрофуран C_4H_8O
3	бензол C_6H_6	23	тетраметилбензол $C_{10}H_{14}$
4	бутанол $C_4H_{10}O$	24	тетраметилгептан $C_{11}H_{24}$
5	бутилформіат $C_5H_{10}O_2$	25	тетраметилпентан C_9H_{20}
6	декан $C_{10}H_{22}$	26	пропілбутират $C_7H_{14}O_2$
7	діетилкетон $C_5H_{10}O$	27	тридекан $C_{13}H_{28}$
8	валеролактон $C_5H_8O_2$	28	триметилбензол C_9H_{12}
9	гексадекан $C_{16}H_{34}$	29	триметилгексан C_9H_{20}
10	крезол C_7H_9O	30	оцтова кислота $C_2H_4O_2$
11	етанол C_2H_6O	31	октанова кислота $C_8H_{16}O_2$
12	метанол CH_4O	32	оцтовий ангідрид $C_4H_6O_3$
13	метилбутират $C_5H_{10}O_2$	33	ундеканол $C_{11}H_{24}O$
14	нонан C_9H_{20}	34	циклогексанол $C_6H_{10}O$
15	октанол $C_8H_{18}O$	35	циклогексан C_6H_{12}
16	пентаналь $C_5H_{10}O$	36	пропіоновий ангідрид $C_6H_{10}O_3$
17	пропаналь C_3H_6O	37	етилацетат C_4H_8O
18	пропанол C_3H_8O	38	етилбензол C_8H_{10}
19	пропілбензол C_9H_{12}	39	етилбутират $C_6H_{12}O_2$
20	толуол C_7H_8	40	етилтолуол C_9H_{12}

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

13. Для горючих рідин, представлених у таблиці, розрахувати за формулою Блінова наступні параметри:

- а) температуру займання;
- б) температуру спалаху у закритому тиглі;
- в) температуру спалаху у відкритому тиглі.

№	Назва	Формула	№	Назва	Формула
1	ацетон	C_3H_6O	11	метилформіат	$C_2H_4O_2$
2	етиловий спирт	C_2H_6O	12	бутилфенол	$C_{10}H_{14}O$
3	декан	$C_{10}H_{22}$	13	толуол	C_7H_8
4	бутанол	$C_4H_{10}O$	14	бутилпропіонат	$C_7H_{14}O_2$
5	мезитилен	C_9H_{12}	15	етилацетат	$C_4H_8O_2$
6	гептан	C_7H_{16}	16	етилбензол	C_8H_{10}
7	метиламінол	$C_6H_{14}O$	17	етиленгліколь	$C_2H_6O_2$
8	кумол	C_9H_{12}	18	пірол	C_4H_5N
9	піридин	C_5H_5N	19	діоксан	$C_4H_8O_2$
10	дибутиловий ефір	$C_8H_{18}O$	20	тетрагідрофуран	C_4H_8O

14. Для галогенорганічних і елементоорганічних сполук, представлених у таблиці, розрахувати температуру спалаху, визначити клас пожежної небезпеки та безпечні температури експлуатації з використанням

- а) формули Еллея;
- б) емпіричних констант за формулою (3.55).

№	Речовина	№	Речовина
1	бромбензол C_6H_5Br	6	хлорпропанол C_3H_7OCl
2	бутанонітрил C_4H_7N	7	хлорбутан C_4H_9Cl
3	дітиламін $C_4H_{11}N$	8	хлорпропан C_3H_7Cl
4	хлоретилацетат $C_4H_7O_2Cl$	9	піридилетанол C_7H_9ON
5	вінілтрихлорсилан $C_2H_3Cl_3Si$	10	диметоксихлорбензол $C_8H_9O_2Cl$

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

15. Для сумішей горючих рідин, представлених у таблиці, розрахувати температуру спалаху та визначити клас пожежної небезпеки з використанням

а) молярної теплоти випаровування компонентів суміші (розрахунки проводити за формулою (3.60));

б) констант Антуана (розрахунки проводити за формулою (3.61)).

№ суміші	Склад горючої суміші		
	компонент суміші	формула	вміст
1	ацетон	C_3H_6O	25 % об.
	циклогексан	C_6H_{12}	75 % об.
2	метилетилкетон	C_4H_8O	30 % мас.
	октаналь	$C_8H_{16}O$	70 % мас.
3	бензол	C_6H_6	40 % об.
	кумол	C_9H_{12}	60 % об.
4	пропанол	C_3H_8O	20 % мас.
	толуол	C_7H_8	80 % мас.
5	ксилол	C_8H_{10}	45 % об.
	бутанон	C_4H_8O	55 % об.
6	диметилловий ефір	C_2H_4O	35 % мас.
	метилетилловий ефір	C_3H_8O	65 % мас.
7	гептанол	$C_7H_{16}O$	40 % об.
	етилбутиловий ефір	$C_6H_{14}O$	60 % об.
8	етилбензол	C_8H_{10}	40 % об.
	ізопропілбензол	C_9H_{12}	50 % об.
	толуол	C_7H_8	10 % об.
9	ацетон	C_3H_6O	5 % мас.
	дибутиловий ефір	$C_8H_{18}O$	10 % мас.
	метанол	CH_4O	85 % мас.
10	пропаналь	C_3H_6O	15 % об.
	дигексилловий ефір	$C_{12}H_{26}O$	30 % об.
	диетилкетон	C_3H_6O	55 % об.

Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпеки рідин

16. Для представлених у таблиці сумішей горючих взаєморозчинних рідин, що належать до одного гомологічного ряду, розрахувати температуру спалаху за формулою (3.62) та визначити клас пожежної небезпеки.

№	Суміш рідин	Вміст, мас. %	№	Суміш рідин	Вміст, мас. %
1	метанол C_1H_4O	70	11	етилацетат $C_4H_8O_2$	60
	гексанол $C_6H_{12}O$	30		пропілацетат $C_5H_{10}O_2$	40
2	амінол $C_5H_{12}O$	45	12	амілбутират $C_9H_{18}O_2$	30
	нонанол $C_9H_{20}O$	55		етилбутират $C_6H_{12}O_2$	70
3	етанол C_2H_6O	35	13	пропілбутират $C_7H_{14}O_2$	90
	октанол $C_8H_{18}O$	65		амілбутират $C_9H_{18}O_2$	10
4	метанол C_1H_4O	45	14	етилбутират $C_6H_{12}O_2$	60
	гептанол $C_7H_{16}O$	55		пропілбутират $C_7H_{14}O_2$	40
5	амінол $C_5H_{12}O$	45	15	бутилбутират $C_8H_{16}O_2$	45
	ундеканол $C_{11}H_{24}O$	55		етилбутират $C_6H_{12}O_2$	55
6	етанол C_2H_6O	35	16	етилпропіонат $C_5H_{10}O_2$	70
	пропанол C_3H_8O	65		амілпропіонат $C_8H_{16}O_2$	30
7	бутанол $C_4H_{10}O$	70	17	метилпропіонат $C_4H_8O_2$	80
	деканол $C_{10}H_{22}O$	30		бутилпропіонат $C_7H_{14}O_2$	20
8	октан C_8H_{18}	30	18	етилформіат $C_3H_6O_2$	75
	декан $C_{10}H_{22}$	70		бутилформіат $C_5H_{10}O_2$	25
9	етилацетат $C_4H_8O_2$	40	19	пропілформіат $C_4H_8O_2$	15
	амілацетат $C_7H_{14}O_2$	60		метилформіат $C_2H_4O_2$	85
10	гексан C_6H_{14}	25	20	бутилформіат $C_5H_{10}O_2$	40
	октан C_8H_{18}	75		метилформіат $C_2H_4O_2$	60

17*. Розрахувати об'єм вибухової суміші, що утворилась із 200 л насиченої пари бензину за температури 20 °С і тиску 101,3 кПа. Тиск насиченої пари бензину за даної температури дорівнює 31,7 кПа. Нижня концентраційна межа поширення полум'я бензину за даної температури дорівнює 60 г·м⁻³.

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

18. Для бінарних сумішей горючих рідин, представлених у таблиці, розрахувати нижню температурну межу та температуру спалаху в закритому тиглі за апроксимаційною формулою (3.49, 3.63) та визначити клас пожежної небезпеки.

№	Склад суміші		
	компонент суміші	формула	вміст, мас. %
1	бутанол	$C_4H_{10}O$	70
	циклогексан	C_6H_{12}	30
2	бутанова кислота	$C_4H_8O_2$	75
	етанол	C_2H_6O	25
3	бензол	C_6H_6	40
	кумол	C_9H_{12}	60
4	діетиловий ефір	$C_4H_{16}O$	45
	толуол	C_7H_8	55
5	ксилол	C_8H_{10}	10
	метанол	CH_4O	90
6	етилформіат	$C_3H_6O_2$	75
	октанол	$C_8H_{18}O$	25
7	амілацетат	$C_7H_{14}O_2$	20
	метилформіат	$C_2H_4O_2$	80
8	ацетон	C_3H_6O	15
	діоксан	$C_4H_8O_2$	85
9	анілін	C_6H_7N	35
	бензол	C_6H_6	65
10	метиламінол	$C_6H_{14}O$	5
	пропаналь	C_3H_6O	95

19*. Після зливання бензолу з ємності об'ємом 300 л залишилась насичена пара за температури 20 °С. Розрахувати об'єм вибухонебезпечної газової суміші, що може утворитись із заданої кількості насиченої пари за атмосферного тиску 101 кПа. Нижня концентраційна межа пари бензолу за температури 20 °С дорівнює 42,2 г·м⁻³.

РОЗДІЛ 4. ПАРАМЕТРИ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖІ

Пожежа – це позарегламентний процес знищування або пошкодження вогнем майна, під час якого виникають чинники, небезпечні для живих істот і довкілля [36].

Під час пожежі одночасно відбуваються різноманітні складні фізико-хімічні процеси й явища, що стосуються не тільки самого горіння речовин і матеріалів, але і процесів, які супроводжують горіння і характерні тільки для даної конкретної пожежі [15], [17].

Явища, що є постійними й обов'язковими для кожної пожежі, називають *загальними* явищами пожежі. Тільки ліквідація горіння може призвести до припинення загальних явищ. Так, для всіх пожеж характерними є такі явища:

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

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

3) *теплообмін*, який полягає у тому, що тепло, яке виділяється в зоні горіння, передається в навколишнє середовище, витрачається на нагрівання речовин, матеріалів, будівельних конструкцій, що робить можливим самостійне поширення пожежі.

Загальні явища на пожежі є основою виникнення *окремих* явищ, які носять випадковий характер і притаманні тільки конкретній пожежі.

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

Первинні та другорядні явища пожежі, що спричиняють травмування, отруєння або загибель людей, а також знищення або ушкодження матеріальних цінностей, називають **небезпечними факторами пожежі**.

До небезпечних факторів пожежі відносять:

первинні явища пожежі:

- відкритий вогонь та іскри;
- підвищену температуру навколишнього середовища і предметів;
- токсичні продукти горіння;
- дим;
- знижену концентрацію кисню в повітрі;

другорядні явища пожежі:

- падаючі частини будівельних конструкцій, агрегатів, установок;
- небезпечні фактори вибуху (ударна хвиля, теплове випромінювання);
- отруйні речовини, що можуть потрапити у навколишнє середовище із ушкодженого устаткування;
- електричний струм;
- вогнегасні речовини.

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

Зона горіння – це частина простору, в якій відбуваються процеси термічної підготовки горючих речовин (розкладання, плавлення, випаровування) і безпосередньо процес горіння. Зона горіння обмежена

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

поверхнею речовин, що горять, і фронтом полум'я дифузійного факела. При гетерогенному горінні зона горіння співпадає із поверхнею горіння. У зоні горіння виділяється все тепло пожежі та продукти повного і неповного згорання, які утворюють дисперсну систему – дим.

Зона теплового впливу – це частина простору, що прилягає до зони горіння і в межах якої відбуваються процеси теплообміну між поверхнею зони горіння і навколишніми конструкціями і речовинами. Зовнішня межа зони теплового впливу пролягає 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 критичним значенням температури газового середовища або густини теплового потоку від пожежі.

Зона задимлення – частина простору, що прилягає до зони горіння, в якій неможливе перебування людей без засобів захисту органів дихання. Зовнішню межу зони задимлення визначають за видимістю, концентрацією отруйних речовин (небезпечна для життя і здоров'я людини) або за концентрацією кисню у повітрі (менше 16 %).

Якщо у процесі розвитку пожежі виконуються дії з її гасіння, то тривалість пожежі можна поділити на три **основні періоди**:

- період вільного розвитку пожежі $\tau_{віль}$;
- період локалізації пожежі $\tau_{лок}$;
- період ліквідації пожежі $\tau_{лік}$.

Період вільного розвитку пожежі триває з моменту

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

виникнення пожежі до моменту введення перших сил та засобів для її гасіння. За цей час площа пожежі зростає, спочатку повільно, а потім більш інтенсивно.

Період локалізації пожежі – час, протягом якого створено 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 з моменту локалізації пожежі до повного припинення горіння. За цей час площа пожежі зменшується до нуля.

Зміну площі пожежі залежно від часу розвитку схематично представлено на рис. 4.1.

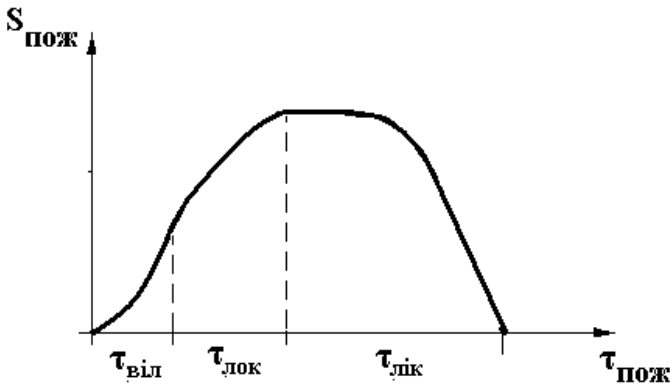


Рис. 4.1 – Зміна площі пожежі залежно від періоду розвитку пожежі

Для кращого вивчення пожеж, для розробки прийомів і засобів гасіння усі пожежі класифікують за різними ознаками на групи, класи і види.

За умовами газообміну пожежі поділяють на дві

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

великі групи:

- пожежі на відкритому просторі;
- пожежі в огороженні.

Пожежі на відкритому просторі характеризуються вільним газообміном із навколишнім середовищем, що зумовлює високу швидкість протікання процесів горіння. При цьому теплообмін здійснюється насамперед конвекцією та випромінюванням.

Пожежі в огороженні характеризуються тим, що газообмін обмежений будівельними конструкціями. При цьому відбувається накопичення тепла та диму, теплообмін здійснюється конвекцією, теплопровідністю та випромінюванням.

У кожній групі можна виділити підгрупи.

Пожежі на відкритому просторі поділяють на: окремі, суцільні, масові, вогневий шторм.

Окремі – зовнішнє горіння окремої споруди або будівлі.

Суцільні – одночасне інтенсивне горіння більшості споруд на даній ділянці.

Масові – сукупність окремих та суцільних пожеж у населених пунктах, на великих промислових підприємствах. Масові пожежі відбувалися при переході суцільних лісових пожеж у населені пункти.

Вогневий шторм – особлива форма розвитку пожежі, яка характеризується утворенням єдиного велетенського турбулентного факела з потужною конвекційною колонкою нагрітих продуктів згорання і припливом свіжого повітря зі швидкістю більше $15 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

Пожежі в огороженні можна поділити на пожежі, що регулюються вентиляцією, та пожежі, що

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

регулюються пожежною навантагою.

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

Пожежі, що регулюються пожежною навантагою (ПРН), – пожежі, які протікають за умови надлишку окисника у приміщенні, а розвиток пожежі залежить від наявності пожежної навантаги. За своїми параметрами такі пожежі наближаються до пожеж на відкритому просторі.

За ознакою зміни площі пожежі розрізняють такі типи пожеж:

пожежі, що поширюються, – це пожежі, які розвиваються з постійною зміною розмірів зони горіння: площі, периметра, фронту та ін.;

пожежі, що не поширюються, – це такі пожежі, у яких площа зони горіння не змінюється з часом (обмежена площею розташування горючої речовини).

Залежно від **фізико-хімічних властивостей речовин, які горять**, і особливостей їх горіння та гасіння, всі пожежі умовно поділяють на *класи А, В, С, D та Е*.

До пожеж класу А відносять пожежі, під час яких, в основному, горять тверді горючі речовини. У свою чергу пожежі класу А поділяють на підклас А1 і А2. До пожеж підкласу А1 відносять горіння тліючих матеріалів (всі целюлозовмісні матеріали), тобто матеріали, для яких характерний як гомогенний, так і гетерогенний режим

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

горіння. Пожежі матеріалів, що горять тільки у гомогенному режимі (без тління), відносять до підкласу А2.

До пожеж класу В відносять пожежі горючих і легкозаймистих рідин, а також твердих речовин, що плавляться. У тих випадках, коли горять водонерозчинні рідини або тверді речовини, що при нагріванні переходять у рідкий стан, пожежу відносять до підкласу В1 (нафта і нафтопродукти, каучук, поліетилен). При горінні водорозчинних горючих рідин пожежі відносять до підкласу В2.

Пожежі горючих газів відносять до класу С.

Пожежі горючих металів і металоорганічних сполук віднесено до окремого класу D, що поділяють на три підкласи D1, D2 і D3. До пожеж підкласу D1 відносять горіння так званих легких металів – металів другої, третьої і четвертої групи періодичної системи Менделєєва (магній, алюміній, стронцій, барій, титан, цирконій та інші). Пожежі лужних металів відносять до підкласу D2. У випадку горіння металоорганічних сполук пожежі відносять до підкласу D3.

Пожежі електроустаткування, що знаходиться під напругою, відносять до пожеж класу Е.

Для того щоб можна було описувати, досліджувати або порівнювати пожежі, необхідно використовувати параметри, які б характеризували різні аспекти розвитку пожеж.

Основними параметрами розвитку пожежі є:

Пожежна навантага $P_{\text{пож}}$ – питома кількість теплоти, що може виділитися у приміщенні під час пожежі з одиниці площі підлоги приміщення або певної ділянки.

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

Пожежну навантагу можна розрахувати за формулою:

$$P_{\text{пож}} = \frac{\sum_i m_i Q'_i}{S_{\text{підл}}}, \text{кДж} \cdot \text{м}^{-2},$$

де m_i – маса i -го горючого матеріалу, що знаходиться у приміщенні або на даній ділянці, кг;

Q'_i – масова теплота згорання i -го горючого матеріалу, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$;

$S_{\text{підл}}$ – площа підлоги приміщення або ділянки, м^2 .

Іноді пожежну навантагу вимірюють як масу всіх горючих та важкогорючих матеріалів, що припадає на одиницю площі підлоги приміщення, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$.

Пожежна навантага визначає тривалість пожежі, інтенсивність задимлення, теплоту та температуру пожежі.

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

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

Фронт пожежі $\Phi_{\text{пож}}$ – частка периметра, на якій поширення пожежі відбувається найбільш інтенсивно.

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

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

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

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

Лінійна швидкість поширення пожежі v_l – відстань, яку проходить фронт пожежі за одиницю часу:

$$v_l = \frac{dl}{d\tau}, \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Температура пожежі на відкритому просторі – температура зони горіння, приймають як адіабатичну температуру горіння речовини.

Температура пожежі в огороженні – середньооб'ємна температура газового середовища у приміщенні, в якому відбувається пожежа.

Інтенсивність газообміну I_g – кількість повітря, що припливає за одиницю часу до одиниці площі пожежі:

$$I_g = \frac{g_{\text{пов}}}{S_{\text{пож}}}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1},$$

де $g_{\text{пов}}$ – витрата, з якою повітря припливає до зони горіння, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$;

$S_{\text{пож}}$ – площа пожежі, м^2 .

Інтенсивність задимлення I_z – зміна об'єму диму за одиницю часу в одиниці об'єму приміщення:

$$I_z = \frac{V_{\text{дугв}} - V_{\text{двид}}}{V_{\text{прим}}}, \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1},$$

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

де $V_{\text{дугв}}$ – об’єм диму, що утворюється за одиницю часу при згорянні пожежної навантаги, $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$;

$V_{\text{двид}}$ – об’єм диму, що видаляється із приміщення за одиницю часу, $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$;

$V_{\text{прим}}$ – об’єм приміщення, м^3 .

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

$$Q_{\text{пож}} = \eta Q_{\text{н}}^{\text{р}} v_{\text{м}} S_{\text{пож}}, \text{кДж} \cdot \text{с}^{-1},$$

де η – коефіцієнт повноти згорання (залежить від умов газообміну);

$Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – робоча теплота згорання, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$;

$v_{\text{м}}$ – масова швидкість вигорання, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$;

$S_{\text{пож}}$ – площа пожежі, м^2 .

Правильна оцінка тепла, що виділяється під час пожежі, необхідна для визначення температури пожежі, коефіцієнтів теплообміну, температури на поверхні будівельних конструкцій тощо. В деяких випадках теплота пожежі приймається за основу для оцінки ступеня пожежної безпеки різних об’єктів.

ГЛАВА 1. ПАРАМЕТРИ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖІ КЛАСУ А

Особливістю і загальною рисою всіх пожеж класу А є те, що поверхня горіння твердих горючих матеріалів не співпадає із площею пожежі [15]. Для урахування цієї особливості вводять *коефіцієнт поверхні горіння* $K_{п}$, який показує, у скільки разів площа поверхні горіння $S_{гор}$ є більшою, ніж площа пожежі $S_{пож}$:

$$K_{п} = \frac{S_{гор}}{S_{пож}}.$$

Коефіцієнт поверхні залежить від способу укладення матеріалу та його подрібненості.

Пожежі класу А відносять до пожеж, що поширюються. Параметром, що характеризує процес поширення пожежі, є лінійна швидкість поширення пожежі, яка залежить не тільки від виду горючого матеріалу, але й від його стану, умов газообміну, часу розвитку пожежі. Середньостатистичні значення лінійної швидкості поширення пожежі у найбільш поширених типах приміщень чи виробництвах наведені у довіднику [18] або у таблиці 10 додатків.

Залежно від часу розвитку лінійна швидкість поширення пожежі класу А змінюється таким чином:

- до 10-ї хвилини вільного розвитку лінійну швидкість поширення пожежі приймають рівною половині середньостатистичного значення:

$$v_l(\tau_{в.л.роз} \leq 10 \text{ хв.}) = 0,5v_l^0,$$

де v_{ℓ}^0 – середньостатистичне значення лінійної швидкості поширення пожежі, м·хв⁻¹;

- з 10-ї хвилини вільного розвитку до введення перших сил і засобів задля гасіння пожежі лінійну швидкість поширення пожежі приймають рівною середньостатистичному значенню:

$$v_l(\tau_{\text{віль.роз}} > 10 \text{ хв.}) = v_l^0;$$

- з моменту введення перших сил і засобів до локалізації пожежі лінійну швидкість поширення пожежі приймають рівною половині середньостатистичного значення швидкості:

$$v_l(\tau_{\text{роз}} < \tau_{\text{лок}}) = 0,5v_l^0;$$

- після локалізації пожежі лінійна швидкість поширення пожежі дорівнює нулю:

$$v_l(\tau_{\text{роз}} \geq \tau_{\text{лок}}) = 0.$$

Для того щоб визначити площу пожежі на будь-який час розвитку, необхідно розрахувати радіус розвитку пожежі і, залежно від місця виникнення горіння, наявності огорожуючих конструкцій, впливу вітру, визначити форму зони горіння.

Радіус розвитку пожежі, залежно від часу її розвитку, можна визначити за формулами:

$$\tau_{\text{віль.роз}} \leq 10 \text{ хв.}: \quad R_{\text{пож}} = 0,5v_l^0 \tau_{\text{віль}}; \quad (4.1)$$

$$\tau_{\text{віль.роз}} > 10 \text{ хв.}: \quad R_{\text{пож}} = 5v_l^0 + v_l^0(\tau_{\text{віль}} - 10); \quad (4.2)$$

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

$$\tau_{\text{віл.роз}} \leq \tau_{\text{роз}} < \tau_{\text{лок}}:$$

$$R_{\text{пож}} = 5v_l^0 + v_l^0(\tau_{\text{віл}} - 10) + 0,5v_l^0(\tau_{\text{роз}} - \tau_{\text{віл}}). \quad (4.3)$$

Під час розрахунку площі пожежі умовно приймають, що зона горіння набуває простих геометричних форм: сектора, кола, прямокутника. З часом розвитку площа і форма пожежі класу А можуть змінюватися.

Форма пожежі залежить від:

- місця виникнення осередку горіння;
- часу розвитку пожежі;
- розмірів приміщення, в якому виникла пожежа;
- наявності конвекційних потоків повітря.

§ 1. Особливості розвитку пожежі класу А на відкритому просторі

Параметри розвитку пожеж на відкритому просторі багато в чому визначаються швидкістю і напрямком вітру, рельєфом місцевості, метеорологічними умовами, вмістом вологи в матеріалі тощо [15], [17].

За наявності вітру характер поширення горіння змінюється. **Швидкість поширення пожежі**, залежно від швидкості вітру, можна розрахувати за формулами:

- штабелі пиломатеріалів:

$$v_l = v_l^0 \left[1 + 0,14 \left(\frac{v_{\text{віт}}}{v_l^0} \right)^{0,32} \right], \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (4.4)$$

де v_l – швидкість поширення фронту пожежі з урахуванням вітру, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$;

Глава 1. Параметри розвитку пожеж класу А

v_{ℓ}^0 – середньостатистична лінійна швидкість поширення пожежі у безвітряну погоду, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$; визначають за довідником [18] або таблицею 10 додатків;

$v_{\text{віт}}$ – швидкість вітру, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$.

- лісові пожежі:

– у напрямку фронту:

$$v_{l\text{фр}} = \frac{260\varepsilon}{\rho(16 + W)} \left(1 + 2,7v_{\text{пол}}^{2/v_{\text{пол}} + 1} \right), \text{ м}\cdot\text{хв}^{-1}, \quad (4.5)$$

де ε – коефіцієнт чорноти полум'я, приймають в межах $0,14 \div 0,45$;

ρ – густина горючого шару підстилки, зазвичай $1,7 \div 5 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$;

W – вологість горючого шару підстилки, %;

$v_{\text{пол}}$ – швидкість вітру під пологом деревостою на висоті 2 м, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$;

– у напрямку тилу:

$$v_{l\text{тил}} = 0,1v_{l\text{фр}} + 0,2, \text{ м}\cdot\text{хв}^{-1}; \quad (4.6)$$

– у напрямку флангів:

$$v_{l\text{фл}} = 0,35v_{l\text{фр}} + 0,17, \text{ м}\cdot\text{хв}^{-1}. \quad (4.7)$$

У безвітряну погоду (швидкість вітру є меншою за $1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$) форма розвитку пожежі визначається особливістю розміщення пожежної навантаги. У тих випадках, коли горючі матеріали розміщені приблизно рівномірно і немає зовнішніх обмежень, то швидкість поширення фронту полум'я є приблизно однаковою у всіх напрямках, і

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

пожежа розвивається за *круговою формою*. Площу та фронт пожежі в цьому випадку визначають за формулами:

$$S_{\text{пож}} = \pi R_{\text{пож}}^2, \text{ м}^2; \quad (4.8)$$

$$\Phi_{\text{пож}} = 2\pi R_{\text{пож}}, \text{ м}. \quad (4.9)$$

Зміна швидкості поширення горіння у напрямку вітру призводить до зміни форми розвитку пожежі. У разі швидкості вітру, більшої за $5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, пожежа переходить у *кутову форму*. Кут розвитку пожежі можна визначити за емпіричною формулою:

$$\alpha = \frac{65 - 2,6v_{\text{віт}}}{57}, \text{ рад}, \quad (4.10)$$

де $v_{\text{віт}}$ – швидкість вітру, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$.

У разі кутової форми зони горіння площу та фронт пожежі визначають за формулами:

$$S_{\text{пож}} = 0,5\alpha R_{\text{пож}}^2, \text{ м}^2; \quad (4.11)$$

$$\Phi_{\text{пож}} = \alpha R_{\text{пож}}, \text{ м}. \quad (4.12)$$

Степові та польові пожежі поширюються з великою швидкістю, особливо під впливом вітру. У суху погоду швидкість поширення по високих хлібах та травах може досягати $500\text{--}600 \text{ м}\cdot\text{хв}^{-1}$. Особливістю такого типу пожеж є порівняно невелика ширина фронту полум'яного горіння, що обумовлено невеликим запасом горючих матеріалів на одиницю площі пожежі та високою швидкістю вигорання. Тому площа пожежі – це згарище, по кромці якого відбувається полум'яне горіння.

Для пожеж на відкритому просторі характерною рисою є поява потужної *конвекційної колонки*. При утворенні конвекційної колонки нагріті продукти горіння здіймаються вгору з великою швидкістю, а в нижню частину відбувається приплив холодного повітря. Це призводить до винесення у верхню частину колонки разом із газоподібними продуктами горіння розжарених іскор і головешок, що догорають. За збільшення площі горіння збільшується і висота підйому цих часток. На певній відстані важкі частинки розжареного вугілля, іскри, дрібні шматочки тліючого матеріалу починають випадати на землю. Вітер збільшує відстань розльоту іскор.

Дальність розльоту іскор, здатних спричинити загоряння і призвести до утворення нових осередків пожежі, можна визначити за емпіричними формулами:

- для штабелів пиломатеріалів

– за швидкості вітру до $9 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$:

$$L_{\text{розл}} = \frac{14,7S_{\text{пож}} v_{\text{віт}}}{v_{\text{віт}}^3}, \text{ м}; \quad (4.13)$$

– за швидкості вітру більше $9 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$:

$$L_{\text{розл}} = \frac{14,7S_{\text{пож}} v_{\text{віт}}}{v_{\text{віт}}^2}, \text{ м}; \quad (4.14)$$

де $v_{\text{віт}}$ – швидкість витання часток, що випадають; приймається рівною $9 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

- для *фрезерного торфу* за швидкості вітру більше $5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$:

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

$$L_{\text{розл}} = \left(\frac{v_{\text{віт}} - 2}{1,3} \right)^2, \text{ м}; \quad (4.15)$$

- для кускового торфу вологістю до 25 %:

$$L_{\text{розл}} = \left(\frac{v_{\text{вітр}} - 4,5}{1,5} \right)^2, \text{ м}. \quad (4.16)$$

Методика розрахунку параметрів пожежі класу А на відкритому просторі

1. Визначити за довідником [18] або таблицею 10 додатків значення середньостатистичної лінійної швидкості поширення пожежі по горючому матеріалу $v_{\text{л}}$.

2. Розрахувати лінійну швидкість поширення пожежі з урахуванням наявності вітру за однією із формул (4.4)–(4.7).

3. Розрахувати радіус розвитку пожежі R на заданий момент часу за формулою (4.1) або (4.2).

4. Визначити форму зони горіння залежно від швидкості вітру. Прийняти, якщо швидкість вітру є меншою за $5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, то форма зони горіння – кругова, якщо швидкість вітру є більшою за $5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, то форма зони горіння – кутова. Розрахувати кут розвитку пожежі за формулою (4.10).

5. Розрахувати площу та фронт пожежі залежно від форми зони горіння за формулами (4.8), (4.9) або (4.11), (4.12).

6. Розрахувати можливу відстань розльоту іскор за даної швидкості вітру за однією із формул (4.13)–(4.16).

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати площу та фронт пожежі під час горіння складу кускового торфу у штабелях, якщо час вільного розвитку становить 25 хв., а швидкість вітру дорівнює $6 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

Розв'язання

1. Визначаємо за таблицею 10 додатків значення середньостатистичної лінійної швидкості поширення пожежі на складі кускового торфу: $v_{\ell}^{\circ} = (1,3-1,7) \cdot 10^{-2} \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.
Обираємо середнє значення $v_{\ell}^{\circ} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}\cdot\text{с}^{-1} = 0,9 \text{ м}\cdot\text{хв}^{-1}$.

2. Розраховуємо радіус розвитку пожежі на 25-ту хвилину вільного розвитку ($\tau_{\text{віль.розв.}} > 10 \text{ хв.}$) за формулою (4.2):

$$R_{\text{пож}} = 0,5 \cdot 0,9 \cdot 10 + 0,9(25 - 10) = 18 \text{ м.}$$

3. Визначаємо форму зони горіння. Оскільки швидкість вітру є більшою за $5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, приймаємо, що форма зони горіння – кутова. Розраховуємо кут розвитку пожежі за формулою (4.10):

$$\alpha = \frac{65 - 2,6 \cdot 6}{57} = 0,87 \text{ рад.}$$

4. Розраховуємо площу та фронт пожежі за формулами (4.11) та (4.12):

$$S_{\text{пож}} = 0,5 \cdot 0,87 \cdot 18^2 = 141 \text{ м}^2;$$

$$\Phi_{\text{пож}} = 0,87 \cdot 18 = 15,7 \text{ м.}$$

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

Висновок: на 25-ту хвилину вільного розвитку пожежі на складі торфу кускового за швидкості вітру $6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ площа пожежі становитиме 141 м^2 , а фронт пожежі – $15,7 \text{ м}$.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати можливу відстань розльоту іскор при горінні складу пиломатеріалів (дощок) вологістю 25% за швидкості вітру $8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, якщо пожежа вільно розвивається протягом 20 хвилин.

Розв'язання

1. Визначаємо за таблицею 10 додатків значення середньостатистичної лінійної швидкості поширення пожежі на складі пиломатеріалів вологістю $20\text{--}30 \%$: $v_{\ell}^{\circ} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

2. Розраховуємо лінійну швидкість поширення пожежі з урахуванням швидкості вітру за формулою (4.4):

$$v_l = 2 \cdot 10^{-2} \left[1 + 0,14 \left(\frac{8}{2 \cdot 10^{-2}} \right)^{0,32} \right] = 0,04 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

3. Розраховуємо радіус розвитку пожежі на 20-ту хвилину вільного розвитку за формулою (4.2):

$$v_{\ell}^{\circ} = 0,04 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} = 2,4 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1};$$

$$R_{\text{пож}} = 0,5 \cdot 2,4 \cdot 10 + 2,4(20 - 10) = 36 \text{ м}.$$

4. Визначаємо форму зони горіння. Оскільки швидкість вітру є більшою за $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, то форма зони горіння – кутова. Розраховуємо кут розвитку пожежі за формулою (4.10):

$$\alpha = \frac{65 - 2,6 \cdot 8}{57} = 0,77 \text{ рад.}$$

5. Розраховуємо площу пожежі за формулою (4.11):

$$S_{\text{пож}} = 0,5 \cdot 0,77 \cdot 36^2 = 499 \text{ м}^2.$$

6. Розраховуємо можливу відстань розльоту іскор за даної швидкості вітру за формулою (4.13):

$$L_{\text{розл}} = \frac{14,7 \cdot 499 \cdot 8}{9^3} = 80,5 \text{ м.}$$

Висновок: на 20-ту хвилину вільного розвитку пожежі складу пиломатеріалів вологістю 25 % за швидкості вітру $8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ площа пожежі становить 499 м^2 , а можлива відстань розльоту іскор досягає 80,5 м.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати відстань, яку пройде лісова пожежа у напрямку фронту, флангів і тилу, а також площу та фронт пожежі, що вільно поширюється протягом двох годин, за умови, що вологість лісової підстилки становить 20 %, її густина дорівнює $3,4 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, ступінь чорноти полум'я 0,25, а швидкість вітру під пологом лісу – $4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Розв'язання

1. Розраховуємо лінійну швидкість поширення лісової пожежі:

– у напрямку фронту – за формулою (4.5):

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

$$v_{l_{\text{фр}}} = \frac{260 \cdot 0,25}{3,4(16 + 20)} \left(1 + 2,7 \cdot 4^{2/4+1}\right) = 12 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1};$$

– у напрямку тилу – за формулою (4.6):

$$v_{l_{\text{тил}}} = 0,1 \cdot 12 + 0,2 = 1,4 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1};$$

– у напрямку флангів – за формулою (4.7):

$$v_{l_{\text{фл}}} = 0,35 \cdot 12 + 0,17 = 4,4 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}.$$

2. Розраховуємо відстань, яку пройде пожежа за 120 хвилин вільного розвитку, за формулою (4.2):

– у напрямку фронту:

$$R_{\text{фр}} = 5 \cdot 12 + 12(120 - 10) = 1380 \text{ м};$$

– у напрямку флангів:

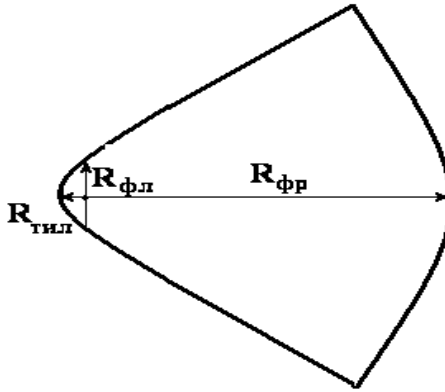
$$R_{\text{фл}} = 5 \cdot 4,4 + 4,4(120 - 10) = 506 \text{ м};$$

– у напрямку тилу:

$$R_{\text{тил}} = 5 \cdot 1,4 + 1,4(120 - 10) = 161 \text{ м}.$$

3. Розраховуємо площу та фронт пожежі.

3.1. Розраховуємо кут розвитку пожежі. Для цього замальовуємо схему розвитку пожежі:



$$\alpha = 2 \cdot \arctg \frac{R_{\text{фл}}}{R_{\text{тил}}} = 2 \cdot \arctg \frac{506}{161} = 2,53 \text{ рад.}$$

3.2. Розраховуємо площу пожежі за формулою (4.11):

$$S_{\text{пож}} = 0,5\alpha R^2 = 0,5 \cdot 2,53 \cdot (1,38 + 0,16)^2 = 3 \text{ км}^2.$$

3.3. Розраховуємо фронт пожежі за формулою (4.12):

$$\Phi_{\text{пож}} = 2,53 \cdot (1,38 + 0,16) = 3,9 \text{ км.}$$

Висновок: протягом двох годин лісова пожежа за даних умов пройде у напрямку фронту 1380 м, у напрямку флангів – 506 м, у напрямку тилу – 161 м. Площа пожежі становитиме 3 км², фронт пожежі 3,9 км.

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати площу і фронт степової пожежі, якщо час вільного розвитку становить 9 хвилин, лінійна швидкість поширення пожежі $v^{\circ}_{\ell} = 0,3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, а швидкість вітру дорівнює $2,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Розв'язання

1. Розраховуємо відстань, яку пройде фронт пожежі за 9 хвилин вільного розвитку, за формулою (4.1):

$$v^{\circ}_{\ell} = 0,3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} = 1,8 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1};$$

$$\mathbf{R_{\text{пож}} = 0,5 \cdot 1,8 \cdot 9 = 8,1 \text{ м.}}$$

2. Визначаємо форму зони горіння. Оскільки швидкість вітру є меншою за $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, приймаємо, що форма зони горіння – коло.

3. Розраховуємо площу і фронт пожежі на заданий час за формулами (4.8) і (4.9):

$$\mathbf{S_{\text{пож}} = 3,14 \cdot 8,1^2 = 206 \text{ м}^2};$$

$$\mathbf{\Phi_{\text{пож}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 8,1 = 51 \text{ м.}}$$

Висновок: за 9 хвилин вільного розвитку площа степової пожежі за даних умов становитиме 206 м^2 , а фронт пожежі – 51 м .

§ 2. Особливості розвитку пожеж класу А в огороженні

Пожежі в огороженні – пожежі, у яких тепло- і масообмін обмежені будівельними конструкціями [18] – [22].

Якщо приміщення має великий вільний об'єм (більше 1000 м³) або відкриті отвори значної площі, процес поширення пожежі не обмежений припливом повітря і відбувається за рахунок поступового охоплення полум'ям поверхні горючих матеріалів.

У приміщеннях меншого об'єму за досягнення температури 300–350 °С вміст газоподібних продуктів термічного розкладання пожежної навантаги досягає нижньої концентраційної межі поширення полум'я. При цьому поширення пожежі відбувається вже не по поверхні горючого матеріалу, а по об'єму газового середовища, що утворюється, тобто вільний об'єм приміщення перетворюється в зону горіння (об'ємна стадія розвитку пожежі). Зазвичай це супроводжується руйнуванням віконного скла, і у приміщення починає надходити свіже повітря із навколишнього середовища, що сприяє інтенсифікації горіння і розвитку пожежі.

Знання закономірностей зміни параметрів пожежі й факторів, які на них впливають, необхідне для прогнозування обстановки під час пожежі та розробки заходів щодо запобігання поширенню пожежі та її ліквідації, забезпечення безпеки людей, які знаходяться у зоні впливу небезпечних факторів пожежі, та для складання планів евакуації людей і матеріальних цінностей.

На практиці для прогнозування можливої обстановки під час пожежі при розробці оперативного плану пожежогасіння приймають ряд припущень:

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

1. Пожежна навантага у приміщенні розподілена рівномірно, отже, пожежа поширюється у всіх напрямках рівномірно.

2. Залежно від місця виникнення горіння на початковій стадії зона горіння може набувати форми кола, півкола або кутової форми. В міру розвитку пожежі форма зони горіння може змінюватися і переходити у прямокутну. Перехід із однієї форми розвитку пожежі в іншу відбувається при підході фронту пожежі до огорожуючих конструкцій. При поширенні горіння в декількох приміщеннях складну форму пожежі умовно розбивають на декілька простих.

3. При досягненні протипожежних конструкцій поширення фронту пожежі припиняється на час їх вогнестійкості. Після прогорання протипожежних конструкцій пожежа поширюється у вільному напрямку із середньостатистичною швидкістю $v_{\text{ср}}^0$.

Через те що під час пожежі в огороженні тепло- і масообмін обмежені будівельними конструкціями, тепло і дим накопичуються у приміщенні, а тому зона теплового впливу і зона задимлення з часом змінюються [15]. Зона задимлення характеризується зниженим вмістом кисню та підвищеним вмістом токсичних речовин, а зона теплового впливу характеризується критичною температурою, за якої відбуваються помітні зміни фізичних властивостей матеріалу. Отже, з розвитком пожежі настане момент часу, коли все приміщення буде охоплене цими зонами і перебування в них людей буде неможливим. Такий час називають **критичним часом розвитку пожежі**.

Критичний час розвитку пожежі для перебування людей у приміщенні визначається досягненням

критичної температури 70 °С (*критичний час розвитку пожежі за температурою*) або зниженням концентрації кисню в повітрі приміщення до критичного значення 14 % (*критичний час розвитку пожежі за концентрацією кисню*).

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. Крім того, однакові речовини можуть вигоряти з різною швидкістю, яка залежить від щільності упаковки, стану поверхні горючої речовини, умов, які обмежують втрати тепла, часу розвитку пожежі [22].

За умови, що немає газообміну з навколишнім середовищем та площа пожежі не змінюється (горінням охоплена вся поверхня горючої речовини, наприклад, під час горіння розливу рідини), час до настання критичного стану за концентрацією кисню може бути аналітично визначений як:

$$\tau_{\text{кр}}^{0_2} = \frac{0,33V_{\text{прим}}}{\eta S_{\text{пож}} v_{\text{м}} v_{\text{пов}}}, \text{ хв.}, \quad (4.17)$$

де $V_{\text{прим}}$ – вільний об'єм приміщення, м³;

$S_{\text{пож}}$ – площа пожежі, м²;

η – коефіцієнт повноти згоряння (для деяких речовин наведений у табл. додатків);

$v_{\text{м}}$ – масова швидкість вигорання речовини (для деяких речовин наведена у табл. додатків), кг·м⁻²·хв⁻¹;

$v_{\text{пов}}$ – питомий об'єм повітря, необхідний для

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

повного згоряння 1 кг горючої речовини (для деяких речовин наведений у табл. додатків), $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$.

Розрахунок часу розвитку пожежі до досягнення критичної температури у приміщенні за сталої площі пожежі можна провести за формулою:

$$\tau_{\text{кр}}^t = \frac{V_{\text{прим}} c_p'' (t_{\text{кр}} - t_o)}{(1-k) \eta Q'_H S_{\text{пож}} v_m}, \text{ хв.}, \quad (4.18)$$

де Q'_H – нижча масова теплота згоряння горючого матеріалу, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$;

c_p'' – середня питома об'ємна теплоємність газового середовища у приміщенні, $\text{кДж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}$;

t_o , $t_{\text{кр}}$ – відповідно початкова та критична температура газового середовища у приміщенні;

k – коефіцієнт тепловтрат, який визначає частку тепла пожежі, що витрачається на нагрівання конструкцій приміщення та навколишніх предметів:

$$k = \frac{\alpha_{\text{то}} S_{\text{огор}} (t_{\text{сер}} - t_o)}{Q'_H v_m S_{\text{пож}}},$$

де $\alpha_{\text{то}}$ – коефіцієнт теплообміну;

$S_{\text{огор}}$ – площа огорожуючих конструкцій та навколишніх предметів;

$t_{\text{сер}}$ – середня температура газового середовища у приміщенні.

Коефіцієнт тепловтрат k залежить від площі

пожежі, а отже, й від часу розвитку горіння, тому значення k знаходять методом підбору.

Якщо прийняти $c''_p = 1,12 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}$, $t_{\text{кр}} = 70 \text{ }^\circ\text{С}$, $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{С}$, $k = 0,21$, то після підстановки числових значень у формулу (4.18) можна записати:

$$\tau_{\text{кр}}^t = 71 \frac{V_{\text{прим}}}{\eta Q'_H S_{\text{пож}} v_m}, \text{ хв.} \quad (4.19)$$

Під час горіння твердих горючих матеріалів пожежа з часом поширюється, а її площа збільшується, тому критичний час розвитку пожежі залежить від лінійної швидкості поширення горіння, місця виникнення пожежі, а отже, і від форми розвитку пожежі. Крім того, необхідно пам'ятати, що приблизно перші 10 хв. пожежа класу А поширюється з меншою швидкістю, ніж середньостатистична швидкість ($v_t = 0,5v_t^0$).

Залежно від форми зони горіння за умови відсутності газообміну з навколишнім середовищем критичний час розвитку пожежі за температурою та вмістом кисню можна виразити такими формулами:

- форма розвитку пожежі – *кругова* (осередок пожежі знаходиться у центрі приміщення):

$$\tau_{\text{кр}}^t = 4,53 \sqrt{\frac{V_{\text{прим}}}{\eta Q'_H v_m (v_t^0)^2}}, \text{ хв.}, \quad (4.20)$$

$$\tau_{\text{кр}}^{\text{O}_2} = 0,753 \sqrt{\frac{V_{\text{прим}}}{\eta v_m v_{\text{пов}} (v_t^0)^2}}, \text{ хв.}, \quad (4.21)$$

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

де v_l^0 – середньостатистична лінійна швидкість поширення пожежі, м·хв⁻¹;

• форма розвитку пожежі – *півколо* (осередок пожежі знаходиться біля стіни):

$$\tau_{кр}^t = 5,65 \sqrt[3]{\frac{V_{прим}}{\eta Q'_H v_m (v_l^0)^2}}, \text{ хв.}, \quad (4.22)$$

$$\tau_{кр}^{O_2} = 0,94 \sqrt[3]{\frac{V_{прим}}{\eta v_m v_{пов} (v_l^0)^2}}, \text{ хв.}; \quad (4.23)$$

• форма розвитку пожежі – *чверть кола* (осередок пожежі знаходиться у куті приміщення):

$$\tau_{кр}^t = 7,12 \sqrt[3]{\frac{V_{прим}}{\eta Q'_H v_m (v_l^0)^2}}, \text{ хв.}, \quad (4.24)$$

$$\tau_{кр}^{O_2} = 1,19 \sqrt[3]{\frac{V_{прим}}{\eta v_m v_{пов} (v_l^0)^2}}, \text{ хв.} \quad (4.25)$$

Кількісною характеристикою зміни тепловиділення на пожежі з часом є температурний режим [15], [20], [21].

Під *температурним режимом пожежі* розуміють зміну температури пожежі в часі.

Температура пожежі в огороженні – середньооб'ємна температура газового середовища у приміщенні, в якому відбувається пожежа.

Температура пожежі в огороженні істотно залежить

від об'єму приміщення, часу розвитку пожежі, площі пожежі, величини пожежної навантаги, виду горючої речовини (теплоти згоряння речовини, масової швидкості вигорання речовини, швидкості поширення горіння), інтенсивності газообміну, тепловтрат на нагрівання конструкцій та повітря, що надходить у приміщення, тощо. Середньооб'ємну температуру пожежі на будь-який момент розвитку визначають як добуток адіабатичної температури горіння $T_{ад}$ на безрозмірний коефіцієнт:

$$T_{пож\tau} = 0,66T_{ад}Bo^{0,17},$$

де Bo – критерій Больцмана, який дорівнює відношенню тепла, яке виділяється під час горіння, до тепла, що передається продуктами горіння до огороджуючих поверхонь у процесі променистого теплообміну:

$$Bo = \frac{\eta S_{пож} v_m c_p'' v_{пр}}{60\sigma_o \varepsilon_{пр} S_{огор} T_{ад}^3},$$

де σ_o – постійна Больцмана, $5,76 \cdot 10^{-11}$ кВт·м⁻¹·К⁻¹;

$S_{огор}$ – площа огороджуючих конструкцій, м²;

$v_{пр}$ – питомий дійсний об'єм продуктів горіння, що утворюється при згорянні 1 кг горючої речовини за даних умов (з урахуванням коефіцієнта надлишку повітря), м³·кг⁻¹;

$\varepsilon_{пр}$ – приведений ступінь чорноти продуктів горіння;

c_p'' – середня питома об'ємна теплоємність газового

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

середовища, $\text{кДж}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{К}^{-1}$.

Адіабатичну температуру горіння $T_{\text{ад}}$ можна визначити за формулою:

$$T_{\text{ад}} = \frac{\eta Q'_{\text{н}}}{c''_{\text{p}} v_{\text{пг}}} + 298, \text{ К.} \quad (4.26)$$

З урахуванням значення постійної Больцмана середньооб'ємну температуру газового середовища у приміщенні під час пожежі в будь-який момент часу можна визначити за формулою:

$$T_{\text{пож}} = 18,1 T_{\text{ад}} \left(\frac{\eta S_{\text{пож}} v_{\text{м}} c''_{\text{p}} v_{\text{пг}}}{\varepsilon_{\text{пр}} S_{\text{огор}} T_{\text{ад}}^3} \right)^{0,17}, \text{ К.} \quad (4.27)$$

Розрахувати значення температури в заданих точках приміщення на заданий час вільного розвитку пожежі можна за формулою:

$$T_{x,y,\tau} = T_{\text{пож}} \left(0,8 + 0,2 \frac{y}{y_0} \right) \left(1,33 - \frac{x}{2x + x_0} \right), \text{ К,} \quad (4.28)$$

де $x_0 = 0,5L$;

L – відстань від осередку пожежі до місця виходу продуктів горіння із приміщення;

$y_0 = 0,5H_{\text{прим}}$;

$H_{\text{прим}}$ – висота приміщення;

x, y – координати точки, в якій визначають температуру газового середовища (див. рис. 4.2).



Рис. 4.2 – Схема визначення координати заданої точки під час розрахунку температури газового середовища у приміщенні

Найбільший вплив на температурний режим пожежі справляє газообмін.

Газообмін – це конвекційний рух газових потоків, що виникає під дією сил, зумовлених градієнтом тиску.

Суттєвим фактором, що викликає газообмін, є протікання пожежі у приміщенні. Під час пожежі повітря в нижній частині приміщення підсмоктується у зону горіння, де вступає у хімічну реакцію і витрачається. Над осередком горіння виникають потоки розжарених продуктів горіння, які за рахунок підвищеної температури мають низьку густину і під впливом гравітаційних сил піднімаються вгору, створюючи конвекційну димогазову колонку. При цьому поблизу зони горіння виникає деяке розрідження, а у верхній частині – надлишковий тиск. Характер руху газоповітряних мас залежить від конфігурації приміщення, наявності отворів, а також їх взаємного розташування.

Якщо газообмін здійснюється через декілька отворів, розташованих на різному рівні, їх можна умовно розділити на припливні, через які надходить свіже повітря у приміщення, і витяжні, через які розігріті продукти згорання виходять

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

назовні. Характер прямування газових потоків при цьому може мати вигляд, зображений на рис. 4.3.

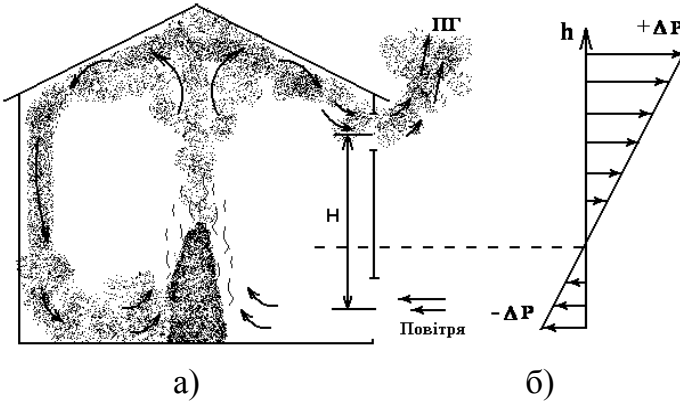


Рис. 4.3 – Газообмін під час пожежі за наявності отворів, розташованих на різних рівнях

а) схема руху газових потоків під час пожежі;

б) еюра тиску газового середовища за висотою приміщення.

Якщо прийняти, що маса повітря, яка припливає до приміщення, дорівнює масі газового середовища, що виштовхується із приміщення, то фактичну витрату, з якою відбувається рух газів у приміщенні, можна розрахувати за формулою:

$$g_{\text{факт}} = K_{\text{отв}} S_{\text{прип}} S_{\text{вит}} \sqrt{\frac{2gH\rho_{\text{пов}}\rho_{\text{пг}}(\rho_{\text{пов}} - \rho_{\text{пг}})}{\rho_{\text{пов}}S_{\text{прип}}^2 + \rho_{\text{пг}}S_{\text{вит}}^2}}, \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (4.29)$$

де $g_{\text{факт}}$ – фактична витрата, з якою відбувається газообмін у приміщенні;

$K_{\text{отв}}$ – коефіцієнт витрати отвору, який враховує втрати кінетичної енергії газового потоку при проходженні його

через отвори за рахунок тертя, завихрення тощо, і залежить від форми отвору і товщини стінок (для віконних і дверних отворів приймається рівним $0,6 \div 0,65$);

$S_{\text{прип}}$ – площа припливного отвору;

$S_{\text{вит}}$ – площа витяжного отвору;

g – прискорення вільного падіння;

H – відстань між центрами припливного і витяжного отворів;

$\rho_{\text{пов}}$ – густина повітря назовні приміщення;

$\rho_{\text{пг}}$ – густина газового середовища (продуктів горіння) у приміщенні.

Якщо врахувати, що густина газового середовища пов'язана з його температурою, то масову витрату газів через отвори можна знайти за формулою:

$$g_{\text{факт}} = K_{\text{отв}} S_{\text{прип}} S_{\text{вит}} \rho_{\text{пов}} \sqrt{\frac{2g H \left(1 - \frac{T_{\text{пов}}}{T_{\text{пож}}}\right) \frac{T_{\text{пов}}}{T_{\text{пож}}}}{S_{\text{прип}}^2 + S_{\text{вит}}^2 \frac{T_{\text{пов}}}{T_{\text{пож}}}}}, \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (4.30)$$

де $T_{\text{пов}}$ – температура повітря, що надходить у приміщення;

$T_{\text{пож}}$ – середньооб'ємна температура газового середовища, що витікає із приміщення (температура пожежі в огороженні).

Під час пожежі у приміщенні на певній висоті від рівня підлоги фізичні параметри газового середовища (густина, тиск) відповідають фізичним параметрам повітря поза приміщенням. Цю площину прийнято називати нейтральною зоною або *площиною рівних*

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

тисків (див. рис. 4.3).

Нейтральною зоною називають уявну площину у приміщенні, рівнобіжну підлозі, у точках якої тиск продуктів горіння дорівнює тиску зовнішнього повітря.

Якщо газообмін здійснюється через вентиляційні отвори, *розташовані на одному рівні*, нейтральна зона знаходиться безпосередньо у площині отворів, через які відбувається газообмін. При цьому вище нейтральної зони продукти горіння видавлюються назовні, а в нижній частині отвору відбувається підсмоктування повітря всередину приміщення.

Витрату, з якою відбувається рух газів через отвори, розташовані на одному рівні, можна розрахувати за формулою:

$$g_{\text{факт}} = \frac{2}{3} K_{\text{отв}} S_{\text{отв}} \sqrt{\frac{2gh_{\text{отв}} \rho_{\text{пов}} \rho_{\text{пг}} (\rho_{\text{пов}} - \rho_{\text{пг}})}{(\rho_{\text{пов}}^{0,33} + \rho_{\text{пг}}^{0,33})^3}}, \text{кг} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (4.31)$$

або, з урахуванням зв'язку густини газів з їх температурою:

$$g_{\text{факт}} = 0,42 S_{\text{отв}} \rho_{\text{пов}} \sqrt{\frac{2gh_{\text{отв}} \left(1 - \frac{T_{\text{пов}}}{T_{\text{пож}}}\right) \frac{T_{\text{пов}}}{T_{\text{пож}}}}{\left(1 + 3 \sqrt{\frac{T_{\text{пов}}}{T_{\text{пож}}}}\right)^3}}, \text{кг} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (4.32)$$

де $S_{\text{отв}}$ – площа отвору, через який відбувається газообмін;

$h_{\text{отв}}$ – висота отвору, через який відбувається газообмін.

Параметром, що характеризує умови газообміну у приміщенні під час пожежі, є **коефіцієнт надлишку повітря**, який дорівнює відношенню фактичної кількості

повітря, що надходить у приміщення за одиницю часу, до теоретичної витрати повітря, необхідної для повного згорання речовини на даній площі пожежі:

$$\alpha = \frac{g_{\text{факт}}}{g_{\text{теор}}}, \quad (4.33)$$

де $g_{\text{теор}}$ – теоретична витрата повітря, необхідна для повного згорання речовини на даній площі пожежі; визначають за формулою:

$$g_{\text{теор}} = \eta S_{\text{пож}} v_m v_{\text{пов}}^0 \rho_{\text{пов}}, \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (4.34)$$

Розрахувати положення нейтральної зони можна за формулами:

- якщо газообмін здійснюється через *отвори, розташовані на одному рівні*:

$$h_{\text{нз}} = \frac{h_{\text{отвор}}}{1 + 3 \sqrt{\frac{T_{\text{пож}}}{T_{\text{пов}}}}}, \text{ м}, \quad (4.35)$$

де $h_{\text{отвор}}$ – висота отвору, через який здійснюється газообмін, м;

$T_{\text{пож}}$ – температура пожежі, К;

$T_{\text{пов}}$ – температура повітря назовні, К;

- якщо газообмін здійснюється через *отвори, розташовані на різних рівнях*:

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

$$h_{\text{нз}} = \frac{H}{\left(\frac{S_{\text{прип}}}{S_{\text{вит}}}\right)^2 \frac{T_{\text{пож}}}{T_{\text{пов}}} + 1} + 0,5h_{\text{прип}}, \text{ м}, \quad (4.36)$$

де H – відстань між центрами отворів, м;
 $h_{\text{прип}}$ – висота припливного отвору.

Газообмін під час пожежі відіграє вирішальну роль у забезпеченні безпеки людей, що знаходяться всередині приміщення, і забезпеченні умов для організації і проведення бойових дій по їх рятуванню, гасінню пожежі.

Аналіз величин, що входять до критерію Больцмана, показує, що середньооб'ємна температура газового середовища під час пожежі залежить від теплоти пожежі, умов газообміну (надлишку повітря) та часу розвитку пожежі. Отже, температура пожежі в огороженні є функцією цих параметрів:

$$t_{\text{пож}} = f(q, \alpha, \tau),$$

де α – коефіцієнт надлишку повітря;

τ – час вільного розвитку пожежі, хв.;

q – густина теплового потоку, що сприймають огорожуючі конструкції; може бути розрахована за формулою:

$$q = \frac{\eta v_m Q'_H S_{\text{пож}}}{S_{\text{огор}}}, \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}. \quad (4.37)$$

Статистична обробка експериментальних даних дозволила представити залежності температури пожежі в огороженні від теплоти пожежі, надлишку повітря та часу розвитку пожежі у вигляді номограм (див. додатки Номограма 12, 13), за допомогою яких можна визначити температурний режим пожежі.

На підставі отриманих даних про температуру як у цілому у приміщенні, так і в окремих його точках, можна робити практичні висновки щодо поведінки будівельних конструкцій в умовах пожежі та умов знаходження людей у даному приміщенні під час евакуації та гасіння пожежі.

Методика розрахунку площі, периметра та фронту пожежі у приміщенні

1. Визначити середньостатистичну лінійну швидкість поширення пожежі v°_e залежно від типу приміщення із таблиці 10 додатків або за довідником [18].

2. Розрахувати радіус розвитку пожежі залежно від часу розвитку за однією із формул (4.1)–(4.3).

3. Визначити форму зони горіння з урахуванням радіуса розвитку пожежі, місця виникнення пожежі і розмірів приміщення. Замалювати схему розвитку пожежі у приміщенні.

Якщо осередок пожежі знаходиться в куті приміщення і радіус розвитку пожежі є меншим за ширину приміщення, то форма зони горіння – чверть кола.

Якщо осередок пожежі знаходиться біля стіни і радіус розвитку пожежі є меншим за відстань до ближчої стіни, то форма зони горіння – півколо.

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

Якщо осередок пожежі знаходиться у центрі приміщення і радіус розвитку пожежі є меншим за відстань до ближчої стіни, то форма зони горіння – коло.

Якщо радіус розвитку пожежі дорівнює або є більшим за відстань до ближчої стіни, то форма зони горіння – прямокутник.

Якщо радіус розвитку пожежі є більшим за відстань до протипожежних конструкцій, необхідно врахувати час їх вогнестійкості. Після прогорання протипожежних конструкцій (дверей) пожежа поширюється у вільному напрямку до обмеження конструкціями із середньостатистичною швидкістю v_{ℓ}^0 .

4. Залежно від форми зони горіння розрахувати площу, периметр та фронт пожежі.

Фронт пожежі за кругової форми розвитку дорівнює периметру кола, за кутової – довжині дуги, за прямокутної – ширині приміщення, помноженій на кількість напрямків розвитку пожежі.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати площу, периметр та фронт пожежі на 5-ту хвилину вільного розвитку, якщо пожежа виникла у приміщенні текстильного виробництва розмірами 10×12 м. Осередок пожежі знаходиться біля середини ширшої стіни.

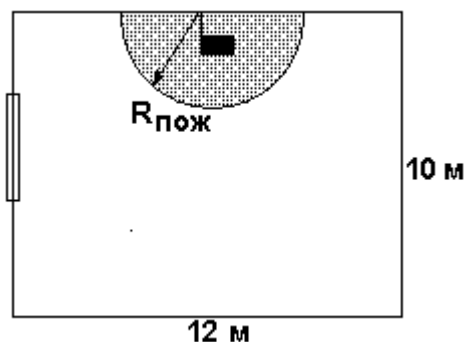
Розв'язання

1. Визначаємо за таблицею 10 додатків середньостатистичну лінійну швидкість поширення пожежі для приміщення текстильного виробництва: $v_{\ell}^0 = (0,8 \div 1,7) \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Приймаємо, що швидкість поширення пожежі дорівнює середньому значенню $v_{\ell}^0 = 1,25 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} = 0,75 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}$.

2. Розраховуємо радіус розвитку пожежі на заданий час вільного розвитку:

$$R_{\text{пож}(5)} = 0,5 \cdot 0,75 \cdot 5 = 1,9 \text{ м.}$$

3. Визначаємо форму зони горіння з урахуванням місця виникнення пожежі і розмірів приміщення. Замальовуємо схему розвитку пожежі у приміщенні.



Через те що осередок пожежі знаходиться біля стіни, а радіус розвитку пожежі на 5-ту хвилину є меншим, ніж відстань до ближчої стіни, форма пожежі – півколо.

4. Розраховуємо площу, периметр та фронт пожежі на 5-ту хвилину:

$$S_{\text{пож}(5)} = \frac{3,14 \cdot 1,9^2}{2} = 5,7 \text{ м}^2;$$

$$P_{\text{пож}(5)} = \pi R_{\text{пож}(5)} + 2R_{\text{пож}(5)} = 3,14 \cdot 1,9 + 2 \cdot 1,9 = 9,8 \text{ м};$$

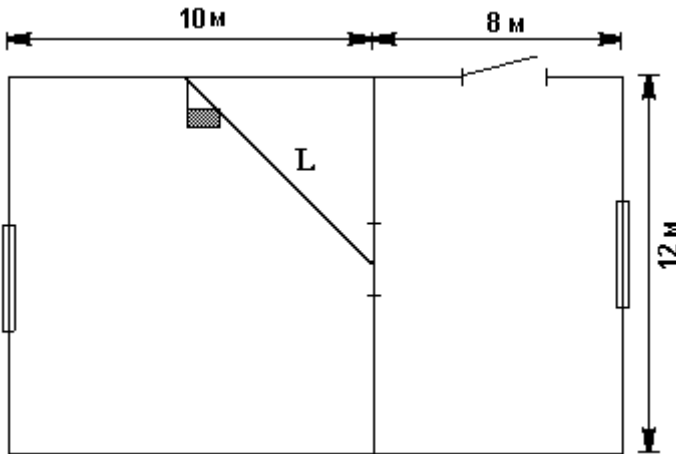
$$\Phi_{\text{пож}(5)} = \pi R_{\text{пож}(5)} = 3,14 \cdot 1,9 = 6,0 \text{ м.}$$

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

Висновок: на 5-ту хвилину вільного розвитку пожежі у приміщенні текстильного виробництва форма зони горіння – півколо; площа пожежі дорівнює $5,7 \text{ м}^2$, периметр пожежі – $9,8 \text{ м}$, фронт пожежі – 6 м .

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати площу і фронт пожежі в адміністративному приміщенні на 25-ту хвилину вільного розвитку. Визначити імовірність прогорання дверей під час пожежі, якщо межа вогнестійкості дверей становить 10 хв. Схему приміщення наведено на рисунку (L – відстань до дверей).



Розв'язання

1. Користуючись довідником [18], приймаємо, що середньостатистична лінійна швидкість поширення пожежі в адміністративному приміщенні дорівнює $v_{\ell}^0 = 1,2 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}$.

2. Розраховуємо радіус розвитку пожежі на заданий час ($\tau_{\text{ввл}} > 10 \text{ хв.}$) за формулою (4.2):

$$R_{\text{пож}(25)} = 10 \cdot 1,2 \cdot 0,5 + 1,2 \cdot (25 - 10) = 24 \text{ м.}$$

3. Визначаємо форму зони горіння залежно від розмірів приміщення та місця виникнення пожежі.

Оскільки радіус розвитку пожежі $R_{\text{пож}(25)} = 24 \text{ м}$ є більшим за відстань до ближчої стіни, то форма зони горіння у першому приміщенні – прямокутник. До того ж радіус розвитку пожежі є більшим за відстань до дверей, отже необхідно врахувати час їх вогнестійкості. З'ясуємо, чи прогорять двері? Для цього визначаємо відстань від осередку пожежі до дверей:

$$L = \sqrt{5^2 + 6^2} = 7,8 \text{ м.}$$

З'ясуємо, за який час фронт пожежі “пройде” цей шлях. За перші 10 хвилин фронт пожежі “пройде” з половинною швидкістю шлях $0,5 \cdot 1,2 \cdot 10 = 6 \text{ м}$. Шлях, який залишився, фронт пожежі поширюється із середньостатистичною швидкістю, тоді час, за який фронт пожежі досягне дверей, дорівнює:

$$\tau_{\text{дв}} = 10 + \frac{7,8 - 6}{1,2} = 11,5 \text{ хв.}$$

Фронт пожежі діє на двері $25 - 11,5 = 13,5 \text{ хв}$. Оскільки вогнестійкість дверей 10 хв., то пожежа поширюється у суміжне приміщення протягом 3,5 хв.

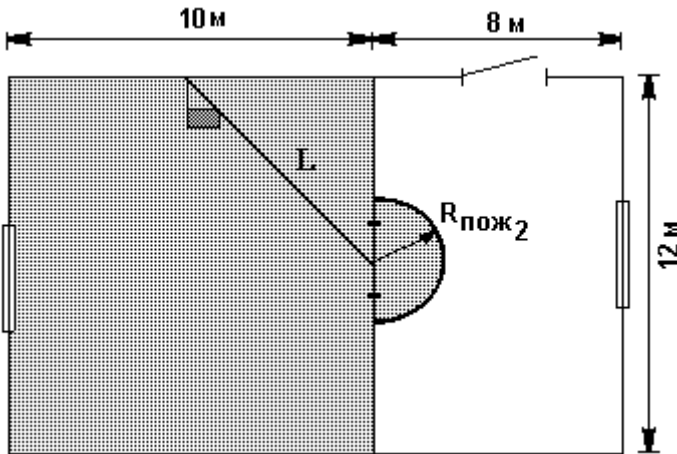
Розраховуємо радіус розвитку пожежі у суміжному

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

приміщенні:

$$R_{\text{пож}(3,5)} = 3,5 \cdot 1,2 = 4,2 \text{ м.}$$

Оскільки радіус розвитку пожежі в суміжному приміщенні менший за відстань до найближчої стіни, форма пожежі – півколо. Замальовуємо схему розвитку пожежі.



4. Визначаємо загальну площу і фронт пожежі.

Форма пожежі у першому приміщенні – прямокутник, площа пожежі визначається розмірами цього приміщення:

$$S_{\text{пож}(1)} = 10 \cdot 12 = 120 \text{ м}^2.$$

Форма пожежі у другому приміщенні – півколо,

площа пожежі визначається радіусом її розвитку:

$$S_{\text{пож}(2)} = \frac{\pi R_{\text{пож}(3,5)}^2}{2} = \frac{3,14 \cdot 4,2^2}{2} = 27,7 \text{ м}^2.$$

Загальна площа пожежі дорівнює сумі:

$$S_{\text{пож}} = S_{\text{пож}(1)} + S_{\text{пож}(2)} = 120 + 27,7 = 147,7 \text{ м}^2.$$

Фронтом пожежі, тобто частиною периметра, де відбувається поширення горіння, є довжина дуги:

$$\Phi_{\text{пож}} = \pi R_{\text{пож}(3,5)} = 3,14 \cdot 4,2 = 13,2 \text{ м}.$$

Висновок: протягом 25 хв. вільного розвитку пожежі в адміністративному приміщенні заданого розміру двері прогорять, пожежа пошириться у суміжне приміщення. Загальна площа пожежі становитиме 147,7 м², фронт пожежі у суміжному приміщенні дорівнюватиме 13,2 м.

Методика розрахунку критичного часу розвитку пожежі в огороженні

1. За довідником [18] або таблицями, 10 додатків для заданої горючої речовини визначити такі параметри:

- питомий теоретичний об'єм повітря $v_{\text{пов}}^0$;
- коефіцієнт повноти згоряння η ;
- масову швидкість вигорання v_m ;

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

- масову теплоту згоряння Q'_n ;
 - середньостатистичну лінійну швидкість поширення пожежі v°_ℓ .
2. Розрахувати об'єм приміщення $V_{\text{прим}}$.
 3. Визначити первинну форму розвитку пожежі залежно від місця виникнення горіння.
 4. Розрахувати критичний час розвитку пожежі за температурою та вмістом кисню за формулами (4.20)–(4.25).

Приклад розв'язання задачі

У куті приміщення складу книжкової продукції розмірами $10 \times 6 \times 3,5$ м сталося загоряння. Визначити критичний час розвитку пожежі за температурою і вмістом кисню, якщо початкова температура у приміщенні становила 20°C .

Розв'язання

1. За довідником [18] для книгосховища знаходимо середньостатистичну лінійну швидкість поширення пожежі: $v^\circ_\ell = 0,5\text{--}1,0 \text{ м}\cdot\text{хв}^{-1}$ (приймаємо рівною $0,75 \text{ м}\cdot\text{хв}^{-1}$); для книг на стелажах визначаємо масову швидкість вигорання та теплоту згоряння: $v_m = 0,438 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{хв}^{-1}$, $Q'_n = 13400 \text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}$; для паперу визначаємо питомий теоретичний об'єм повітря та коефіцієнт повноти згоряння: $v^\circ_{\text{пов}} = 3,95 \text{ м}^3\cdot\text{кг}^{-1}$, $\eta = 0,97$.

2. Розраховуємо об'єм приміщення:

$$V_{\text{прим}} = 10 \cdot 6 \cdot 3,5 = 210 \text{ м}^3.$$

3. Через те що осередок виникнення горіння

знаходиться в куті приміщення, форма розвитку пожежі – чверть кола.

4. Розраховуємо критичний час розвитку пожежі за температурою і вмістом кисню для кутової форми пожежі за формулами (4.24), (4.25):

$$\tau_{\text{кр}}^t = 7,12 \sqrt[3]{\frac{210}{0,97 \cdot 13400 \cdot 0,438 \cdot 0,75^2}} = 2,9 \text{ хв.},$$

$$\tau_{\text{кр}}^{\text{O}_2} = 1,19 \sqrt[3]{\frac{210}{0,97 \cdot 0,438 \cdot 3,95 \cdot 0,75^2}} = 7,2 \text{ хв.}$$

Висновок: під час горіння паперу у приміщенні складу книжкової продукції критичне значення температури (70 °С) настане через 2,9 хв., а критичний вміст кисню (14 %) – через 7,2 хв.

Методика розрахунку температури пожежі та висоти нейтральної зони за значенням адіабатичної температури горіння

1. За довідником [18] або таблицями, 10 додатків для заданої горючої речовини визначити такі параметри:

- питомий теоретичний об'єм повітря $v_{\text{пов}}^0$;
- питомий теоретичний об'єм продуктів згоряння $v_{\text{пг}}^0$;
- коефіцієнт повноти згоряння η ;
- масову швидкість вигорання v_m ;
- масову теплоту згоряння Q'_n ;
- середньостатистичну лінійну швидкість поширення пожежі $v_{\text{л}}^0$.

2. Розрахувати радіус розвитку пожежі на заданий

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

момент часу за однією з формул (4.1)–(4.3).

3. Залежно від місця виникнення пожежі і розмірів приміщення визначити форму зони горіння та розрахувати площу пожежі на заданий момент часу.

4. Визначити $T_{\text{пож}}$ у першому наближенні, враховуючи співвідношення площі пожежі до площі підлоги даного приміщення $S_{\text{пож}}/S_{\text{підл}}$:

$$T_{\text{пож}} = 298 + 1200 \frac{S_{\text{пож}}}{S_{\text{підл}}}, \text{ К.} \quad (4.38)$$

5. Визначити умови газообміну: загальну площу розкритих отворів, що працюють на приплив і виток повітря.

Вважати, що розкриваються отвори, які потрапляють у зону горіння або за умови досягнення середньооб'ємної температури у приміщенні вище 300 °С. У разі розташування отворів на різних рівнях, на приплив повітря працюють нижні отвори, а на вихід – верхні.

6. Розрахувати густину повітря назовні та газового середовища у приміщенні залежно від їх температури та молярної маси μ_r за формулою:

$$\rho_r = \frac{\mu_r}{22,4(1 + 0,00367 \cdot t)}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (4.39)$$

або з урахуванням відмінності тиску середовища від стандартного значення:

$$\rho_r = \frac{\mu_r P}{2269(1 + 0,00367 \cdot t)}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}. \quad (4.40)$$

7. Розрахувати теоретичну витрату повітря $g_{\text{теор}}$, що

необхідне для повного згоряння речовини на даній площі пожежі, за формулою (4.34).

8. Розрахувати фактичну витрату повітря $g_{\text{факт}}$, з якою відбувається рух газів у приміщенні, залежно від умов газообміну за формулами (4.29)–(4.32).

9. Розрахувати коефіцієнт надлишку повітря за формулою (4.33).

10. Розрахувати фактичний питомий об'єм продуктів згоряння з урахуванням надлишку повітря за формулою:

$$v_{\text{пр}} = v_{\text{пр}}^0 + (\alpha - 1)v_{\text{пов}}^0, \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

11. Розрахувати приведену масову швидкість вигорання речовини залежно від часу розвитку пожежі:

$$v_{\text{м}}(\tau) = v_{\text{м}} \left(0,3 + 0,7 \sqrt{\frac{\tau_{\text{пож}}}{30}} \right), \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1}. \quad (4.41)$$

12. Розрахувати середньооб'ємну теплоємність газового середовища у приміщенні під час пожежі:

$$c_{\text{р}}'' = 1,25 + \left(0,12 + \frac{0,1}{0,25 + \alpha} \right) \frac{T_{\text{пож}}}{1000}, \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}. \quad (4.42)$$

13. Розрахувати значення приведеного ступеня чорноти системи “полум'я – поверхня конструкції”:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1 + 0,0022(T_{\text{пож}} - 273)}. \quad (4.43)$$

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

14. Визначити повну поверхню теплообміну.

За поверхню теплообміну вважати поверхню огорожуючих конструкцій $S_{\text{огор}}$, яку визначають як суму поверхонь стін, підлоги і стелі, що сприймають тепловий потік. Якщо пожежа відбувається в декількох суміжних приміщеннях, то площу огорожуючих конструкцій можна визначати як суму площ конструкцій кожного приміщення:

$$S_{\text{огор}} = \sum_i S_{\text{огор}_i} = \sum_i 2(l_i b_i + l_i h_i + b_i h_i), \text{ м}^2, \quad (4.44)$$

де l_i , b_i , h_i – геометричні розміри i -го приміщення, м.

15. Розрахувати адіабатичну температуру горіння за формулою (4.26).

16. Розрахувати температуру пожежі у приміщенні на заданий час розвитку за формулою (4.27).

17. Провести порівняння розрахованої температури пожежі із попередньо заданими значеннями температури у першому наближенні. За умови розбіжності більше 5 % необхідно задатися новим значенням температури пожежі й повторити розрахунок. Отримане значення температури пожежі приймають за друге наближення.

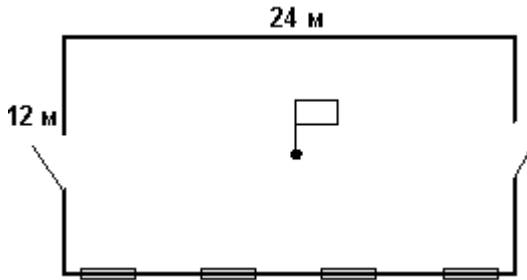
18. Визначити координати x і y точки приміщення, в якій визначають температуру газового середовища. Початок відліку приймають від осередку пожежі згідно рис. 4.2.

19. Розрахувати значення температури в заданій точці приміщення на заданий час вільного розвитку пожежі за формулою (4.28).

20. Розрахувати висоту нейтральної зони залежно від умов газообміну за формулами (4.35) або (4.36).

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати температуру пожежі та температуру газового середовища на рівні середини дверей приміщення бібліотеки на 9-ту хвилину вільного розвитку пожежі. Розміри приміщення 12 мх24 мх4,2 м, віконні отвори мають розміри 3 мх1,8 м, дверні отвори – розміри 1,8 мх2,2 м. Вважати, що двері й вікна знаходяться на одному рівні. Пожежною навантагою є книги на стелажах. Осередок пожежі та розташування отворів показано на плані. Температура навколишнього середовища дорівнює 25 °С.



Розв'язання

1. За довідником [18] для книгосховища знаходимо середньостатистичну лінійну швидкість поширення пожежі: $v_{\ell}^{\circ} = 0,5 \div 1,0 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}$ (приймаємо рівною $0,8 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}$); для книг на стелажах визначаємо масову швидкість вигорання та теплоту згорання: $v_m = 0,438 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1}$, $Q'_n = 13400 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$; для паперу визначаємо питомий теоретичний об'єм повітря, продуктів горіння та коефіцієнт повноти згорання: $v_{\text{пов}}^{\circ} = 3,95 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$, $v_{\text{пр}}^{\circ} = 4,64 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$; $\eta = 0,97$.

2. Розраховуємо радіус пожежі на 9-ту хвилину вільного розвитку за формулою (4.1):

$$R_{\text{пож}(9)} = 0,5 \cdot 0,8 \cdot 9 = 3,6 \text{ м}.$$

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

3. Визначаємо форму зони горіння. На дев'ятій хвилині фронт пожежі не дійшов до стін, отже форма розвитку пожежі – кругова. Розраховуємо площу пожежі $S_{\text{пож}}$ на 9-ту хвилину вільного розвитку за формулою (4.8):

$$S_{\text{пож}} = \pi R^2 = 3,14 \cdot 3,6^2 = 40,7 \text{ м}^2.$$

4. Визначаємо $T_{\text{пож}}$ у першому наближенні за формулою (4.38):

$$S_{\text{підл}} = 24 \cdot 12 = 288 \text{ м}^2;$$

$$T_{\text{пож}} = 298 + 1200 \frac{40,7}{288} = 467 \text{ К.}$$

5. Визначаємо умови газообміну та площу розкритих отворів.

На 9-тій хвилині пожежа не дійшла до вікон, а середньооб'ємна температура газового середовища не досягла $300 \text{ }^\circ\text{C}$, отже, вважаємо, що газообмін здійснюється тільки через дві відкриті двері. Загальна площа дверних отворів дорівнює:

$$S_{\text{дв}} = 1,8 \cdot 2,2 \cdot 2 = 7,9 \text{ м}^2.$$

6. Розраховуємо густину повітря ззовні та газового середовища у приміщенні за формулою (4.39):

$$\rho_{\text{пов}} = \frac{29}{22,4 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 25)} = 1,18 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$\rho_{\text{шт}} = \frac{29}{22,4 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 194)} = 0,76 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

7. Розраховуємо теоретичну витрату повітря $g_{\text{теор}}$, що необхідне для повного згоряння речовини на даній площі пожежі, за формулою (4.34):

$$g_{\text{теор}} = 0,97 \cdot 40,7 \cdot \frac{0,438}{60} \cdot 3,95 \cdot 1,18 = 1,34 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

8. Розраховуємо фактичну витрату повітря $g_{\text{факт}}$, з якою відбувається рух газів через отвори, що знаходяться на одному рівні, за формулою (4.31):

$$g_{\text{факт}} = \frac{2}{3} \cdot 0,64 \cdot 7,9 \sqrt{\frac{2 \cdot 9,8 \cdot 2,2 \cdot 1,18 \cdot 0,76(1,18 - 0,76)}{(1,18^{0,33} + 0,76^{0,33})^3}} = 4,9 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

9. Розраховуємо коефіцієнт надлишку повітря за формулою (4.33):

$$\alpha = \frac{4,9}{1,34} = 3,7.$$

10. Розраховуємо фактичний питомий об'єм продуктів згоряння з урахуванням надлишку повітря:

$$v_{\text{шт}} = 4,64 + (3,7 - 1) \cdot 3,95 = 15,3 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

11. Розраховуємо приведену масову швидкість вигорання речовини за формулою (4.41):

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

$$v_m = 0,438 \cdot \left(0,3 + 0,7 \sqrt{\frac{9}{30}} \right) = 0,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1}.$$

12. Розраховуємо середню об'ємну теплоємність газового середовища у приміщенні за формулою (4.42):

$$c_p'' = 1,25 + \left(0,12 + \frac{0,1}{0,25 + 3,7} \right) \frac{467}{1000} = 1,32 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}.$$

13. Розраховуємо значення приведенного ступеня чорноти полум'я за формулою (4.43):

$$\epsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1 + 0,0022(467 - 273)} = 0,7.$$

14. Визначаємо поверхню теплообміну за площею поверхонь конструкцій, що огороджують пожежу, за формулою (4.44):

$$S_{\text{огор}} = 2 \cdot (12 \cdot 24 + 12 \cdot 4,2 + 24 \cdot 4,2) = 878 \text{ м}^2.$$

15. Розраховуємо адіабатичну температуру горіння за формулою (4.26):

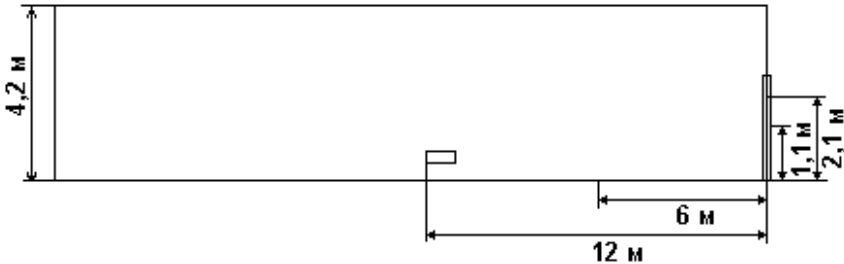
$$T_{\text{ад}} = \frac{0,97 \cdot 13400}{1,3 \cdot 15,3} + 298 = 951 \text{ К}.$$

16. Розраховуємо значення температури пожежі на 9-ту хвилину вільного розвитку за формулою (4.27):

$$T_{\text{пож}} = 18,1 \cdot 951 \cdot \left(\frac{0,97 \cdot 40,7 \cdot 0,3 \cdot 1,32 \cdot 15,3}{0,7 \cdot 878 \cdot 951^3} \right)^{0,17} = 444 \text{ К.}$$

17. Отримане значення температури пожежі 444 К не відрізняється від прийнятого значення у першому наближенні ($T_{\text{пож}} = 467 \text{ К}$) більше, ніж на 5 %, тому отримане значення обираємо для подальших розрахунків.

18. Визначаємо координати точки, що знаходиться на рівні середини дверного отвору, згідно рис. 4.2.



Координати середини дверного отвору: $x = 12 \text{ м}$; $y = 1,1 \text{ м}$. Значення $x_0 = 24 \cdot 0,25 = 6 \text{ м}$; $y_0 = 4,2 \cdot 0,5 = 2,1 \text{ м}$.

19. Розраховуємо значення температури газового середовища в точці, що знаходиться на рівні середини дверного отвору, на 9-ту хвилину вільного розвитку пожежі за формулою (4.28):

$$T_{x,y} = 444 \cdot \left(0,8 + 0,2 \frac{1,1}{2,1} \right) \cdot \left(1,33 - \frac{12}{2 \cdot 12 + 6} \right) = 374 \text{ К.}$$

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

Висновок: на 9-ту хвилину вільного розвитку пожежі в заданому приміщенні середньооб'ємна температура газового середовища становить 171°C , температура на рівні середини дверного отвору 101°C .

Методика розрахунку температури пожежі та висоти нейтральної зони з використанням номограм

1. За довідником [18] або таблицями, 10 додатків для заданої горючої речовини визначити такі параметри:

- питомий теоретичний об'єм повітря $v_{\text{пов}}^{\circ}$;
- питомий теоретичний об'єм продуктів згоряння $v_{\text{пр}}^{\circ}$;
- коефіцієнт повноти згоряння η ;
- масову швидкість вигорання $v_{\text{м}}$;
- масову теплоту згоряння $Q'_{\text{н}}$;
- середньостатистичну лінійну швидкість поширення пожежі v°_{ℓ} .

2. Розрахувати радіус розвитку пожежі на заданий момент часу за однією з формул (4.1) – (4.3).

3. Залежно від місця виникнення пожежі і розмірів приміщення визначити форму зони горіння та розрахувати площу пожежі на заданий момент часу.

4. Розрахувати площу підлоги та огорожуючих конструкцій у приміщенні відповідно до формули (4.44).

5. Визначити площу отворів, що працюють на приплив повітря.

Прийняти, що у разі розташування отворів на різних рівнях, на приплив працюють нижні отвори, а якщо отвори знаходяться на одному рівні, то на приплив повітря працює $1/3$ площі відкритих отворів.

6. Визначити коефіцієнт надлишку повітря α за

номограмою Номограма 12 додатків.

6.1. Розрахувати співвідношення площі пожежі до площі підлоги $S_{\text{пож}}/S_{\text{підл}}$ і, виходячи з отриманого значення, визначити вид кривої, а виходячи зі співвідношення площі припливного отвору до площі пожежі $S_{\text{прип}}/S_{\text{пож}}$, визначити номер кривої.

6.2. На осі абсцис номограми (додаток Номограма 12) відкласти значення питомого теоретичного об'єму повітря $v_{\text{пов}}^{\circ}$, від якого провести вертикаль до перетину із визначеною кривою (рис. 4.4).

6.3. Відповідне перетину значення на осі ординат показує значення коефіцієнта надлишку повітря.

Схему визначення коефіцієнта надлишку повітря із використанням номограми показано на рис. 4.4.

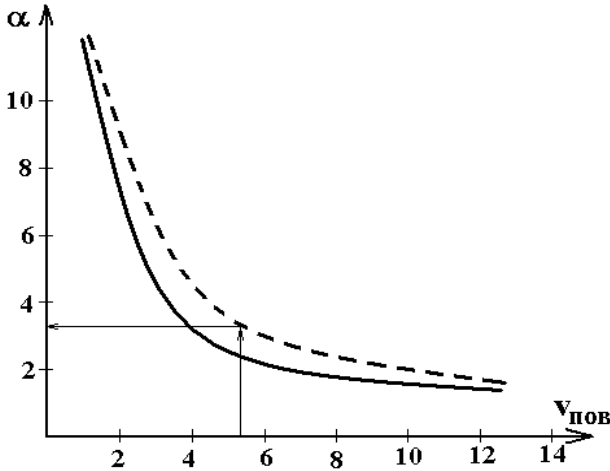


Рис. 4.4 – Схема визначення коефіцієнта надлишку повітря із використанням номограми

7. Розрахувати густину теплового потоку, що

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

потрапляє на одиницю площі поверхні огороджуючих конструкцій, за формулою (4.37).

8. Визначити середньооб'ємну температуру пожежі на заданий момент часу за допомогою номограми (додаток 13), виходячи з отриманих значень густини теплового потоку та коефіцієнта надлишку повітря.

8.1. Отримане за формулою (4.37) значення густини теплового потоку q відкладаємо на лівій осі номограми і рівновіддалено “рухаємося” уздовж графіка (1) $t = f(q)$ на вісь температур.

8.2. Рівновіддалено від найближчої кривої (2) $t = f(\alpha)$ опускаємося до перетину з перпендикуляром, проведеним з точки, що відповідає коефіцієнта надлишку повітря α , визначеному попередньо.

8.3. З отриманої точки перетину паралельно осі абсцис переміщуємося до перпендикуляра, проведеного з точки, що відповідає 30-тій хвилині.

8.4. Рівновіддалено від найближчої кривої (3) $t = f(\tau)$ переміщуємося до перпендикуляра, проведеного з точки відповідного часу розвитку пожежі.

8.5. Із отриманої точки перетину паралельно осі абсцис проводимо пряму на вісь температур і знаходимо значення температури пожежі в огороженні.

Схему визначення середньооб'ємної температури пожежі із використанням номограми показано на рис. 4.5.

9. Розрахувати висоту нейтральної зони залежно від умов газообміну за формулами (4.35) або (4.36).

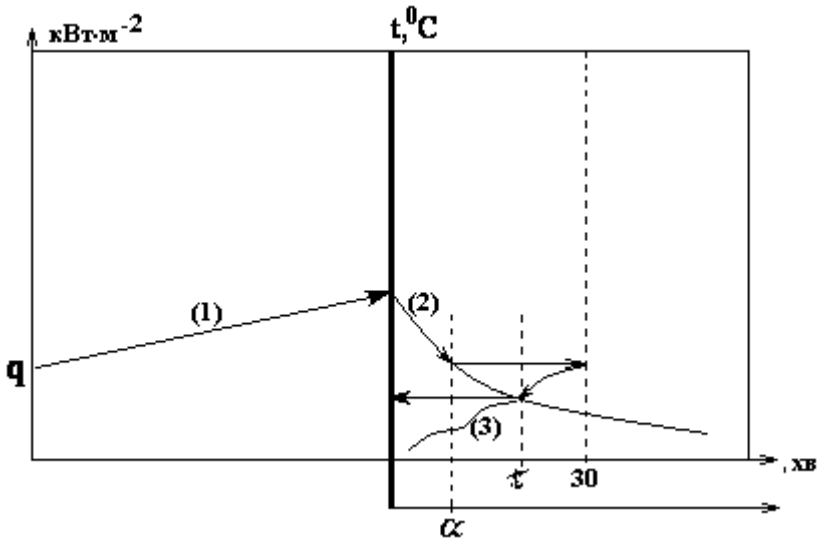


Рис. 4.5 – Схема визначення середньооб'ємної температури пожежі в огороженні за номограмою

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати температуру пожежі та висоту нейтральної зони на 15-ту хвилину вільного розвитку пожежі у складському приміщенні розмірами 18 м×48 м×5 м, якщо відбувається горіння виробів із пінополіуретану. Осередок виникнення пожежі знаходиться у центрі приміщення. Газообмін здійснюється через ворота висотою 2,5 м, шириною 2 м та три витяжні люки розмірами 1,5 м×1,5 м. Початкова температура повітря дорівнює 20 °С.

Розв'язання

1. Для пінополіуретану за таблицями, 10 додатків визначаємо середньостатистичну лінійну швидкість поширення пожежі $v_{\ell} = 1,2 \div 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ (для розра-

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

хунку обираємо середнє значення $1,3 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ або $0,8 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}$), масову теплоту згоряння $Q'_н = 24300 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$, масову швидкість вигорання $v_m = 15 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, питомий теоретичний об'єм повітря $v_{\text{пов}} = 6,0 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$, коефіцієнт повноти згоряння $\eta = 0,93$.

2. Розраховуємо радіус пожежі на 15-ту хвилину вільного розвитку за формулою (4.2):

$$R_{\text{пож}} = 5 \cdot 0,8 + 0,8(15 - 10) = 8 \text{ м.}$$

3. Визначаємо форму зони горіння. На п'ятнадцятій хвилині вільного розвитку фронт пожежі не дійшов до стін ($R_{\text{пож}} < 18/2$), отже форма розвитку пожежі – кругова. Розраховуємо площу пожежі $S_{\text{пож}}$ за формулою (4.8):

$$S_{\text{пож}(15)} = \pi R^2 = 3,14 \cdot 8^2 = 201 \text{ м}^2.$$

4. Розраховуємо площу підлоги та огорожуючих конструкцій у приміщенні за формулою (4.44):

$$S_{\text{підл}} = 18 \cdot 48 = 864 \text{ м}^2;$$

$$S_{\text{огор}} = 2(18 \cdot 48 + 18 \cdot 5 + 5 \cdot 48) = 2388 \text{ м}^2.$$

5. Визначаємо загальну площу розкритих отворів і площу отворів, що працюють на приплив повітря.

Через те що газообмін здійснюється через отвори, розташовані на різних рівнях, приплив повітря відбувається через відкриті двері, а вихід продуктів

горіння – через димові люки.

$$S_{\text{прип}} = 2,5 \cdot 2 = 5 \text{ м}^2;$$

$$S_{\text{вит}} = 1,5 \cdot 1,5 \cdot 3 = 6,75 \text{ м}^2.$$

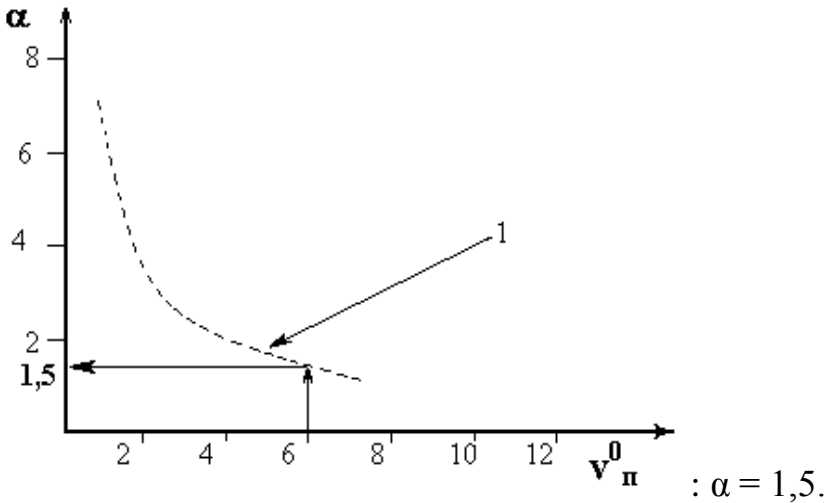
6. Розраховуємо співвідношення $S_{\text{пож}}/S_{\text{підл}}$, $S_{\text{прип}}/S_{\text{пож}}$ та визначаємо тип і номер кривої за номограмою Номограма 12 додатків:

$$\frac{S_{\text{пож}}}{S_{\text{підл}}} = \frac{201}{864} = 0,23 < 0,25, \text{ отже тип кривої – пунктирна;}$$

$$\frac{S_{\text{прип}}}{S_{\text{пож}}} = \frac{5}{201} = 0,03 < 0,04, \text{ отже номер кривої – № 1.}$$

7. Визначаємо коефіцієнт надлишку повітря за допомогою номограми Номограма 12 додатків.

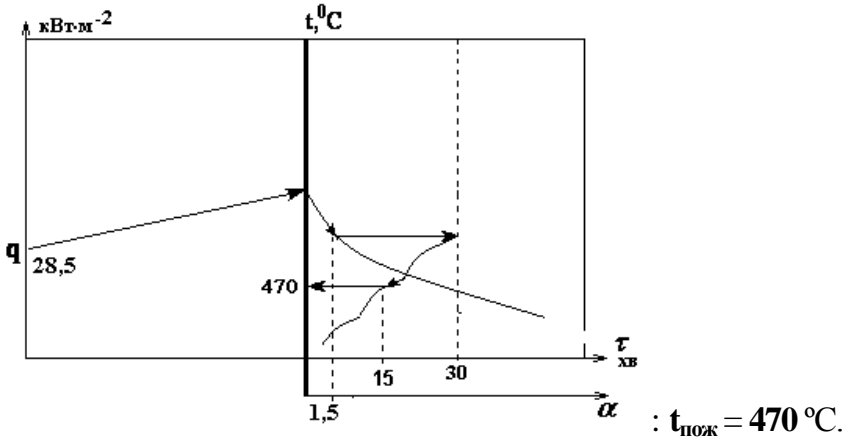
Розділ 4. Параметри розвитку пожежі



8. Розраховуємо величину густини теплового потоку за формулою (4.37):

$$q = \frac{0,93 \cdot 15 \cdot 10^{-3} \cdot 24300 \cdot 201}{2388} = 28,5 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}.$$

9. Визначаємо температуру пожежі на 15-ту хвилину вільного розвитку за отриманих значень густини теплового потоку та коефіцієнта надлишку повітря, користуючись номограмою 13 додатків.



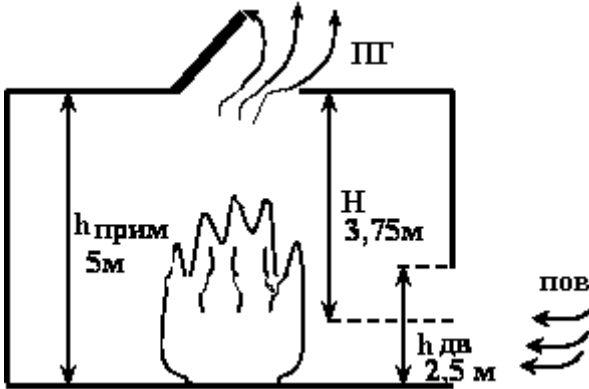
10. Розраховуємо висоту нейтральної зони за формулою (4.36), оскільки газообмін здійснюється через отвори, які знаходяться на різних рівнях.

$$H = 5 - \frac{2,5}{2} = 3,75 \text{ м.}$$

$$h_{\text{нз}} = \frac{3,75}{\left(\frac{5}{6,75}\right)^2 \cdot \frac{743}{293} + 1} + 0,5 \cdot 2,5 = 2,8 \text{ м.}$$

Замальовуємо схему газообміну у приміщенні.

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі



Висновок: під час пожежі пінополіуретану у складському приміщенні на 15-ту хвилину вільного розвитку за даних умов газообміну температура пожежі становитиме $470\text{ }^{\circ}\text{C}$, а висота нейтральної зони – $2,8\text{ м}$.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Для відкритих складів матеріалів, наведених у таблиці, за вказаних умов розрахувати:

а) площу та фронт пожежі;

б) радіус можливого розльоту іскор (прийняти швидкість витання розжарених часток матеріалу рівною $9 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$).

№	Матеріал, що горить	Час вільного горіння, хв.	Швидкість вітру, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
1	пиломатеріали вологістю до 16 %	70	6
2	-- / --	35	8
3	пиломатеріали вологістю 16 – 18 %	45	10
4	-- / --	60	15
5	пиломатеріали вологістю 18 – 20 %	30	5
6	-- / --	55	9
7	пиломатеріали вологістю 20 – 30 %	15	7
8	-- / --	40	10
9	пиломатеріали вологістю більше 30 %	50	12
10	торф кусковий вологістю до 25 %	45	11
11	-- / --	40	8
12	-- / --	25	15
13	-- / --	35	10
14	-- / --	15	12
15	торф фрезерний	60	6
16	-- / --	50	11
17	-- / --	40	8
18	-- / --	30	15
19	-- / --	10	10
20	-- / --	35	5

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

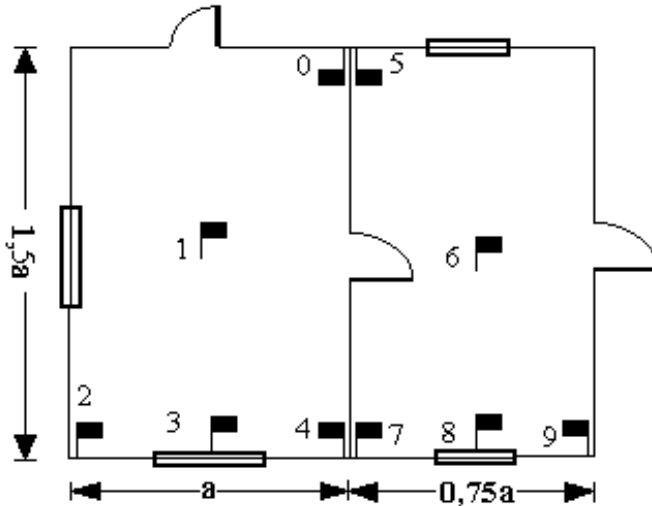
2. Розрахувати площу та фронт лісової пожежі за умов, наведених у таблиці.

№	Швидкість вітру на висоті 2 м, м·с ⁻¹	Час розвитку пожежі, годин	Густина горючого шару підстилки, кг·м ⁻³	Вологість горючого шару підстилки, %	Коефіцієнт чорноти полум'я
1	7,0	0,5	2,8	20	0,3
2	1,5	1,0	5,2	40	0,18
3	5,0	3,0	3,0	25	0,35
4	2,0	1,5	2,5	35	0,22
5	3,0	5,0	1,7	30	0,4
6	2,5	1,0	2,0	20	0,34
7	5,0	2,0	4,5	35	0,3
8	3,5	3,0	3,4	25	0,38
9	7,0	2,5	5,0	40	0,35
10	4,0	1,5	4,2	25	0,26
11	5,0	0,5	2,8	20	0,4
12	4,5	1,0	3,3	30	0,45
13	3,0	5,0	3,0	25	0,3
14	5,5	3,0	2,5	40	0,4
15	5,0	5,0	1,7	30	0,45
16	6,0	1,5	4,1	20	0,36
17	7,0	2,0	4,5	35	0,25
18	6,5	1,0	2,8	25	0,28
19	5,0	2,5	5,0	40	0,14
20	2,0	3,0	4,4	30	0,44
21	3,5	1,5	3,5	25	0,36
22	4,5	2,0	2,7	10	0,27
23	4,0	0,3	1,9	18	0,4
24	2,5	3,5	2,2	32	0,31
25	3,0	2,3	3,9	15	0,22

Глава 1. Параметри розвитку пожеж класу А

3. Для приміщення, схему і параметри якого наведено нижче, розрахувати на задані моменти часу:

- а) площу, фронт та периметр пожежі;
- б) ймовірність прогорання дверей із заданою вогнестійкістю.



№ варіанта	Вид приміщення	Місце виникнення пожежі	Параметр а, м.	Вогнестійкість дверей, хв.	Час розвитку, хв.	
					τ_1	τ_2
1	адміністративна споруда	8	4	10	5	15
2	--/--	6	6	12	8	22
3	музей	5	5	15	7	20
4	--/--	9	7	12	9	28
5	друкарня	7	6	20	9	25
6	--/--	1	10	10	6	32
7	бібліотека	4	4,5	25	8	30

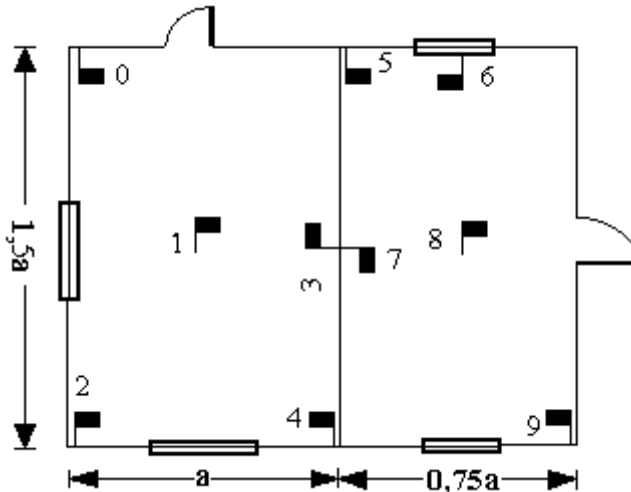
Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

№ варіанта	Вид приміщення	Місце виникнення пожежі	Параметр а, м.	Вогнестійкість дверей, хв.	Час розвитку, хв.	
					τ_1	τ_2
8	-- / --	3	6	10	9	25
9	школа II ступеня вогнестійкості	0	5,5	20	6	35
10	-- / --	2	8	12	9	28
11	лікарня III ступеня вогнестійкості	8	4	10	7	15
12	-- / --	6	6	15	5	26
13	житловий будинок	5	4	15	6	20
14	-- / --	9	5	10	8	24
15	торговельне підприємство	7	6	20	9	30
16	-- / --	1	8	14	7	32
17	текстильне виробництво	4	4,5	25	8	30
18	-- / --	3	8	15	9	24
19	склад паперу	0	5,5	30	10	35
20	-- / --	2	7	15	9	22
21	лісопилльні цехи	8	12	10	10	25
22	-- / --	6	10	10	8	20
23	книгосховище	5	6	15	6	30
24	-- / --	9	8	12	10	25
25	цех виготовлення фанери	7	8	15	12	20
26	-- / --	1	12	10	8	26
27	виставкова зала	4	8	20	6	30
28	-- / --	3	10	10	9	20
29	цех сушіння деревини	0	12	15	7	28
30	-- / --	2	14	12	10	18

4. Для приміщення, схему і параметри якого наведено нижче, розрахувати:

а) критичний час розвитку пожежі за температурою і вмістом кисню з урахуванням місця виникнення пожежі;

б) температуру пожежі на задані моменти часу з урахуванням адіабатичної температури горіння й газообміну у приміщенні (вважати, що двері й вікна знаходяться на одному рівні, а витяжні люки знаходяться у стелі приміщення).



Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

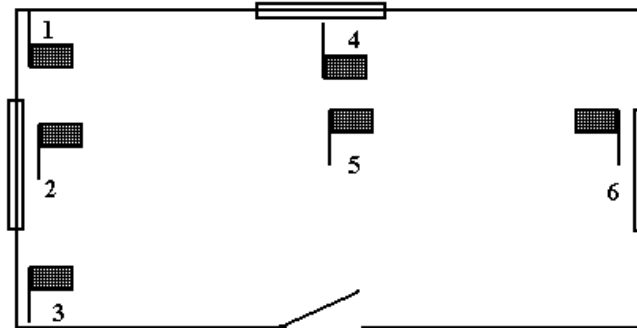
№ варіанта	Вид горючої речовини	Місце виникнення пожежі	Параметр а, м	Лнійна швидкість поширення пожежі, м/хв.	Час вільного розвитку пожежі, хв.	Висота приміщення, м	Розмір отворів, м		
							вікно	двері	ВИТЯЖНИЙ ЛЮК
1	папір	5	4	0,6	12	3,0	1,2×1,5	0,9×2,0	-
2	бавовна	9	5	0,8	7	3,5	1,4×1,6	0,8×2,2	1,0×1,5
3	деревина у виробках	6	6	1,1	8	4,0	1,5×1,8	1,0×2,2	1,0×1,2 (2 шт)
4	книги на стелажах	8	4,5	0,9	15	3,0	1,3×1,6	0,9×1,9	-
5	гумотехнічні вироби	1	10	0,6	6	4,0	1,5×1,7	1,1×2,0	1,0×1,1(2 шт)
6	каучук синтетичний	3	12	0,7	5	3,5	1,4×1,6	0,9×1,9	-
7	пінополіуретан	2	10	0,6	7	4,5	1,5×1,7	0,9×2,1	1,5×1,7
8	волокно штапельне	7	8	1,0	18	4,0	1,2×1,5	1,1×2,0	1,0×1,1 (2 шт)
9	поліпропілен	4	10	0,7	14	3,5	1,4×1,7	0,9×2,2	-
10	каучук натуральний	0	12	0,8	7	3,0	1,5×1,8	1,0×2,1	1,1×1,3 (2 шт)
11	папір	9	9	0,5	12	2,5	1,4×1,6	0,9×2,1	1,0×1,5
12	бавовна	6	7	0,8	20	3,0	1,3×1,6	0,9×2,2	-
13	деревина у виробках	1	8	1,0	13	3,5	1,5×1,8	1,1×2,0	-

Глава 1. Параметри розвитку пожеж класу А

№ варіанта	Вид горючої речовини	Місце виникнення пожежі	Параметр а, м	Лнійна швидкість поширення пожежі, м/хв.	Час вільного розвитку пожежі, хв.	Висота приміщення, м	Розмір отворів, м		
							вікно	двері	ВИТЯЖНИЙ ЛЮК
14	книги на стелажах	7	6	0,9	9	2,5	1,4×1,6	0,9×2,1	-
15	гумотехнічні вироби	3	11	1,0	10	4,0	1,5×2,0	1,2×2,2	1,0×1,2(2 шт)
16	кіноплівка	0	5	0,6	18	4,0	1,4×1,7	1,1×2,0	-
17	полістирол	1	6	1,0	14	3,5	1,6×1,6	0,9×1,9	1,0×1,5
18	поліпропілен	2	7	0,7	7	4,5	1,4×1,6	0,9×2,1	1,0×1,1
19	капролактам	3	8	0,8	12	4,0	1,3×1,6	1,1×2,0	-
20	поліетилен	4	9	0,5	20	3,5	1,5×1,8	0,9×2,2	1,5×1,7
21	кіноплівка	5	10	0,8	13	3,0	1,2×1,6	1,0×2,1	-
22	папір	6	11	1,0	9	2,5	1,5×2,0	1,5×2,1	-
23	бавовна	7	12	1,2	10	3,0	1,3×1,6	0,9×2,2	0,5×0,5
24	капролактам	8	13	1,3	5	3,5	1,4×1,9	1,1×2,0	-
25	поліетилен	9	14	1,4	15	3,0	1,3×1,6	0,9×2,3	-

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

5. Для приміщення, схему і параметри якого наведено нижче, розрахувати:
- а) температуру пожежі на задані моменти часу з використанням номограм;
 - б) висоту нейтральної зони на задані моменти часу з урахуванням схеми газообміну (вважати, що двері й вікна знаходяться на одному рівні, а за наявності витяжних люків газообмін здійснюється через отвори на різних рівнях).



Глава 1. Параметри розвитку пожеж класу А

№ варіанта	Вид горючої речовини	Місце виникнення пожежі	Параметр а, м.	Лінійна швидкість поширення пожежі м/хв.	Час вільного розвитку пожежі, хв.	Висота приміщення, м	Розмір отворів, м		
							вікно	двері	ВИТЯЖНИЙ ЛЮК
1	папір	5	6	0,6	6	3,0	1,2×1,5	0,9×2,0	-
2	каучук синтетичний	2	10	1,1	10	5,0	2,0×2,2	2,2×2,2	1,0×1,1(4 шт)
3	пінополіуретан	4	12	0,8	12	4,0	1,6×2,0	1,5×2,2	-
4	волокно штапельне	3	8	0,9	15	6,0	2,2×2,5	2,5×3,0	1,0×1,5(2 шт)
5	поліпропілен	1	4	1,0	6	5,5	2,0×2,5	2,5×2,2	-
6	каучук натуральний	3	9	1,5	14	6,0	2,0×2,0	3,0×2,5	1,0×1,0(5 шт)
7	гумотехнічні вироби	5	7	0,7	8	4	1,2×1,4	0,9×2,0	1,0×1,5(4 шт)
8	меблі з деревини	2	6	1,4	12	3,5	1,3×1,4	2,2×2,2	1,1×1,1(4 шт)
9	капролактам	4	10	1,0	6	5	1,3×1,5	1,5×2,2	-
10	полістирол	3	12	1,6	14	4,5	1,2×1,5	2,5×3,0	-
11	каучук синтетичний	1	8	1,0	9	3,8	2,2×1,4	2,5×2,2	-
12	папір	3	4	1,8	5	2,8	2,3×1,3	3,0×2,5	-
13	меблі з деревини	5	9	1,9	7	3,0	2,0×1,3	0,9×2,0	1,0×1,0(2 шт)

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

№ варіанта	Вид горючої речовини	Місце виникнення пожежі	Параметр а, м.	Лінійна швидкість поширення пожежі м/хв.	Час вільного розвитку пожежі, хв.	Висота приміщення, м	Розмір отворів, м		
							вікно	двері	ВИТЯЖНИЙ ЛЮК
14	поліпропілен	2	7	1,5	6	3,0	2,0×1,5	2,2×2,2	-
15	гумотехнічні вироби	4	5	1,2	4	2,8	1,2×1,4	3,0×2,5	1,1×1,1(2 шт)
16	кіноплівка	1	14	0,8	12	4	1,4×1,5	1,1×2,2	-
17	полістирол	1	13	0,5	6	3,5	1,6×1,4	1,4×1,9	1,3×1,5
18	поліпропілен	5	12	0,8	14	5	1,4×1,2	0,9×2,3	1,4×1,4
19	капролактам	3	11	1,0	9	4,5	1,3×1,4	1,3×2,0	-
20	поліетилен	4	10	1,2	5	3,8	1,5×1,6	0,9×2,4	0,5×1,7
21	кіноплівка	5	9	1,3	7	2,8	1,2×1,4	1,2×2,1	-
22	папір	6	8	1,0	6	3,0	1,5×2,8	1,5×2,3	-
23	бавовна	5	7	1,8	9	4,5	1,3×1,4	0,9×2,4	0,5×0,8
24	капролактам	4	6	1,9	15	6,0	1,4×1,7	1,0×2,0	-
25	поліетилен	3	5	1,5	7	4	1,3×1,4	0,9×2,0	-

ГЛАВА 2. ПАРАМЕТРИ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖІ КЛАСУ В

Пожежа класу В може виникнути внаслідок запалювання пароповітряного середовища, що утворюється над поверхнею рідини, яка, у свою чергу, може знаходитися у технологічному обладнанні (резервуарах, технологічних апаратах) або у вигляді розливу, що стався внаслідок аварійної ситуації.

Ймовірність виникнення пожежі всередині технологічного обладнання з горючими рідинами обумовлюється можливістю утворення горючої пароповітряної суміші й одночасної появи джерел запалювання в його внутрішньому газовому просторі.

Умова утворення горючої пароповітряної суміші у *внутрішньому просторі* резервуара визначається співвідношенням:

$$\Phi_{\text{н}} \leq \Phi_{\text{факт}} \leq \Phi_{\text{в}},$$

де $\Phi_{\text{н}}$ і $\Phi_{\text{в}}$ – відповідно нижня і верхня концентраційні межі поширення полум'я горючої рідини;

$\Phi_{\text{факт}}$ – фактична концентрація пари горючої рідини за даних умов.

За появи джерела запалювання всередині резервуара можливе виникнення горіння пароповітряного середовища і повне його вигорання у кінетичному режимі – вибух.

У *зовнішньому просторі* горюче середовище може виникнути:

- внаслідок виходу пари горючої рідини через

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

дихальні пристрої технологічного обладнання;

- внаслідок випаровування рідини при аварійному розливі горючої рідини.

Внаслідок дифузії пари у навколишнє середовище утворюється пароповітряна хмара. За умови, що фактична концентрація пари у пароповітряній хмарі перевищує нижню концентраційну межу поширення полум'я і в цій хмарі з'явиться джерело запалення, виникне горіння.

§ 1. 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 так зване “*мале дихання*” за рахунок зміни інтенсивності пароутворення з відкритої поверхні рідини. Під час заповнення резервуара горючою рідиною змінюється внутрішній об'єм газового простору, при цьому відбувається так зване “*велике дихання*” за рахунок витиснення пари назовні.

Пожежонебезпечна загазованість території виникає переважно внаслідок “великого дихання”, під час якого відбувається хоч і короткочасний, але потужний викид пари. За 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***. Згідно [32] *діаметр зони загазованості*, що утворюється внаслідок “великого дихання”, з урахуванням розміру резервуара можна визначити за формулою:

$$D_{\text{заг}} = D_{\text{рез}} + 10H_{\text{рез}} \left(\frac{g\varphi_{\text{факт}}}{\varphi_n H_{\text{рез}}^2} \right)^{0,86}, \text{ м}, \quad (4.45)$$

де $H_{\text{рез}}$ – висота резервуара, м;

$D_{\text{рез}}$ – діаметр резервуара, м;

g – об’ємна витрата, з якою закачують рідину в резервуар, $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$;

φ_n – нижня концентраційна межа поширення полум’я даної рідини, %;

$\varphi_{\text{факт}}$ – фактична концентрація насиченої пари рідини за даних умов, %.

Поява джерела запалювання в цій зоні призведе до об’ємного запалювання пари із вибухом.

За аварійного виходу горючих рідин із технологічного обладнання площа, що займає розлив рідини, обумовлюється об’ємом розлитої рідини, рельєфом місцевості і властивостями ґрунту і може бути визначена за формулою:

$$S_{\text{розл}} = \eta \frac{g_{\text{вит}} \tau_{\text{вит}}}{\rho_{\text{рід}} h_{\text{рід}}}, \text{ м}^2, \quad (4.46)$$

де η – коефіцієнт, що враховує ступінь просочення ґрунту;

$g_{\text{вит}}$ – витрата витоку 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 витоку, с.

У разі відсутності довідникових або інших експериментальних даних площу випаровування при

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

розливі на горизонтальну поверхню визначають виходячи з припущення, що 1 л сумішей і розчинів, які містять 70 % і менше (по масі) розчинників, розливається на площі 0,1 м², а 1 л інших рідин – на площі 0,15 м² [34].

З поверхні розливу відбувається випаровування рідини у навколишнє середовище. *Інтенсивність випаровування у відкритий простір* можна визначити за емпіричним рівнянням [34]:

$$I_{\text{вип}} = 10^{-6} P_{\text{нп}} \mu_{\text{рід}} (0,734 + 1,637 v_{\text{пов}}), \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (4.47)$$

де $\mu_{\text{рід}}$ – молярна маса рідини, кг·кмоль⁻¹;

$P_{\text{нп}}$ – тиск насиченої пари за даної температури, кПа;

$v_{\text{пов}}$ – швидкість руху повітря над поверхнею випаровування, м·с⁻¹.

Загальна маса горючої речовини, що утворює пароповітряну хмару, з урахуванням часу та площі випаровування може бути визначена за формулою:

$$m_{\text{пар}} = I_{\text{вип}} S_{\text{розл}} \tau_{\text{вип}}, \text{ кг}, \quad (4.48)$$

де $\tau_{\text{вип}}$ – час, протягом якого рідина випаровується у навколишній простір з вільної поверхні аварійного розливу, с;

$S_{\text{розл}}$ – площа розливу рідини на поверхні, не здатній до просочування, м².

Пароповітряна хмара, в якій горюча речовина має густину більшу, ніж густина повітря, має дископодібну або сигароподібну форму. *Горизонтальний розмір зони загазованості* розраховують за формулою [34]:

$$R_{\text{заг}} = 3,15 \sqrt{\frac{\tau_{\text{вип}}}{3600} \left(\frac{P_{\text{нп}}}{\varphi_{\text{н}}} \right)^{0,813} \left(\frac{m_{\text{пар}}}{\rho_{\text{пар}} P_{\text{нп}}} \right)^{0,333}}, \text{ м}, \quad (4.49)$$

де $\tau_{\text{вип}}$ – час випаровування рідини (але не більше 3600 с), с;

$\rho_{\text{пар}}$ – густина пари за даних умов (температури й атмосферного тиску), $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

$m_{\text{пар}}$ – маса пари, що випарувалися за час $\tau_{\text{вип}}$, кг.

Горіння зовнішньої частини пароповітряної хмари, в якій концентрація горючої речовини знаходиться в межах від нижньої до верхньої концентраційної межі поширення полум'я, протікає у вибуховому режимі. Для наближеного оцінювання параметрів вибуху пароповітряної хмари на відкритому просторі приймають участь у вибуху 2 % (максимально 10 %) теплоти згорання речовини, що випарувалась. Максимально можливий коефіцієнт корисної дії вибуху паро-газової хмари під час сферичної детонації становить близько 40 %. Решта енергії залишається у нагрітих продуктах згорання. Частка енергії, що переходить у енергію ударної хвилі під час дефлаграції, менша, ніж під час детонації, і становить близько 30 % [26].

Потужність вибуху можна оцінити у порівнянні зі стандартним вибухом одного кілограма тринітротолуолу. *Тротиловий еквівалент вибуху* $W_{\text{тнт}}$ пароповітряних систем розраховують за формулою:

$$W_{\text{тнт}} = \frac{0,3Q'_{\text{н}}}{0,9Q_{\text{тнт}}} m_{\text{пар}} z, \text{ кг}, \quad (4.50)$$

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

де 0,3 і 0,9 – відповідно частка енергії, що витрачається на формування ударної хвилі під час вибуху пароповітряної хмари і тринітротолуолу;

$m_{\text{пар}}$ – маса речовини, що утворила пароповітряну хмару, кг;

z – коефіцієнт участі пари у вибуху, що обирають залежно від умов вибуху; якщо горіння відбувається в незамкненому просторі, $z = 0,1$;

Q'_n – питома масова теплота згорання горючої речовини, кДж·кг⁻¹;

$Q_{\text{ТНТ}}$ – питома масова енергія вибуху тринітротолуолу, 4520 кДж·кг⁻¹.

Вибух пароповітряної хмари супроводжується підвищенням тиску. Величину *надлишкового тиску* ΔP , що створюється в ударній хвилі під час згорання такої хмари на відкритому просторі, можна розрахувати за формулою [34]:

$$\Delta P = P_o \left(0,8 \frac{W_{\text{ТНТ}}^{0,33}}{r} + 3 \frac{W_{\text{ТНТ}}^{0,66}}{r^2} + 5 \frac{W_{\text{ТНТ}}}{r^3} \right), \text{кПа}, \quad (4.51)$$

де P_o – атмосферний тиск, кПа;

r – відстань від епіцентру вибуху парогазової хмари, м.

Надлишковий тиск, що виникає в ударній хвилі, може спричинити руйнування будівель і технологічних установок, травмування і загибель людей. До травмування і загибелі людей можуть призводити і вторинні явища вибухів, такі як ураження уламками будівельних конструкцій, скла, частинами технологічного обладнання та інше. Наслідки дії

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу В

ударної хвилі на людину залежно від величини надлишкового тиску вибуху наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Вплив надлишкового тиску на людину

Надлишковий тиск у фронті ударної хвилі ΔP , кПа	Рівень ураження людини
500 – 800	безумовно смертельне ураження
350 – 500	летальний кінець у 50 % випадків
200 – 300	поріг смертельного ураження
130 – 200	важкий ступінь ураження легенів, 50 % розривів барабанних перетинок
30 – 50	механічне ураження від руйнування будівель і конструкцій

Можливу руйнівну дію ударної хвилі під час вибуху можна оцінити на підставі узагальнених експериментальних даних [26, 35]. Для надзвичайних ситуацій, що викликані вибухами, при оперативному прогнозуванні обстановки прийнято розглядати чотири ступеня руйнування будівель: слабкий, середній, сильний та повний (табл. 4.2).

В таблиці 4.3 приведені інтервали тисків, що викликають той чи інший ступінь руйнування житлових, громадських і виробничих будівель при вибухах вибухових речовин та горючих сумішей.

Таблиця 4.2 - Характеристика ступенів руйнування будівель

Ступінь руйнування	Характеристика руйнування
Слабкий	Часткове руйнування внутрішніх перегородок, покриття, дверних та віконних рам, легких конструкцій та ін. Основні несучі

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

	конструкції зберігаються. Для повного відновлення потрібен капітальний ремонт.
Середній	Руйнування меншої частини несучих конструкцій. Більша частина несучих конструкцій зберігається й лише частково деформуються. Може зберігатися частина огорожувальних конструкцій – стін, проте, при цьому другорядні та несучі конструкції можуть бути частково зруйновані. Будівля виходить з ладу, але може бути відновлена.
Сильний	Руйнування більшої частини несучих конструкцій. При цьому можуть зберігатися найбільш стійкі елементи будівлі, каркасу, частково стіни та перекриття нижніх поверхів. При сильному руйнуванні утворюється завал. Відновлення можливе з використанням частин та конструктивних елементів, що збереглися.
Повний	Повне обвалення будівлі, від якого можуть зберегтися лише пошкоджені (або непошкоджені) підвали й незначна частина стійких елементів. При повному руйнуванні утворюється завал. Будівля відновленню не підлягає.

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу В

Таблиця 4.3 Ступінь руйнування будівель від надлишкового тиску вибуху горючих сумішей

Типи будівель	Ступінь руйнування та надлишковий тиск, кПа			
	Слабкий	Середній	Сильний	Повний
1	2	3	4	5
Цегляні та кам'яні: малоповерхові	8 - 20	20 - 35	35 - 50	50 - 70
багатоповерхові.	8 - 15	15 - 30	30 - 45	45 - 60
Залізобетонні крупнопанельні: малоповерхові	10 - 30	30 - 45	45 - 70	70 - 90
багатоповерхові	8 - 25	25 - 40	40 - 60	60 - 80
Залізобетонні монолітні: багатоповерхові, підвищеної поверховості	25 - 50 25 - 45	50 - 115 45 - 105	115-180 105-170	180 - 250 170 - 215
Залізобетонні крупнопанельні крановим обладнанням під'ємністю: : до 50 т від 50 до 100 т	5 - 30 15 - 45	30 - 45 45 - 60	45 - 75 60 - 90	75 - 120 90 - 135
Будівлі зі стінами типу «сандвіч» і крановим обладнанням вантажепід'ємністю до 20 т	10 - 30	30 - 50	50 - 65	65 - 105
Складські приміщення з металевим каркасом і стінами з листового металу	5 - 10	10 - 20	20 - 35	35 - 45

Зоною руйнування і можливого травмування персоналу вважають площу з прийнятим для розрахунком центром вибуху і радіусом R. Межа зони обумовлена величиною надлишкового тиску по фронту ударної хвилі ΔP і відповідним безрозмірним коефіцієнтом рівня впливу

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

вибуху K_1 . Для практичних розрахунків *радіус зон ураження* визначають за апроксимаційною формулою:

$$R_{\text{ураж}} = \frac{K_1 \sqrt[3]{m_{\text{пар}}}}{\left[1 + \left(\frac{3180}{m_{\text{пар}}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{6}}}, \text{ м}, \quad (4.52)$$

де K_1 – коефіцієнт рівня впливу вибуху визначають за табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Вплив надлишкового тиску вибуху на будівельні конструкції

Надлишковий тиск у фронті ударної хвилі ΔP , кПа	Коефіцієнт K_1	Характеристика дії ударної хвилі
100	3,8	повне руйнування будівель
70	5,6	руйнування 50 % ÷ 75 % стін
28	9,6	область значних пошкоджень конструктивних елементів, що несуть навантаження
14	28,0	область незначних пошкоджень (розриви з'єднань і розчленування конструкцій)
2	56,0	руйнування до 10 % віконного скла

За умови тривалого випаровування легкозаймистих рідин усередині пароповітряної хмари концентрація горючої речовини може перевищувати верхню концентраційну межу поширення полум'я. У цьому випадку в кінетичному режимі згоряє тільки зовнішня частина зони загазованості, а інша частина хмари буде

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу В

вигоряти у дифузійному режимі [34]. При цьому утвориться так звана *вогнева сфера*, радіус якої можна визначити за формулою:

$$R_{\text{вс}} = 2,66m_{\text{пар}}^{0,327}, \text{ м}, \quad (4.53)$$

де $m_{\text{пар}}$ – маса пари, що надійшла в навколишній простір внаслідок випаровування, кг.

Час існування вогненної сфери визначають за формулою:

$$\tau_{\text{вс}} = 0,92m_{\text{пар}}^{0,303}, \text{ с}. \quad (4.54)$$

Теплове випромінювання вогненної сфери зумовлює поширення пожежі й ураження людей (опіки) аж до летальних наслідків [34]. У зоні впливу вогненної сфери відбувається практично миттєве згоряння більшості тканих матеріалів, шкіри людини. Опіки відкритих ділянок шкіри виникають вже за умови, що густина теплового потоку більша $q_{\text{min}} = 1,4 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$.

Для виконання практичних розрахунків *радіуси зони ураження тепловим опроміненням* визначають за формулою:

$$R_{\text{оп}} = K_2 R_{\text{вс}}, \text{ м}, \quad (4.55)$$

де $R_{\text{вс}}$ – радіус вогненної сфери, м;

K_2 – коефіцієнт рівня впливу теплового опромінення, обирають за таблицею 4.5.

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

Таблиця 4.5 – Вплив теплового випромінювання вогненної сфери на людину

Коефіцієнт відповідного рівня впливу теплового опромінення K_2	Рівень ураження людини
2,3	50 % смертельних наслідків
3,04	1 % смертельних наслідків
5,5	утворення пухирів на шкірі

Методика розрахунку діаметра зони загазованості території за рахунок "великого дихання" резервуара

1. Визначити нижню концентраційну межу поширення полум'я горючої рідини за довідником [7] або розрахувати за формулами (3.4)–(3.10).

2. Розрахувати тиск насиченої пари горючої рідини $P_{\text{нп}}$ за даних умов за однією із формул (3.28) або (3.29).

3. Розрахувати фактичну концентрацію пари горючої рідини за даних умов за формулою (3.26).

4. Розрахувати діаметр зони загазованості за формулою (4.45). Зробити висновок щодо імовірності розвитку надзвичайної ситуації.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати фактичну концентрацію насиченої пари всередині резервуара та діаметр зони вибухонебезпечної загазованості, що утворилася внаслідок "великого дихання" резервуара під час закачування до нього бензину А-72 з витратою $0,08 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, якщо температура навколишнього середовища дорівнює 17°C , атмосферний тиск – 98 кПа. Діаметр резервуара дорівнює 12 м, висота резервуара – 9 м.

Розв'язання

1. Визначаємо за табл. 6 додатків для бензину А-72

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу В

нижню концентраційну межу поширення полум'я та константи Антуана: $\varphi_n = 1,08 \%$; $A = 4,195$; $B = 682,88$; $C_a = 222,07$.

2. Розраховуємо тиск насиченої пари бензину за температури 17°C за рівнянням Антуана (3.28):

$$P_{\text{нп}} = 10^{4,195 - \frac{682,88}{222,07 + 17}} = 21,8 \text{ кПа.}$$

3. Розраховуємо фактичну концентрацію насиченої пари бензину А-72 за формулою (3.26):

$$\varphi_{\text{факт}} = \frac{21,8 \cdot 100}{98} = 22,2 \%.$$

4. Розраховуємо діаметр зони загазованості внаслідок "великого дихання" резервуара:

$$D_{\text{заг}} = 12 + 10 \cdot 9 \cdot \left(\frac{0,08 \cdot 22,2}{1,08 \cdot 9^2} \right)^{0,86} = 15,2 \text{ м.}$$

Висновок: фактична концентрація пари бензину А-72 всередині резервуара за температури 17°C і тиску 98 кПа дорівнює 22,2 %. Діаметр зони загазованості внаслідок "великого дихання" резервуара під час закачування бензину А-72 із витратою $0,08 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ дорівнює 15,2 м. Поява джерела запалювання в цій зоні призведе до об'ємного загорання пари бензину із вибухом.

Методика розрахунку параметрів горіння

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

пароповітряної хмари на відкритому просторі

1. Визначити масу рідини, що випарувалася.

1.1. Розрахувати тиск насиченої пари рідини за даної температури за однією із формул (3.28) або (3.29).

1.2. Розрахувати інтенсивність випаровування рідини за формулою (4.47).

1.3. Визначити площу розливу, з якої відбувається випаровування рідини, за формулою (4.46) або згідно практичних рекомендацій, викладених вище.

1.4. Визначити площу розливу, з якої відбувається випаровування рідини, за формулою (4.48).

2. Визначити радіус зони загазованості, що утворилася під час випаровування рідини за час $\tau_{\text{вип}}$.

2.1. Розрахувати густину пари рідини за даної температури за формулою (4.39) або (4.40).

2.2. Визначити нижню концентраційну межу поширення полум'я рідини за довідником [7] або розрахувати за формулами (3.4)–(3.10).

2.3. Розрахувати радіус зони вибухонебезпечної загазованості за формулою (4.49).

3. Визначити тротиловий еквівалент вибуху пароповітряної суміші.

3.1. Розрахувати масову теплоту згоряння речовини (див. частину 1, розділ 1, глава 2).

3.2. Визначити коефіцієнт участі пари у вибуху.

3.3. Розрахувати тротиловий еквівалент пароповітряної хмари за формулою (4.50).

4. Розрахувати величину надлишкового тиску ΔP , що створюється в ударній хвилі під час згоряння парогазової хмари, на заданій відстані за формулою (4.51).

5. Розрахувати радіус ураження ударною хвилею

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу В

залежно від надлишкового тиску за формулою (4.52).

6. Розрахувати параметри ураження вогневою сферою: радіус вогненної сфери – за формулою (4.53), час життя вогненної сфери – за формулою (4.54), радіус опіків – за формулою (4.55).

За результатами розрахунку зробити висновок.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати горизонтальний розмір зони вибухонебезпечної загазованості, тротиловий еквівалент вибуху та радіус незначних ушкоджень будівельних конструкцій ударною хвилею у разі вибуху пароповітряної хмари, що утворилась під час випаровування етилацетату $C_4H_8O_2$ у відкритий простір із поверхні аварійного розливу 25 м^2 , якщо час випаровування дорівнює 40 хв. (2400 с), швидкість вітру – $1,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, температура навколишнього середовища дорівнює $15 \text{ }^\circ\text{C}$.

Розв'язання

1. Визначаємо масу етилацетату, що випарувалася за даних умов.

1.1. Розраховуємо тиск насиченої пари етилацетату за температури $15 \text{ }^\circ\text{C}$ за формулою (3.28). Визначаємо константи Антуана для етилацетату за довідником [7]: $A = 6,2267$; $B = 1244,95$; $C_a = 217,88$.

$$P_{\text{ни}} = 10 \left(6,2267 - \frac{1244,95}{15 + 217,88} \right) = 7,6 \text{ кПа.}$$

1.2. Розраховуємо інтенсивність випаровування етилацетату за даних умов за формулою (4.47):

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

$$\mu_{\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2} = 12 \cdot 4 + 1 \cdot 8 + 16 \cdot 2 = 88 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1};$$

$$I_{\text{вип}} = 88 \cdot 7,6(0,734 + 1,637 \cdot 1,5) \cdot 10^{-6} = 2,13 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

1.3. Розраховуємо масу рідини, що випарувалася, з урахуванням площі розливу та часу випаровування за формулою (4.48):

$$m_{\text{пар}} = 2,13 \cdot 10^{-3} \cdot 25 \cdot 2400 = 128 \text{ кг}.$$

2. Визначаємо радіус зони вибухонебезпечної загазованості, що утворилася внаслідок випаровування аварійного розливу етилацетату протягом 2400 с.

2.1. Розраховуємо густину пари етилацетату за температури 15 °C за формулою (4.39):

$$\rho_{\text{пар}} = \frac{88}{22,4 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 15)} = 3,72 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

2.2. Визначаємо нижню концентраційну межу поширення полум'я етилацетату за довідником [7]:
 $\varphi_{\text{н}} = 2 \%$.

2.3. Розраховуємо горизонтальний розмір зони вибухонебезпечної загазованості за формулою (4.49):

$$R_{\text{заг}} = 3,15 \sqrt{\frac{2400}{3600}} \left(\frac{7,6}{2} \right)^{0,8} \left(\frac{128}{3,72 \cdot 7,6} \right)^{0,33} = 12 \text{ м}.$$

3. Визначаємо тротиловий еквівалент вибуху пароповітряної суміші етилацетату.

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу В

3.1. Розраховуємо масову теплоту згоряння етилацетату за формулою (1.52):

$$Q'_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{гор}} \cdot 1000}{\mu_{\text{гр}}}, \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

Визначаємо молярну теплоту згоряння етилацетату за довідником [7]: $Q_{\text{н}} = 2078 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$.

$$Q'_{\text{н}} = \frac{2078 \cdot 1000}{88} = 23614 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

3.2. Через те що випаровування рідини відбувається у відкритий простір, коефіцієнт участі пари у вибуху $z = 0,1$.

3.3. Розраховуємо тротильовий еквівалент вибуху пароповітряної хмари за формулою (4.50):

$$W_{\text{тнт}} = \frac{0,3 \cdot 23614}{0,9 \cdot 4520} \cdot 128 \cdot 0,1 = 22,3 \text{ кг}.$$

4. Розраховуємо радіус незначних ушкоджень будівельних конструкцій ударною хвилею ($\Delta P = 14 \text{ кПа}$, $K_1 = 28,0$) за формулою (4.52):

$$R_{\text{ураж}} = \frac{28 \cdot \sqrt[3]{128}}{\left[1 + \left(\frac{3180}{128} \right)^2 \right]^{\frac{1}{6}}} = 48,5 \text{ м}.$$

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

Висновок: горизонтальний розмір зони загазованості, що утворилась внаслідок випаровування етилацетату у відкритий простір протягом 40 хвилин за температури 15 °С, дорівнює 12 м, тротиловий еквівалент вибуху пароповітряної хмари становитиме 22,3 кг, радіус незначних ушкоджень будівельних конструкцій ударною хвилею вибуху дорівнює 48,5 м.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати радіус зони можливих опіків відкритих ділянок шкіри людини під час згоряння пароповітряної хмари, що утворилась внаслідок випаровування гексану у відкритий простір із поверхні аварійного розливу площею 10 м², якщо час випаровування дорівнює 30 хв. (1800 с), швидкість вітру – 1,2 м·с⁻¹, температура навколишнього середовища – 25 °С.

Розв'язання

1. Визначаємо масу гексану, що випарувалася за даних умов.

1.1. Розраховуємо тиск насиченої пари гексану за температури 25 °С за формулою (3.28).

Визначаємо константи Антуана для гексану за довідником [7]: $A = 5,9952$; $B = 1166,27$; $C_a = 223,66$.

$$P_{\text{нас}} = 10^{\left(5,9952 - \frac{1166,27}{25 + 223,66}\right)} = 20,2 \text{ кПа.}$$

1.2. Розраховуємо інтенсивність випаровування гексану за даних умов за формулою (4.47):

$$\mu_{C_6H_{14}} = 12 \cdot 6 + 1 \cdot 14 = 86 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1};$$

$$I_{\text{вип}} = 86 \cdot 20 \cdot (0,734 + 1,637 \cdot 1,2) \cdot 10^{-6} = 4,64 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

1.3. Розраховуємо масу гексану, що випарувалася, з урахуванням площі розливу та часу випаровування за формулою (4.48):

$$m_{\text{пар}} = 4,64 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 1800 = 83,5 \text{ кг}.$$

2. Розраховуємо радіус вогненної сфери та час її життя за формулами (4.53), (4.54):

$$R_{\text{вс}} = 2,66 \cdot (83,5)^{0,327} = 11,3 \text{ м};$$

$$\tau_{\text{вс}} = 0,92 \cdot (83,5)^{0,303} = 3,5 \text{ с}.$$

3. Розраховуємо радіус опіків відкритих ділянок шкіри тепловим випромінюванням вогненної сфери з утворенням пухирів на шкірі за формулою (4.55):

$$R_{\text{оп}} = 5,5 \cdot 11,3 = 62,2 \text{ м}.$$

Висновок: опіки відкритих ділянок шкіри людини під час згоряння пароповітряної хмари гексану можливі на відстані до 62,2 м.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати надлишковий тиск в ударній хвилі, що виникає внаслідок вибуху пароповітряної хмари бензину А-72 (зимовий), на відстані 30 м, якщо відбувається

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

випаровування бензину у відкритий простір із поверхні 5 м² протягом 25 хв. (1500 с), швидкість вітру 1,2 м·с⁻¹, атмосферний тиск – 101 кПа, температура навколишнього середовища дорівнює 10 °С.

Розв'язання

1. Визначаємо із таблиці 6 додатків для бензину А-72 (зимовий) молярну масу $\mu = 97,2$ кг, нижню об'ємну концентраційну межу поширення полум'я $\varphi_n = 1,08$ %, константи Антуана: $A = 4,195$, $B = 682,88$, $C_a = 222,07$, нижчу масову теплоту згорання $Q'_n = 44239$ кДж·кг⁻¹.

2. Визначаємо масу бензину А-72 (зимовий), що випарувалася за даних умов.

2.1. Розраховуємо тиск насиченої пари бензину А-72 (зимовий) за температури 10 °С за формулою (3.28):

$$\lg P_{\text{нп}} = 4,195 - \frac{682,88}{(10 + 222,07)} = 1,25;$$

$$P_{\text{нп}} = 10^{1,25} = 17,8 \text{ кПа.}$$

2.2. Розраховуємо інтенсивність випаровування бензину А-72 (зимовий) за даних умов за формулою (4.47):

$$I_{\text{вип}} = 17,8 \cdot 97,2(0,734 + 1,637 \cdot 1,2) \cdot 10^{-6} = 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

2.3. Розраховуємо масу рідини, що випарувалася, з урахуванням площі розливу та часу випаровування за формулою (4.48):

$$m_{\text{пар}} = 4,7 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 1500 = 35,2 \text{ кг.}$$

3. Розраховуємо тротиловий еквівалент вибуху бензину А-72 (зимовий) за формулою (4.50) з урахуванням, що коефіцієнт участі пари у вибуху на відкритому просторі дорівнює 0,1:

$$W_{\text{тнт}} = \frac{0,3 \cdot 44239}{0,9 \cdot 4520} \cdot 35,2 \cdot 0,1 = 11,5 \text{ кг.}$$

4. Розраховуємо надлишковий тиск в ударній хвилі на відстані 30 м за формулою (4.51):

$$\Delta P = 101 \left(0,8 \frac{11,5^{0,33}}{30} + 3 \frac{11,5^{0,66}}{30^2} + 5 \frac{11,5}{30^3} \right) = 7,7 \text{ кПа.}$$

Висновок: надлишковий тиск в ударній хвилі, що виникає внаслідок вибуху пароповітряної хмари бензину А-72 (зимовий) за даних умов, на відстані 30 м дорівнює 7,7 кПа, що зумовить незначні пошкодження будівельних конструкцій та руйнування віконного скла.

§ 2. Вигорання горючих рідин під час пожежі. Явища спінювання і викиду

Під час пожежі резервуара відбувається вигорання рідин та їх прогрівання у глибину за рахунок тепла, що передається від зони горіння променистим тепловим потоком.

Процес вигорання характеризується швидкістю вигорання. Розрізняють масову і лінійну швидкість вигорання.

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

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

$$v_m = \frac{dm}{Sd\tau}, \text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1}. \quad (4.56)$$

Лінійна швидкість вигорання – висота шару рідини, що вигоряє за одиницю часу (зміна висоти шару горючої рідини за одиницю часу в процесі вигорання):

$$v_l = \frac{v_m}{\rho} = \frac{dh}{d\tau}, \text{м} \cdot \text{хв}^{-1}. \quad (4.57)$$

У початковий період швидкість вигорання поступово підвищується, зростає висота факела полум'я, яка залежить від діаметру резервуара і виду горючої рідини.

Приблизно через 10 хвилин горіння настає стабілізація: швидкість вигорання і розмір полум'я залишаються незмінними.

Зазвичай швидкість вигорання рідини визначається експериментальним шляхом, однак це вимагає значних матеріальних витрат. Для оцінки швидкості вигорання рідини використовують рівняння теплового балансу:

$$Q_{\text{нагр}} = v_m \Delta H_{\text{вип}} + v_{\text{прогр}} c_p (t_{\text{кип}} - t_0), \text{кДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

При сталому горінні швидкість вигорання визначається швидкістю нагрівання і випаровування рідини. Саме частка тепла, що випромінюється полум'ям на поверхню горючої рідини, і йде на її нагрівання і випаровування. Прийmemo, що швидкості вигорання і прогрівання близькі, тобто $v_m = v_{\text{прогр}}$, тоді:

$$v_m = \frac{Q_{\text{нагр}}}{\Delta H_{\text{вип}} + c_p (t_{\text{кип}} - t_o)}. \quad (4.58)$$

У горючих рідин, які мають високу теплоту пароутворення і велику теплопровідність, швидкість вигорання є меншою, ніж швидкість прогрівання у глибину. При сталому вигоранні таких матеріалів з часом утворюється так званий *гомотермічний шар* – поверхневий шар рідини з однаковою температурою, близькою до температури кипіння.

Формування нагрітого гомотермічного шару і наявність води, яка завжди міститься в тій або іншій кількості в самій нафті й на дні резервуара, є причиною виникнення особливо небезпечних явищ, супутніх пожежам нафти і деяких нафтопродуктів у резервуарах, – спінювання й викид палаючої рідини.

Краплі води можуть знаходитися у завислому стані в товщі горючої рідини, а можуть (за умови тривалого зберігання нафти у резервуарі) осідати на дно й утворювати придонний шар.

Спінювання – перехід у пару значної кількості дрібних краплин води, що знаходяться у вигляді емульсії у нафтопродукті, й пов’язана з цим поява на поверхні рідини піни, що горить, яка може переливатися через борт резервуара, поширюючи горіння на сусідні ділянки.

При вигоранні важких нафтопродуктів у резервуарах з придонним шаром води з часом можливе прогрівання до температури кипіння всієї маси горючої рідини, аж до водяної подушки. Кипіння води при цьому не відбувається, оскільки на неї тисне шар горючої рідини. Вода

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

нагрівається вище за температуру кипіння. У процесі вигорання рідини знижується її тиск на водяний шар і, як тільки тиск пари води зрівняється із тиском стовпа горючої рідини, відбувається бурхливе закипання перегрітої води придонного шару.

Викид – миттєвий перехід у пару води, яка знаходиться у придонному шарі нафтопродукту, і пов'язане із цим виштовхування із резервуара палаючої рідини на значну відстань.

Проміжок часу від початку горіння до настання викиду визначається швидкістю прогрівання й вигорання нафти і практично дорівнює часу, протягом якого прогрітий гомотермічний шар нафти досягає придонного шару води. Розрахувати час до викиду можна за формулою:

$$\tau_{\text{вик}} = \left(\frac{H_{\text{гр}} - h_{\text{H}_2\text{O}}}{v_{\text{виг}} + v_{\text{прог}}} \right) \cdot 3600, \text{ годин}, \quad (4.59)$$

де $v_{\text{виг}}$ – лінійна швидкість вигорання рідини, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$;

$v_{\text{прог}}$ – швидкість прогрівання горючої рідини, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$;

$H_{\text{гр}}$ – рівень наповнення резервуара, м;

$h_{\text{H}_2\text{O}}$ – висота придонного шару води, м.

Характерними ознаками початку викиду є виникнення вібрації стінок резервуара, що супроводжується шумом, і зростання розмірів факела полум'я.

Спінювання і викид у процесі горіння рідини являють собою велику небезпеку, оскільки раптово викинута палаюча рідина може уразити велику площу поблизу осередку горіння разом із людьми і технікою, призначеною для гасіння.

Приклад розв'язання задачі

Визначити час до можливого викиду нафти під час пожежі резервуара, якщо рівень його наповнення становить 8 м, а висота придонного шару води – 0,8 м.

Розв'язання

1. Для нафти із таблиці додатків знаходимо лінійну швидкість вигорання $v_{\text{виг}} = 28 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ і швидкість прогрівання $v_{\text{прог}} = 83 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

2. Розраховуємо час до можливого викиду нафти за формулою (4.59):

$$\tau_{\text{вик}} = \frac{8 - 0,8}{(28 + 83) \cdot 3600} \cdot 10^6 = 18 \text{ годин.}$$

Висновок: викид нафти під час горіння даного резервуара можливий через 18 годин.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати лінійну швидкість вигорання бензолу із вільної поверхні за температури навколишнього середовища 10 °С. Прийняти, що швидкості прогрівання і вигорання рівні, а кількість тепла, яку отримує рідина від полум'я, дорівнює $35 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Розв'язання

1. Із довідників [7, 9] знаходимо теплофізичні характеристики бензолу: температура кипіння – 80 °С, густина – $873,6 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, питома теплота випаровування – $30,7 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ ($393,9 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$), питома теплоємність – $81,59 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ($1,05 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$).

2. Розраховуємо масову швидкість вигорання рідини за формулою (4.58):

$$v_m = \frac{35}{393,9 + 1,05(80 - 10)} = 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ кг м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

3. Виходячи із величини масової швидкості вигорання, розраховуємо лінійну швидкість вигорання за формулою (4.57):

$$v_\ell = \frac{7,5 \cdot 10^{-2}}{873,6} = 8,6 \cdot 10^{-5} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Висновок: лінійна швидкість вигорання бензолу за температури 10 °С дорівнює $8,6 \cdot 10^{-5} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ або $0,5 \text{ см} \cdot \text{хв}^{-1}$.

§ 3. Горіння пароповітряної суміші у приміщенні

Аварійне підвищення концентрації горючих речовин всередині приміщення може відбуватися під час розливу горючих рідин внаслідок розгерметизації технологічних ємностей. Пара горючої рідини розподіляється за висотою приміщення нерівномірно. Характер розподілу концентрації за висотою залежить від різниці молярних мас та коефіцієнта дифузії рідини й повітря за даної температури. Найбільша концентрація пари утворюється біля дзеркала рідини, оскільки пара рідин має більшу густину, ніж повітря. Безпосередньо над відкритою поверхнею рідини утворюється простір із насиченою парою, концентрація якої залежить від температури рідини. Зі збільшенням відстані від поверхні випаровування концентрація пари поступово зменшується. Через певний час розвитку аварійної ситуації у приміщенні виникає зона вибухонебезпечної загазованості, в якій концентрація пари горючої рідини перевищує нижню концентраційну межу поширення полум'я.

Горюча пара перемішується з повітрям під впливом

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу В

градієнта їх концентрацій за рахунок молекулярної дифузії та динамічного впливу конвекційних потоків, внаслідок чого з часом відбувається вирівнювання концентрації, а також проникнення горючих речовин у суміжні приміщення.

Можливість утворення вибухонебезпечних концентрацій в об'ємі приміщення на заданий момент часу, геометричні розміри зони вибухонебезпечних концентрацій залежать від площі аварійного розливу, інтенсивності випаровування і розмірів приміщення.

Згідно [30] інтенсивність випаровування рідини $I_{\text{вип}}$ у приміщенні розраховують за емпіричною формулою:

$$I_{\text{вип}} = \xi P_{\text{нп}} \sqrt{\mu} \cdot 10^{-6}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (4.60)$$

де μ – молярна маса рідини, $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$;

$P_{\text{нп}}$ – тиск насиченої пари рідини за даної температури, кПа ;

ξ – коефіцієнт, який залежить від швидкості руху і температури повітря біля поверхні випаровування, обирають за таблицею 4.6.

Таблиця 4.6 – Значення коефіцієнта ξ залежно від швидкості руху і температури повітря біля поверхні випаровування

Швидкість повітря, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	Температура повітря у приміщенні, $^{\circ}\text{C}$				
	< 12	12÷17	17÷25	25÷32	> 32
$v_{\text{пов}} = 0$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$0 < v_{\text{пов}} \leq 0,15$	3,0	2,6	2,4	1,8	1,6
$0,15 < v_{\text{пов}} \leq 0,3$	4,6	3,8	3,5	2,4	2,3
$0,3 < v_{\text{пов}} \leq 0,7$	6,6	5,7	5,4	3,6	3,2
$0,7 < v_{\text{пов}}$	10,0	8,7	7,7	5,6	4,6

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

Масу рідини, що перейде у пару за час випаровування, розраховують за формулою (4.48).

Площу випаровування у разі розливу рідини на підлогу визначають (за відсутності довідникових даних) виходячи з припущення, що 1 л сумішей та розчинів, які містять 70 % і менше (по масі) розчинників, розливається на площі $0,5 \text{ м}^2$, а 1 л інших рідин – на 1 м^2 підлоги приміщення [30].

При відносно тривалому випаровуванні пара речовини розподіляється у вільному об'ємі приміщення й утворює певну середню концентрацію, яку можна визначити за формулами:

$$\text{масова: } \varphi'_{\text{сер}} = \frac{m_{\text{пар}}}{V_{\text{вільн}}} = \frac{m_{\text{пар}}}{V_{\text{прим}}(1-\eta)}, \text{ кгм}^{-3}, \quad (4.61)$$

$$\text{об'ємна: } \varphi_{\text{сер}} = \frac{100m_{\text{пар}}}{\rho_{\text{пар}} V_{\text{прим}}(1-\eta)}, \%, \quad (4.62)$$

де $\varphi'_{\text{сер}}$, $\varphi_{\text{сер}}$ – відповідно масова та об'ємна середня концентрація речовини у вільному об'ємі приміщення;

$V_{\text{прим}}$ – загальний об'єм приміщення, м^3 ;

$m_{\text{пар}}$ – маса речовини, що випарувалась з вільної поверхні за час $\tau_{\text{вип}}$, кг;

η – частка об'єму приміщення, зайнята обладнанням або меблями.

Масу рідини, яка при повному випаровуванні утворить у даному приміщенні визначену концентрацію пари $\varphi'_{\text{пар}}$, можна розрахувати за формулою:

$$m_{\text{рід}} = \varphi'_{\text{пар}} V_{\text{прим}}(1-\eta), \text{ кг.} \quad (4.63)$$

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу В

Із формул (4.48), (4.63) можна визначити час, протягом якого за даних температури, тиску і площі розливу утвориться визначена концентрація пари рідини в об'ємі приміщення:

$$\tau_{\text{вип}} = \frac{\varphi'_{\text{пар}} V_{\text{прим}} (1 - \eta)}{I_{\text{вип}} S_{\text{розл}}}, \text{ с.} \quad (4.64)$$

Зазвичай за критичний приймають час, протягом якого у приміщенні утвориться середня концентрація пари, рівна нижній концентраційній межі поширення полум'я.

Час, за який станеться повне випаровування певної маси рідини за даних умов, можна визначити із формули (4.48):

$$\tau_{\text{вип}} = \frac{m_{\text{рід}}}{I_{\text{вип}} S_{\text{розл}}}, \text{ с.} \quad (4.65)$$

Якщо за час розвитку аварійної ситуації маса горючої пари не утворила вибухонебезпечної концентрації у всьому вільному об'ємі приміщення, необхідно з'ясувати розміри вибухонебезпечної зони. *Межі зони вибухонебезпечної загазованості* (горизонтальні розміри $X_{\text{нкмпп}}$, $Y_{\text{нкмпп}}$ та висоту від рівня розливу у приміщенні $Z_{\text{нкмпп}}$) розраховують за формулами:

$$X_{\text{нкмпп}} = 1,1958L \sqrt{\frac{\tau_{\text{вип}}}{3600} \ln \left(\frac{1,26\varphi_0}{\varphi_n} \right)}, \text{ м;} \quad (4.66)$$

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

$$Y_{\text{нкмпп}} = 1,1958F \sqrt{\frac{\tau_{\text{вип}}}{3600} \ln\left(\frac{1,26\varphi_0}{\varphi_n}\right)}, \text{ м}; \quad (4.67)$$

$$Z_{\text{нкмпп}} = K_1 H \sqrt{\frac{\tau_{\text{вип}}}{3600} \ln\left(\frac{1,26\varphi_0}{\varphi_n}\right)}, \text{ м}, \quad (4.68)$$

де H – висота приміщення, м;

L – довжина приміщення, м;

F – ширина приміщення, м;

K_1 – коефіцієнт, який за умови нерухомого газового середовища дорівнює 0,04714 і за умови рухомого газового середовища дорівнює 0,3536;

$\tau_{\text{вип}}$ – час випаровування рідини, с;

φ_n – об'ємна нижня концентраційна межа поширення полум'я даної речовини, %;

φ_0 – передекспоненціальний множник, %; визначають за формулою:

$$\varphi_0 = \varphi_{\text{нп}} \left(\frac{100m_{\text{пар}}}{\varphi_{\text{нп}}\rho_{\text{пар}}V_{\text{вільн}}} \right)^{K_2} = \varphi_{\text{нп}} \left(\frac{\varphi_{\text{сер}}}{\varphi_{\text{нп}}} \right)^{K_2}, \text{ \%}, \quad (4.69)$$

де $\varphi_{\text{нп}}$ – концентрація насиченої пари за даних умов, об. %, визначають за формулою (3.26);

$\varphi_{\text{сер}}$ – середня концентрація речовини у вільному об'ємі приміщення, %, визначають за формулою (4.62);

K_2 – коефіцієнт, що дорівнює у нерухомому газовому середовищі 0,41, у рухомому – 0,46.

За мінусових значень логарифмів у підкореновому виразі відстані $X_{\text{нкмпп}}$, $Y_{\text{нкмпп}}$ і $Z_{\text{нкмпп}}$ приймають рівними 0.

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу В

Якщо в зоні вибухонебезпечної загазованості виникне джерело запалювання, станеться вибух, надлишковий тиск якого у приміщенні заданих розмірів можна розрахувати за формулами:

- для індивідуальних горючих речовин, що складаються із атомів С, Н, О, N, Cl, Br, I, F:

$$\Delta P = (P_{\max} - P_o) \frac{100m_{\text{пар}} z}{V_{\text{вільн}} \rho_{\text{пар}} \varphi_{\text{стм}} K_n}, \text{кПа}, \quad (4.70)$$

де P_{\max} – максимальний тиск вибуху стехіометричної пароповітряної суміші в замкненому об'ємі, кПа,

P_o – атмосферний тиск, кПа;

$\varphi_{\text{стм}}$ – стехіометрична концентрація горючої речовини, об. %;

K_n – коефіцієнт, що враховує негерметичність приміщення та неадіабатичність процесу горіння; приймають рівним 3;

- для елементоорганічних індивідуальних рідин, а також для сумішей горючих рідин:

$$\Delta P = \frac{P_o Q'_n m_{\text{пар}} z}{V_{\text{вільн}} \rho_{\text{пов}} c_{p_{\text{пов}}} T_{\text{пов}} K_n}, \text{кПа}, \quad (4.71)$$

де Q'_n – масова теплота згоряння горючої речовини, кДж·кг⁻¹;

$\rho_{\text{пов}}$, $c_{p_{\text{пов}}}$, $T_{\text{пов}}$ – відповідно густина, теплоємність та початкова температура повітря до вибуху.

Коефіцієнт участі горючої пари легкозаймистих рідин

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

у вибуху у приміщенні для наближених розрахунків можна прийняти рівним 0,3.

Для приміщень у формі прямокутного паралелепіпеда з відношенням довжини до ширини не більше 5 за умови, що $\varphi_{\text{сер}} < 0,5\varphi_{\text{н}}$, коефіцієнт участі горючої пари легкозаймистих рідин у вибуху z можна розраховувати за формулами:

– за умови, що $X_{\text{нкмпп}} \leq 0,5L$ та $Y_{\text{нкмпп}} \leq 0,5F$:

$$z = \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot \pi}{m_{\text{пар}}} \rho_{\text{пар}} \left(\varphi_0 + \frac{\varphi_{\text{н}}}{1,25} \right) X_{\text{нкмпп}} Y_{\text{нкмпп}} Z_{\text{нкмпп}} ; (4.72)$$

– за умови, що $X_{\text{нкмпп}} > 0,5L$ та $Y_{\text{нкмпп}} > 0,5F$:

$$z = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{m_{\text{пар}}} \rho_{\text{пар}} \left(\varphi_0 + \frac{\varphi_{\text{н}}}{1,25} \right) S_{\text{підл}} Z_{\text{нкмпп}} , \quad (4.73)$$

де $m_{\text{пар}}$ – маса пари рідини, що утворює вибухонебезпечну концентрацію, кг;

$S_{\text{підл}}$ – площа підлоги приміщення, м^2 .

Якщо в приміщенні працює примусова вентиляція, то масу пари рідини, що випарувалася, необхідно поділити на коефіцієнт, рівний $A \cdot \tau_{\text{вип}} + 1$, де A – кратність повітрообміну, що створюється аварійною вентиляцією, с^{-1} . Якщо під час аварійної ситуації відбувається миттєвий викид пари із технологічного апарату, то час $\tau_{\text{вип}}$ приймають рівним «0» с.

Надлишковий тиск, що виникає внаслідок вибуху горючої суміші в приміщенні, буде спричиняти певні руйнування конструктивних елементів будівлі та

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу В

технологічного обладнання (дивись табл 4.7).

Таблиця 4.7. Критичні значення тисків, які викликають різні ступені руйнування окремих конструктивних елементів будівлі

ΔP , кПа	Елементи будівель
0,5 - 3,0	Часткове руйнування скління
3,0 - 7,0	Повне руйнування скління
12	Перегородки, віконні та дверні рами
15	Перекриття
30	Цегляні та блочні стіни
70	Металеві колони
90	Залізобетоні колони

Методика розрахунку параметрів надзвичайної ситуації при аварійному розливі горючої рідини у приміщенні

1. Розрахувати або визначити за довідником [7] молярну масу, об'ємну нижню концентраційну межу поширення полум'я, константи Антуана, теплоту згорання горючої рідини, максимальний тиск вибуху.

2. Розрахувати масову нижню концентраційну межу поширення полум'я φ'_n за формулою (3.3).

3. Визначити масу горючої речовини, яка випарувалася за даних умов.

3.1. Розрахувати тиск насиченої пари рідини за даної температури за формулою (3.28).

3.2. Розрахувати інтенсивність випаровування рідини у приміщення за формулою (4.60).

3.3. Розрахувати масу горючої рідини, яка випарувалася, з урахуванням площі й часу випаровування

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

за формулою (4.48).

4. Розрахувати середню фактичну концентрацію пари в об'ємі приміщення за формулою (4.61) або (4.62).

5. Розрахувати масу горючої речовини, яка за умови повного випаровування у даному приміщенні створить вибухонебезпечну концентрацію, за формулою (4.63).

6. Розрахувати час, протягом якого за даних умов середня концентрація пари горючої рідини у приміщенні досягне нижньої КМПП, за формулою (4.64).

7. Якщо середня фактична концентрація пари $\phi'_{\text{сер}}$ є меншою, ніж ϕ'_n , визначити розміри зони вибухонебезпечних концентрацій.

7.1. Розрахувати концентрацію насиченої пари рідини за даних умов за формулою (3.26).

7.2. Розрахувати густину пари за даних умов за формулою (4.39) або (4.40).

7.3. Розрахувати передекспоненціальний множник за даних умов за формулою (4.69).

7.4. Розрахувати розміри зони загазованості за формулами (4.66) – (4.68).

Зробити висновок щодо можливості утворення вибухонебезпечної ситуації у ході розвитку аварійної ситуації, яка розглядається.

8. Визначити надлишковий тиск вибуху пароповітряної хмари, що утворилася внаслідок аварійного випаровування рідини всередині приміщення.

8.1. Розрахувати коефіцієнт участі горючої пари легкозаймистої рідини у вибуху z за формулами (4.72) або (4.73) залежно від співвідношення розмірів зони загазованості та приміщення.

Для наближених розрахунків коефіцієнт участі

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу В

горючої пари у вибуху у приміщенні можна прийняти рівним 0,3.

8.2. Розрахувати стехіометричну концентрацію горючої речовини для індивідуальних горючих рідин, що складаються із атомів С, Н, О, N, галогенів, або масову теплоту згоряння для сумішей горючих рідин (для деяких поширених технічних сумішей рідин масову теплоту згоряння можна визначити за довідником [7] або таблицею 6 додатків).

8.3. Розрахувати надлишковий тиск вибуху пароповітряної хмари за формулами (4.70) або (4.71).

Приклад розв'язання задачі

Визначити ступінь небезпеки середньої фактичної концентрації горючої речовини у приміщенні розмірами 4х3х2,5 м, у якому відбувалося випаровування ацетону з площі 0,5 м² протягом 15 хвилин. Температура повітря дорівнює 15 °С, атмосферний тиск – 101,2 кПа, швидкість руху повітря – 0,1 м·с⁻¹, частка об'єму приміщення, що зайнята технологічним обладнанням, дорівнює 0,3.

Розв'язання

1. Визначаємо за довідником [7] для ацетону молярну масу $\mu = 58 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$, нижню концентраційну межу поширення полум'я $\varphi_{\text{н}}^{\circ} = 2,5 \%$, константи Антуана: $A = 6,3755$, $B = 1281,721$, $C_a = 237,09$.

2. Розраховуємо масову нижню концентраційну межу поширення полум'я ацетону за формулою (3.3).

Розраховуємо молярний об'єм газу V_{μ} за даних умов:

$$V_{\mu} = 22,4 \cdot \frac{101,3 \cdot (273 + 15)}{273 \cdot 101,2} = 23,6 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1};$$

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

$$\varphi'_1 = 2,5 \frac{58}{100 \cdot 23,6} = 0,061 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

3. Розраховуємо тиск насиченої пари ацетону за даних умов за формулою (3.28):

$$\lg P_{\text{нас}} = 6,3755 - \frac{1281,721}{(15 + 237,09)} = 1,29;$$

$$P_{\text{нас}} = 10^{1,29} = 19,5 \text{ кПа.}$$

4. Розраховуємо інтенсивність випаровування ацетону за даних умов за формулою (4.60).

Обираємо значення коефіцієнта ξ за табл. 4.4, виходячи із температури і швидкості руху повітря: $\xi = 2,6$.

$$I_{\text{вип}} = 2,6 \cdot 19,5 \cdot \sqrt{58} \cdot 10^{-6} = 386 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

5. Розраховуємо масу речовини, що перейде у пару, з урахуванням площі та часу випаровування за формулою (4.48):

$$m_{\text{пар}} = 386 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5 \cdot 900 = 0,174 \text{ кг.}$$

6. Розраховуємо середню концентрацію пари ацетону у вільному об'ємі приміщення за формулою (4.61):

$$\varphi'_{\text{сер}} = \frac{0,174}{4 \cdot 3 \cdot 2,5 \cdot (1 - 0,3)} = 0,008 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу В

Висновок: середня фактична концентрація ацетону у приміщенні дорівнює $0,008 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ і є вибухобезпечною, через те що вона є меншою, ніж нижня масова концентраційна межа поширення полум'я ацетону $0,061 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Приклад розв'язання задачі

Визначити мінімальний час, за який у приміщенні розмірами $5 \times 6 \times 3 \text{ м}$ середня фактична концентрація пари бензолу, розлитого на площі 3 м^2 , стане вибухонебезпечною. Початкова температура рідини і повітря дорівнює $25 \text{ }^\circ\text{C}$, атмосферний тиск – $101,5 \text{ кПа}$, швидкість руху повітря дорівнює $0,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Коефіцієнт заповнення приміщення меблями й обладнанням дорівнює $0,15$.

Розв'язання

1. Визначаємо за довідником [7] для бензолу молярну масу $\mu = 78 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$, нижню концентраційну межу поширення полум'я горючої речовини $\varphi'_n = 1,4 \%$, константи Антуана: $A = 5,6139$, $B = 902,275$, $C_a = 178,10$.

2. Розраховуємо нижню масову концентраційну межу поширення полум'я за формулою (3.3).

Розраховуємо молярний об'єм пари за даних умов:

$$V_\mu = 22,4 \cdot \frac{101,3 \cdot 298}{273 \cdot 101,5} = 24,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1};$$

$$\varphi'_n = 1,4 \cdot \frac{78}{100 \cdot 24,4} = 0,0448 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

3. Розраховуємо тиск насиченої пари $P_{\text{нп}}$ за даних умов за формулою (3.28):

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

$$\lg P_{\text{ни}} = 5,6139 - \frac{902,275}{(30 + 178,1)} = 1,28;$$

$$P_{\text{ни}} = 10^{1,28} = 19,1 \text{ кПа.}$$

4. Розраховуємо інтенсивність випаровування бензолу за даних умов за формулою (4.60).

Обираємо значення коефіцієнта ξ за табл. 4.4, виходячи із температури і швидкості руху повітря: $\xi = 3,6$.

$$I_{\text{вип}} = 3,6 \cdot 19,1 \cdot \sqrt{78} \cdot 10^{-6} = 607 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

5. Розраховуємо час, за який середня концентрація пари бензолу у приміщенні за даних умов досягне нижньої концентраційної межі поширення полум'я, за формулою (4.64):

$$\tau_{\text{нкмш}} = \frac{0,0448 \cdot (1 - 0,15) \cdot 5 \cdot 6 \cdot 3}{607 \cdot 10^{-6} \cdot 3} = 607 \text{ с.}$$

Висновок: за даних умов пара бензолу у визначеному об'ємі приміщення утворить вибухонебезпечну концентрацію через 607 с.

Приклад розв'язання задачі

На бетонну підлогу приміщення розмірами 4х6х3 м, в якому частина об'єму зайнята меблями й обладнанням ($\eta = 0,1$), упала банка із 2 літрами авіаційного бензину. Температура повітря у приміщенні дорівнює 20 °С,

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу В

атмосферний тиск – 101 кПа. Визначити, які розміри матиме зона із вибухонебезпечною концентрацією пари бензину за 10 хвилин (600 с) після початку випаровування за умови, що рух повітря у приміщенні відсутній.

Розв'язання

1. Визначаємо із таблиці 6 додатків для авіаційного бензину молярну масу $\mu = 102,2 \text{ кг}\cdot\text{кмоль}^{-1}$, нижню концентраційну межу поширення полум'я $\varphi_n = 0,92 \%$, константи Антуана: $A = 7,5442$, $B = 2629,6$, $C_a = 384,2$, густину $\rho = 740 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$.

2. Визначаємо масу авіаційного бензину, що випарувалася за даних умов.

2.1. Розраховуємо тиск насиченої пари авіаційного бензину за даних умов за формулою (3.28):

$$\lg P_{\text{ни}} = 7,5442 - \frac{2629,6}{(20 + 384,2)} = 1,04 ;$$

$$P_{\text{ни}} = 10^{1,04} = 11 \text{ кПа.}$$

2.2. Розраховуємо інтенсивність випаровування авіаційного бензину за формулою (4.60).

Обираємо значення коефіцієнта ξ за табл. 4.4. Через те що рух повітря у приміщенні відсутній, $\xi = 1,0$.

$$I_{\text{вип}} = 1,0 \cdot 11 \cdot \sqrt{102,2 \cdot 10^{-6}} = 111 \cdot 10^{-6} \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}.$$

2.3. Розраховуємо масу авіаційного бензину, що випарувалася за даних умов, за формулою (4.48).

Оскільки розлив стався на горизонтальній поверхні, не здатній до просочування, для бензину площу розливу

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

можна прийняти як 1 м^2 на 1 л речовини. Тому фактична площа розливу 2 л авіаційного бензину дорівнює $2,0 \text{ м}^2$.

$$m_{\text{пар}} = 111 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 600 = 0,13 \text{ кг.}$$

3. Визначаємо середню фактичну концентрацію пари авіаційного бензину у вільному об'ємі приміщення.

3.1. Розраховуємо вільний об'єм приміщення:

$$V_{\text{вільн}} = (1 - 0,1)4 \cdot 6 \cdot 3 = 64,8 \text{ м}^3.$$

3.2. Розраховуємо густину пари авіаційного бензину за даних умов за формулою (4.39):

$$\rho_{\text{пар}} = \frac{102,2}{22,4 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 20)} = 4,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

3.3. Розраховуємо середню фактичну концентрацію пари авіаційного бензину у вільному об'ємі приміщення за формулою (4.62):

$$\varphi_{\text{сер}} = \frac{100 \cdot 0,13}{4,3 \cdot 64,8} = 0,05 \text{ \%}.$$

Середня фактична концентрація пари авіаційного бензину $\varphi_{\text{факт}} = 0,05 \text{ \%}$ є меншою, ніж нижня концентраційна межа поширення полум'я $\varphi_{\text{н}} = 0,92 \text{ \%}$. Отже, вибухонебезпечна концентрація пари авіаційного бензину в усьому об'ємі приміщення за даних умов не утвориться.

4. Визначаємо розміри зони вибухонебезпечних концентрацій авіаційного бензину на 10-ту хвилину

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу В

випаровування.

4.1. Розраховуємо концентрацію насиченої пари авіаційного бензину за даних умов за формулою (3.26):

$$\varphi_{\text{нп}} = 100 \frac{11}{101} = 10,9 \%$$

4.2. Розраховуємо за даних умов передекспоненціальний множник за формулою (4.69):

$$\varphi_o = 10,9 \cdot \left(\frac{0,13 \cdot 100}{10,9 \cdot 4,3 \cdot 64,8} \right)^{0,41} = 1,2 \%$$

4.3. Розраховуємо розміри зони загазованості за формулами (4.66) – (4.68):

$$X_{\text{нкмпн}} = 1,1958 \cdot 6 \sqrt{\frac{600}{3600} \ln \left(\frac{1,26 \cdot 1,2}{0,92} \right)} = 2,1 \text{ м};$$

$$Y_{\text{нкмпн}} = 1,1958 \cdot 4 \sqrt{\frac{600}{3600} \ln \left(\frac{1,26 \cdot 1,2}{0,92} \right)} = 1,4 \text{ м};$$

$$Z_{\text{нкмпн}} = 0,04714 \cdot 3 \sqrt{\frac{600}{3600} \ln \left(\frac{1,26 \cdot 1,2}{0,92} \right)} = 0,04 \text{ м}.$$

Висновок: під час розливу 2 літрів авіаційного бензину за даних умов випаровування на 10-ту хвилину зона загазованості із концентрацією пари, що перевищує нижню концентраційну межу, матиме наступні розміри: 2,1 м у довжину, 1,4 м у ширину і 0,04 м по висоті.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати розміри зони вибухонебезпечної загазованості та тротиловий еквівалент вибуху, що може статися внаслідок аварійного розливу розчинника Р-4 у приміщенні розмірами 12х5х3 м, якщо обладнання і меблями зайнята частка приміщення $\eta = 0,2$, площа випаровування горючої рідини дорівнює 5 м^2 , час випаровування – 20 хвилин (1200 с), температура повітря у приміщенні – $10 \text{ }^\circ\text{C}$, атмосферний тиск – 101 кПа, швидкість руху повітря у приміщенні – $0,1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

Розв'язання

1. Визначаємо із таблиці 6 додатків для розчинника Р-4 молярну масу $\mu = 81,7 \text{ кг}\cdot\text{кмоль}^{-1}$, нижню об'ємну концентраційну межу поширення полум'я $\varphi_n = 1,65 \%$, константи Антуана: $A = 6,2969$, $B = 1373,67$, $C_a = 242,8$, нижчу масову теплоту згорання $Q'_n = 40936 \text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}$.

2. Визначаємо масу розчинника Р-4, що випарувався за даних умов.

2.1. Розраховуємо тиск насиченої пари розчинника Р-4 за даної температури за рівнянням (3.28):

$$\lg P_{\text{нас}} = 6,2969 - \frac{1373,67}{(10 + 242,8)} = 0,86 ;$$

$$P_{\text{нас}} = 10^{0,86} = 7,3 \text{ кПа.}$$

2.2. Розраховуємо інтенсивність випаровування розчинника Р-4 за даних умов за формулою (4.60).

Обираємо значення коефіцієнта ξ за табл. 4.4, виходячи із температури і швидкості руху повітря: $\xi = 3,0$.

$$I_{\text{вип}} = 3,0 \cdot 7,3 \cdot \sqrt{81,7} \cdot 10^{-6} = 198 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

2.3. Розраховуємо масу розчинника Р-4, що випарувалася за даних умов у приміщення, за формулою (4.48):

$$m_{\text{пар}} = 198 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 1200 = 1,2 \text{ кг}.$$

3. Визначаємо середню фактичну концентрацію пари розчинника Р-4 у вільному об'ємі приміщення за даних умов.

3.1. Розраховуємо густину пари розчинника за даних умов за формулою (4.39):

$$\rho_{\text{пар}} = \frac{81,7}{22,4 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 10)} = 3,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

3.2. Розраховуємо середню фактичну концентрацію пари розчинника Р-4 за формулою (4.62):

$$V_{\text{вільн}} = (1 - 0,2)12 \cdot 5 \cdot 3 = 144 \text{ м}^3;$$

$$\varphi_{\text{сер}} = \frac{100 \cdot 1,2}{3,5 \cdot 144} = 0,24 \%.$$

Середня фактична концентрація пари розчинника є меншою, ніж нижня концентраційна межа поширення полум'я ($\varphi_{\text{н}} = 1,65 \%$), отже вибухонебезпечні концентрації пари розчинника за даних умов будуть утворюватися не у

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

всьому об'ємі приміщення, а тільки в певній зоні.

4. Визначаємо розміри зони вибухонебезпечних концентрацій пари розчинника Р-4 на 20-ту хвилину випаровування.

4.1. Розраховуємо концентрацію насиченої пари розчинника Р-4 за даних умов за формулою (3.26):

$$\varphi_{\text{нп}} = 100 \frac{7,3}{101} = 7,2 \text{ \%}.$$

4.2. Розраховуємо за даних умов передекспоненціальний множник за формулою (4.69):

$$\varphi_i = 7,2 \cdot \left(\frac{0,24}{7,2} \right)^{0,46} = 1,5 \text{ \%}.$$

4.3. Розраховуємо розміри зони вибухонебезпечної загазованості за даних умов на 20-ту хвилину випаровування розчинника Р-4 за формулами (4.66) – (4.68):

$$X_{\text{нкмпш}} = 1,1958 \cdot 12 \cdot \sqrt{\frac{1200}{3600} \ln \left(\frac{1,26 \cdot 1,5}{1,65} \right)} = 3,1 \text{ м};$$

$$Y_{\text{нкмпш}} = 1,1958 \cdot 5 \cdot \sqrt{\frac{1200}{3600} \ln \left(\frac{1,26 \cdot 1,5}{1,65} \right)} = 1,3 \text{ м};$$

$$Z_{\text{нкмпш}} = 0,3536 \cdot 3 \cdot \sqrt{\frac{1200}{3600} \cdot \ln \left(\frac{1,26 \cdot 1,5}{1,65} \right)} = 0,3 \text{ м}.$$

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу В

5. Параметри зони загазованості приміщення відповідають умові $X_{\text{НКМПП}} \leq 0,5L$ та $Y_{\text{НКМПП}} \leq 0,5F$, а середня фактична концентрація пари розчинника 0,24 % є меншою, ніж значення $0,5 \cdot 1,65 \% = 0,82 \%$, тому коефіцієнт участі пари горючої речовини у вибуху розраховуємо за формулою (4.72):

$$z = \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot 3,14}{1,2} 3,5 \left(1,5 + \frac{1,65}{1,25} \right) 3,1 \cdot 1,3 \cdot 0,3 = 0,2.$$

6. Розраховуємо тротильовий еквівалент можливого вибуху пари розчинника Р-4 за даних умов за формулою (4.50):

$$W_{\text{ТНТ}} = \frac{0,3 \cdot 40936}{0,9 \cdot 4520} \cdot 1,2 \cdot 0,2 = 0,7 \text{ кг.}$$

Висновок: за даних умов аварійного розливу розчинника Р-4 утворюється зона вибухонебезпечної загазованості розмірами 3,1 м у довжину, 1,3 м у ширину і 0,3 м по висоті; тротильовий еквівалент можливого вибуху дорівнює 0,7 кг.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати надлишковий тиск вибуху пароповітряної хмари, що утворилася внаслідок аварійної розгерметизації технологічного апарата і розливу циклогексану об'ємом 10 л всередині виробничого приміщення розмірами 12x18x4,5 м, якщо обладнанням зайнята частка приміщення $\eta = 0,25$, час випаровування дорівнює 10 хв.

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

(600 с), температура повітря у приміщенні – 18 °С, атмосферний тиск – 101 кПа, швидкість руху повітря у приміщенні – 0,2 м·с⁻¹.

Розв'язання

1. Визначаємо із довідника [7] для циклогексану молярну масу $\mu = 84 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$, нижню об'ємну концентраційну межу поширення полум'я $\varphi_n = 1,3 \%$, константи Антуана: $A = 5,96991$, $B = 1203,526$, $C_a = 222,863$, густину $\rho = 773 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, максимальний тиск вибуху $P_{\max} = 858 \text{ кПа}$.

2. Визначаємо масу циклогексану, що випарувалася за даних умов.

2.1. Розраховуємо тиск насиченої пари циклогексану за даних умов за формулою (3.28).

$$\lg P_{\text{нп}} = 5,96991 - \frac{1203,526}{18 + 222,863} = 0,97;$$

$$P_{\text{нп}} = 10^{0,97} = 9,4 \text{ кПа}.$$

2.2. Розраховуємо інтенсивність випаровування циклогексану за формулою (4.60).

Обираємо значення коефіцієнта ξ за табл. 4.4, виходячи із температури і швидкості руху повітря: $\xi = 3,5$.

$$I_{\text{вип}} = 3,5 \cdot 9,4 \cdot \sqrt{84} \cdot 10^{-6} = 301,5 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

2.3. Розраховуємо масу циклогексану, що випарувалася, за формулою (4.48).

Оскільки розлив циклогексану стався на підлозі виробничого приміщення, не здатній до просочування, площу розливу можна прийняти як 1 м² на 1 л речовини.

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу В

Тому фактична площа розливу 10 л циклогексану дорівнює 10 м^2 .

$$m_{\text{пар}} = 301,5 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 600 = 18,1 \text{ кг.}$$

Проте маса циклогексану, що розлилася всередині виробничого приміщення, дорівнює:

$$m_{\text{рід}} = V_{\text{рід}} \cdot \rho_{\text{рід}} = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 773 = 7,73 \text{ кг.}$$

Отже приймаємо, що при аварійній ситуації сталося випаровування всієї маси горючої рідини, тобто $m_{\text{пар}} = 7,73 \text{ кг}$.

3. Визначаємо надлишковий тиск вибуху пароповітряної хмари, що утворилася внаслідок випаровування аварійного розливу циклогексану всередині приміщення.

3.1. Розраховуємо густину пари розчинника за даних умов за формулою (4.39):

$$\rho_{\text{пар}} = \frac{84}{22,4 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 18)} = 3,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

3.2. Розраховуємо стехіометричну концентрацію циклогексану C_6H_{12} :

$$\beta = n_{\text{C}} + n_{\text{S}} + \frac{n_{\text{H}} - n_{\text{X}}}{4} - \frac{n_{\text{O}}}{2} + \frac{5n_{\text{P}}}{4} = 6 + \frac{12}{4} = 9.$$

$$\varphi_{\text{стм}} = \frac{100}{1 + 9 \cdot 4,76} = 2,28 \%.$$

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

3.3. Приймаємо коефіцієнт участі горючої пари циклогексану у вибуху у приміщенні рівним 0,3.

3.4. Розраховуємо надлишковий тиск вибуху пароповітряної хмари циклогексану за формулою (4.70):

$$V_{\text{вільн}} = (1 - 0,25)12 \cdot 18 \cdot 4,5 = 729 \text{ м}^3;$$

$$\Delta P = (858 - 101) \frac{100 \cdot 7,73 \cdot 0,3}{729 \cdot 3,5 \cdot 2,28 \cdot 3} = 10 \text{ кПа.}$$

Висновок: надлишковий тиск вибуху пароповітряної хмари, що утворилася внаслідок аварійної розгерметизації і розливу циклогексану всередині виробничого приміщення за даних умов, дорівнює 10 кПа. Такий надлишковий тиск зумовить повне руйнування скління даного приміщення.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Розрахувати діаметр зони загазованості, яка виникає внаслідок "великого дихання" резервуара під час закачування нафтопродукту. Параметри резервуара та умови закачування горючої рідини наведені у таблиці.

№	Висота резервуара, м	Діаметр резервуара, м	Витрата закачування, м ³ с ⁻¹	Фактична концентрація нафти $\phi_{\text{факт}}$, % (об)	НКМПП, % (об)
1	12	4,8	0,1	1,6	1,2
2	9	10	0,09	1,8	1,1
3	4,8	12	0,11	1,7	0,9
4	7,8	30	0,11	1,4	1,1
5	4,8	30	0,1	1,5	1,2
6	7,8	30	0,1	1,2	0,8
7	3,6	9	0,08	1,3	0,95
8	4,8	24	0,11	2,4	1,8
9	4,8	18	0,1	1,9	0,8
10	7,8	42	0,11	1,4	1,2
11	4,8	12	0,09	2,2	1,95
12	4,8	18	0,09	1,3	1,15
13	7,8	30	0,11	1,4	1,0
14	3,6	9	0,08	1,1	0,9
15	3,6	6	0,076	1,1	0,8
16	4,8	24	0,1	1,5	1,3
17	4,8	18	0,099	1,3	1,0
18	6,2	8	0,060	1,9	0,98
19	5,4	7	0,055	1,6	1,4
20	6,5	8,4	0,08	1,8	1,1

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

2*. Розрахувати масову та лінійну швидкість вигорання ацетону за температури 30 °С, якщо густина теплового потоку до поверхні ацетону від полум'я дорівнює $11,5 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$. Прийняти, що швидкість прогрівання дорівнює швидкості вигорання ацетону, теплота випаровування ацетону за даної температури дорівнює $544 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$, а питома масова теплоємність ацетону виражається рівнянням $c_p = 2,12 + 0,0032 \cdot t \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$.

3. Для горючих рідин, що наведені у таблиці, розрахувати:

а) фактичну концентрацію пари горючої рідини всередині резервуара за температури й атмосферного тиску, наведених у таблиці;

б) можливість утворення і розміри зони вибухонебезпечної загазованості навколо резервуара під час закачування рідини за даних умов (показники пожежної небезпеки горючих рідин наведені в таблицях , 6 додатків).

№ варіанта	Горюча рідина	Висота резервуара, м	Діаметр резервуара, м	Витрата закачування, $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	Температура середовища, °С	Атмосферний тиск, кПа
1	бензин Б-70	11,9	17,9	0,12	30	98
2	бензин А-72	11,9	14,6	0,11	-5	97
3	бензин АІ-93(л)	8,9	12,3	0,070	20	101
4	бензин АІ-93(з)	9,7	12	0,076	-10	100
5	ацетон	4,2	4,7	0,006	40	100
6	метилацетат	4	4,1	0,005	30	99
7	гексан	5,5	7,1	0,045	15	98

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу В

№ варіанта	Горюча рідина	Висота резервуара, м	Діаметр резервуара, м	Витрата закачування, м ³ /с	Температура середовища, °С	Атмосферний тиск, кПа
8	метанол	5,9	6,6	0,050	35	101
9	пропанол	7,5	9,5	0,047	25	102
10	толуол	7,5	9	0,060	10	97
11	циклогексан	5,9	4,7	0,010	-15	100
12	етилловий спирт	8	10	0,058	25	98
13	бензол	4,5	4,0	0,004	22	102
14	етилацетат	4,2	5,6	0,015	28	99
15	пентанол	6	5,4	0,025	10	101
16	дітиловий ефір	4,1	4,0	0,02	-5	100
17	додекан	7,4	9,3	0,08	20	99
18	ізопропенілбензол	5,5	7,1	0,070	-10	98
19	крезол	7,5	9	0,063	40	101
20	ксилідин	8,9	12,3	0,072	30	102
21	кумол	7,5	9,5	0,052	15	97
22	мезитилен	11,9	14,6	0,12	35	100
23	диз. паливо "Л"	11,3	15,2	0,14	25	98
24	уайт-спірит	12,3	8,9	0,067	10	102
25	ізопентан	5,9	6,6	0,035	-15	99
26	диметиловий ефір	4,1	4,0	0,022	25	101
27	розчинник Р-4	4,1	5,7	0,058	-25	98
28	розчинник Р-5	5,5	7,1	0,018	-10	99
29	розчинник Р-12	5,9	6,6	0,015	5	100
30	розчинник М	7,4	9,3	0,025	20	102

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

4. Для горючих рідин, наведених у таблиці, розрахувати час до можливого викиду з резервуара, якщо висота придонного шару води, рівень наливу рідини в резервуарі, її лінійна швидкість вигорання і швидкість прогрівання наведені у таблиці.

№	Горюча рідина	Висота придонного шару води, м	Рівень наливу рідини, м	Лінійна швидкість вигорання, см·хв ⁻¹	Швидкість прогрівання, см·хв ⁻¹
1	нафта	0,5	13,0	0,34	0,53
2	--/--	0,6	11,0	0,4	0,5
3	--/--	0,7	12,0	0,25	0,41
4	--/--	0,8	10,0	0,38	0,51
5	--/--	0,9	9,0	0,27	0,42
6	--/--	1,0	8,0	0,36	0,52
7	--/--	0,5	7,0	0,29	0,43
8	--/--	0,6	6,0	0,23	0,4
9	мазут	0,7	5,0	0,31	0,44
10	--/--	0,8	3,0	0,32	0,54
11	--/--	0,9	5,5	0,33	0,45
12	--/--	1,0	3,5	0,30	0,49
13	--/--	1,1	7,5	0,35	0,46
14		0,3	13,0	0,13	0,6
15	--/--	0,4	11,0	0,22	0,50
16	--/--	0,7	12,0	0,14	0,59
17	--/--	0,8	10,0	0,21	0,49
18	--/--	0,9	9,0	0,15	0,58
19	масло АМТ300	1,0	8,0	0,20	0,48
20	--/--	0,5	7,0	0,16	0,57
21	--/--	0,6	6,0	0,19	0,47
22	--/--	0,7	5,0	0,17	0,56
23	--/--	0,8	3,0	0,18	0,46
24	--/--	0,9	5,5	0,19	0,51
25	--/--	1,0	3,5	0,16	0,55

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу В

5*. Розрахувати масову та лінійну швидкість вигорання сірковуглецю за температури 10 °С, якщо густина теплового потоку до поверхні ацетону від полум'я дорівнює 15 кВт·м⁻². Прийняти, що швидкість прогрівання дорівнює швидкості вигорання сірковуглецю, теплота випаровування рідини за даної температури дорівнює 370,5 кДж·кг⁻¹, а питома масова теплоємність виражається рівнянням $c_p = 0,98 + 0,00103 \cdot t$ кДж·кг⁻¹·К⁻¹.

6*. Розрахувати кількість тепла, що надходить від факела полум'я до поверхні метилового спирту, якщо початкова температура рідини дорівнює 0 °С, 20 °С, 30 °С, теплота випаровування відповідно температури рідини – 1156; 1143; 1126 кДж·кг⁻¹, лінійна швидкість вигорання рідини – 0,12 см·хв⁻¹, а теплоємність спирту від температури залежить наступним чином: $c_p = 20,4 + 0,104 \cdot t$ Дж·моль⁻¹·К⁻¹. Прийняти, що швидкість прогрівання дорівнює швидкості вигорання метилового спирту.

7*. Розрахувати густина теплового потоку від полум'я до поверхні керосину, якщо початкова температура рідини дорівнює 60 °С, масова швидкість вигорання рідини – 0,014 кг·м⁻²·с⁻¹, теплота випаровування за 60 °С дорівнює 331 кДж·кг⁻¹, а питома теплоємність – 2,34 кДж·кг⁻¹·К⁻¹. Густина керосину становить 834 кг·м⁻³.

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

8. Для горючих рідин, наведених у таблиці, розрахувати параметри надзвичайної ситуації, що сталася при аварійному розливі рідини на відкритому просторі:

а) масу рідини, що випарується за даних умов з вільної поверхні розливу за даний час, та радіус зони вибухонебезпечної загазованості;

б) тротиловий еквівалент вибуху та надлишковий тиск в ударній хвилі на заданій відстані від епіцентру вибуху парогазової хмари;

в) радіус повного руйнування, область значних і незначних пошкоджень ударною хвилею;

г) радіус вогненної сфери, час життя вогненної сфери та радіус отримання опіків.

Площа аварійного розливу, час випаровування та умови, за яких відбувається випаровування рідини, наведені у таблиці.

№ варіанта	Горюча рідина	Площа розливу, м ²	Час випаровування, хв.	Температура рідини, °С	Атмосферний тиск, кПа	Швидкість повітря, м·с ⁻¹	Відстань від епіцентру вибуху, м
1	диметоксиметан	8	30	10	98	1,0	5
2	1-гептен	7	20	40	98	1,5	3
3	пропаналь	5	25	30	100	1,0	2
4	діетиламін	30	20	25	103	1,0	14
5	2-гексен	20	25	-5	98	2,5	9
6	метилацетат	5	15	15	99	1,5	3
7	бутаналь	30	20	10	100	1,0	18
8	3-метилпентан	45	40	35	98	2,0	20
9	2-метилгексан	7	35	25	101	1,0	4
10	бензол	50	35	5	100	1,5	22
11	2-бутанон	40	15	20	98	2,0	17

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу В

№ варіанта	Горюча рідина	Площа розливу, м ²	Час випаровування, хв.	Температура рідини, °С	Атмосферний тиск, кПа	Швидкість повітря, м/с ⁻¹	Відстань від епіцентру вибуху, м
12	2-амінобутан	20	40	5	100	-	20
13	пентан	15	15	15	98	2,5	38
14	1-етоксибутан	10	35	20	99	2,0	60
15	гексан	10	40	35	101	2,5	27
16	діетиловий ефір	25	10	5	98	1,5	15
17	гептан	15	15	20	97	2,0	30
18	2,3-диметилпентан	35	35	35	100	1,0	15
19	дипропіловий ефір	48	30	30	102	1,5	20
20	метилциклопентан	10	20	10	101	1,0	60
21	2-метилгептан	5	45	30	100	1,5	20
22	бутаналь	15	25	15	98	0,5	17
23	метанол	10	30	25	98	2,0	26
24	ацетон	20	20	30	101	1,0	16
25	2-метил 2-бутен	10	15	5	98	2,5	38
26	диметилкетон	8	20	20	100	1,5	30
27	ацетонітрил	12	25	15	98	1,0	40
28	ацетилхлорид	10	15	20	99	2,0	50
29	н-пропіламін	5	20	35	101	1,0	30
30	1-пентен	4	35	20	97	2,0	25
31	пропенлацетат	12	35	35	100	-	40
32	3-амінопропен	9	20	30	102	2,5	50
33	акролеїн	11	40	10	101	2,0	45
34	акрилонітрил	5	15	30	100	2,5	40
35	вінілетиловий ефір	8	15	15	98	1,5	30

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

9. На бетонну підлогу приміщення із заданими розмірами, в якому частина об'єму η зайнята обладнанням, упала склянка з горючою рідиною заданої ємності $V_{\text{рід}}$. Початкові умови, за яких відбувається надзвичайна ситуація, наведені у таблиці.

Для горючих рідин, представлених у таблиці, розрахувати:

а) фактичну середню концентрацію пари у вільному об'ємі приміщення, що утворилася за даний час випаровування, та визначити ступінь її вибухонебезпеки;

б) час, протягом якого фактична середня концентрація пари в даному приміщенні стане рівною нижній концентраційній межі поширення полум'я;

в) час, за який рідина повністю випарується за даних умов, та порівняти з часом, необхідним для утворення в об'ємі приміщення нижньої концентраційної межі поширення полум'я;

г) масу рідини, необхідну для створення нижньої концентраційної межі поширення полум'я у вільному об'ємі приміщенні за умов, наведених у таблиці.

№ варіанта	Горюча рідина	Параметри приміщення				Об'єм рідини, л	Температура рідини, °С	P _{атм} , кПа	Час випаровування, хв.	Швидкість повітря, м·с ⁻¹
		L, м	F, м	H, м	η					
1	1-гептен	10	8	3,5	0,2	18	10	97	20	0,5
2	1-етоксибутан	14	5	3	0,1	7	30	100	25	1,0
3	1-пентен	12	8	5	0,14	10	0	102	18	0,2
4	2,3-диметилпентан	15	6	3	0,2	15	35	103	35	0,1
5	2-амінобутан	13	6	4	0,1	5	20	99	40	-
6	2-бутанон	12	4	3	0,05	8	35	100	22	0,1

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу В

№ варіанта	Горюча рідина	Параметри приміщення				Об'єм рідини, л	Температура рідини, °С	Р _{атм} , кПа	Час випаровування, хв.	Швидкість повітря, м·с ⁻¹
		L, м	F, м	H, м	η					
7	2-гексен	14	8	3	0,15	5	30	98	25	0,5
8	2-метил 2-бутен	13	5	3	0,1	6	25	101	20	1,0
9	2-метилгексан	15	7	4	0,2	5	5	100	35	-
10	2-метилгептан	16	5	3	0,1	15	15	100	40	0,2
11	3-амінопропен	13	6	4	0,08	6	0	98	45	-
12	3-метилпентан	18	5	3	0,07	30	35	101	40	0,1
13	акрилонітрил	15	3	3	0,05	30	20	100	30	0,5
14	акролеїн	14	5	3	0,1	15	40	98	35	1,0
15	ацетилхлорид	13	6	4	0,1	7	14	98	50	-
16	ацетон	15	7	4	0,25	12	22	101	45	-
17	ацетонітрил	14	7	4	0,05	7	24	98	40	0,2
18	бензол	15	6	4	0,15	9	32	98	30	0,5
19	бутаналь	17	8	4	0,18	10	18	98	25	1,0
20	бутаналь	15	6	3	0,3	7	16	100	20	0,1
21	вінілетиловий ефір	16	6	3	0,2	4	25	99	55	-
22	вінілметилкетон	16	7	4	0,14	8	10	98	25	1,0
23	вінілпропіонат	10	6	3	0,08	10	5	98	22	-
24	гексан	6	4	2,5	0,25	5	0	101	34	0,2
25	гептан	8	4	2,5	0,05	6	15	100	48	-
26	диметоксиметан	12	6	3	0,18	15	20	98	28	0,5
27	дипропіловий ефір	8	5	3,5	0,09	10	15	101	32	1,0
28	діетиламін	12	4	2,5	0,1	25	25	100	36	-
29	діетиловий ефір	11	4	3	0,07	30	30	98	45	0,6
30	метанол	14	6	4	0,11	40	34	98	42	0,1
31	метилацетат	16	6	4	0,05	50	28	101	18	0,3
32	метициклопентан	8	4	3	0,11	15	26	98	25	0,4
33	н-пропіламін	6	3	3	0,1	4	22	98	28	0,1
34	пропаналь	5	4	3	0,1	4	18	100	24	0,7
35	пропенілацетат	8	6	3,5	0,08	12	16	100	30	0,6

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

10. У приміщенні, параметри якого наведено у таблиці, сталася аварія з розгерметизації технологічного апарата і розливу горючої рідини заданої ємності $V_{\text{рід}}$. Температура рідини й атмосферний тиск наведені у таблиці.

Для горючих рідин, наведених у таблиці, розрахувати:

а) розміри зони загазованості через заданий час випаровування;

б) надлишковий тиск вибуху пароповітряної хмари, що утворилася внаслідок аварійного випаровування рідини всередині приміщення.

№ варіанта	Горюча рідина	Параметри приміщення				Об'єм рідини, л	Т рідини, °С	$P_{\text{атм}}$, кПа	Час випаровування, хв.	Швидкість повітря, м/с
		L, м	F, м	H, м	H					
1	1-гептен	15	6	4		22	22	98	24	-
2	1-етоксибутан	14	8	3,5	0,2	18	10	97	20	0,5
3	гептан	13	5	3	0,1	7	30	100	30	1,0
4	бутаналь	12	5	3	0,05	9	18	98	25	0,5
5	акрилонітрил	14	6	3	0,15	12	35	98	22	0,1
6	ацетилхлорид	13	4	3	0,1	15	15	101	34	1,0
7	пентан	15	8	4	0,2	25	20	98	48	-
8	2-метилгексан	16	5	3	0,1	30	35	98	19	0,2
9	амінометилпропан	13	7	4	0,08	14	30	98	28	-
10	2-бутанон	18	5	3	0,07	45	25	100	32	0,1
11	вінілетиловий ефір	15	6	3	0,05	15	5	99	36	0,5
12	бутаналь	14	5	3	0,1	18	15	101	45	1,0
13	вінілізопропіловий ефір	13	3	4	0,1	20	0	98	42	-
14	2-гексен	15	5	4	0,25	22	35	98	18	0,6
15	3-амінопропен	14	6	3	0,05	25	20	98	25	0,1

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу В

№ варіанта	Горюча рідина	Параметри приміщення				Об'єм рідини, л	Т рідини, °С	Р _{атм} , кПа	Час випаровування, хв.	Швидкість повітря, м·с ⁻¹
		L, м	F, м	H, м	H					
16	3-метилпентан	15	7	4	0,15	12	40	101	28	0,3
17	гексан	17	7	4	0,18	28	14	100	40	0,4
18	метилацетат	16	8	4	0,2	35	24	98	30	0,5
19	ацетон	13	6	4	0,05	24	32	101	30	0,7
20	1-пентен	14	6	3	0,12	18	18	100	40	0,6
21	н-пропіламін	16	4	3	0,14	15	30	97	22	0,2
22	вінілпропіонат	7	6	4	0,25	4	35	102	20	0,2
23	метанол	8	6	4	0,18	5	15	103	35	-
24	акролеїн	11	4	3	0,09	12	20	98	40	0,1
25	пропаналь	12	4	2,5	0,1	18	35	99	45	0,5
26	пропенілацетат	8	3	2,5	0,07	6	30	100	40	1,0
27	2-метилгептан	12	6	3,5	0,11	9	25	98	30	-
28	диметилкетон	11	5	3	0,05	28	5	101	35	0,2
29	ацетонітрил	16	4	5	0,1	16	0	98	45	0,1
30	2-амінобутан	8	6	3	0,2	8	35	101	40	0,5
31	вінілметилкетон	6	3	4	0,2	9	20	98	30	1,0
32	діетиловий ефір	9	5	4	0,1	15	40	98	25	-
33	диметоксиметан	8	5	3	0,14	10	15	98	20	-
34	бензол	10	4	4	0,1	8	30	99	19	0,1
35	діетиламін	14	6	4,5	0,1	18	34	101	28	0,5

ГЛАВА 3. ПАРАМЕТРИ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖІ КЛАСУ С

До пожеж класу С відносять пожежі горючих газів, які можуть виникнути під час аварій на хімічних підприємствах, де застосовують, зберігають чи виробляють горючі гази, на газопроводах або підприємствах по видобутку природних газів (газових родовищах) [15], [17].

Модель розвитку надзвичайної ситуації, пов'язаної з аварійним виходом горючих газів, включає декілька основних етапів:

1. Первинний вихід горючого газу в навколишнє середовище внаслідок аварійної ситуації.

2. Утворення зони вибухонебезпечної загазованості – газоповітряної хмари з концентрацією горючого газу більшою, ніж нижня концентраційна межа поширення полум'я φ_n .

3. Займання й вибух газової хмари за умови виникнення в ній джерела запалювання.

4. Вигорання горючих речовин у дифузійному режимі.

5. Руйнування технологічного обладнання під впливом ударної хвилі; вихід нових порцій горючих газів.

6. Виникнення нових осередків вибухів і пожеж.

7. Подальший каскадний розвиток пожежі.

Небезпечними факторами пожеж класу С є:

- відкритий вогонь;
- теплове випромінювання зони горіння;
- токсичні продукти горіння;
- фактори вибуху (ударна хвиля; уламки обладнання, будівельних конструкцій);
- низькочастотні коливання великої потужності та

випадання газового конденсату під час пожежі газових фонтанів.

§ 1. Пожежі газових фонтанів

Під час горіння газових фонтанів відбувається дифузійне вигорання газів, які виходять із свердловини зі швидкістю, близькою до швидкості звуку. За таких газодинамічних умов горіння має чітко виражений турбулентний режим [15].

Пожежі газових і газонафтових фонтанів відрізняються від нафтових тим, що продукт, який виходить, встигає згоріти у повітрі. При горінні нафтових фонтанів вигоріти встигають тільки супутній газ і легкі фракції нафти, а всі інші фракції випадають навколо гирла свердловини та продовжують горіти і розтікатися по поверхні.

При відкритому фонтануванні внаслідок зриву обладнання факел, зазвичай, буває *компактним*, а при виході через фланці – *розпиленим*. При розпиленому факелі фронт полум'я має розвинену поверхню, що збільшує поверхню випромінювання.

Компактний фонтан, що горить, за висотою умовно поділяють на зони:

- 1) зона відриву полум'я – частина фонтана безпосередньо від гирла до видимої зони горіння;
- 2) зона запалювання, в якій відбувається запалювання горючого газу;
- 3) зона горіння – частина фонтана від зони запалювання до верхньої частини факела.

Через пульсацію газового потоку контури зон є умовними, а їх розміри можуть змінюватися.

Висота компактного газового фонтана залежить від

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

витрати газу, тобто дебіту свердловини, і визначається емпіричною формулою:

$$H_{\phi} = 23g_{\phi}^{0,4}, \text{ м}, \quad (4.74)$$

де H_{ϕ} – висота факела газового фонтана, м;

g_{ϕ} – витрата (дебіт) свердловини, млн. м³·доба⁻¹.

Для спрощення розрахунків висоти компактного газового фонтана можна використати більш просту формулу:

$$H_{\phi} = 20\sqrt{g_{\phi}}, \text{ м}. \quad (4.75)$$

Основною небезпекою під час пожежі газового фонтана є теплове випромінювання факела.

Для спрощення приблизних розрахунків безпечних відстаней від палаючого фонтана факел умовно приймають як крапкове джерело енергії, від якого енергія випромінювання поширюється у навколишнє середовище [15]. Якщо фонтан є вертикальним, то зона теплового впливу являє собою напівсферу, розміри якої визначаються критичною густиною потоку випромінювання $q_{\text{кр}}$ (див. рис. 4.6).

Тоді густину теплового потоку, що передається випромінюванням від вертикального факела, можна визначити як:

$$q = \frac{f \cdot Q_{\text{пож}}}{4\pi R^2}, \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}, \quad (4.76)$$

де $Q_{\text{пож}}$ – кількість тепла, що виділяється за одиницю часу у факелі полум'я, кДж·с⁻¹;

R – радіус зони теплового впливу, м;

f – коефіцієнт випромінювання факела, що враховує

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу С

частку тепла, яка втрачається випромінюванням у навколишнє середовище; залежить від середньої молярної маси газу і визначається за формулою:

$$f = 0,05\sqrt{\mu_{\text{сер}}}, \quad (4.77)$$

де μ – середня молярна маса газу, що згоряє, $\text{кг}\cdot\text{кмоль}^{-1}$; визначається за формулою:

$$\mu_{\text{сер}} = \sum_i \mu_i r_i, \quad (4.78)$$

де μ_i – молярна маса i -го компонента газового фонтана;
 r_i – об'ємна частка i -го компонента газового фонтана.

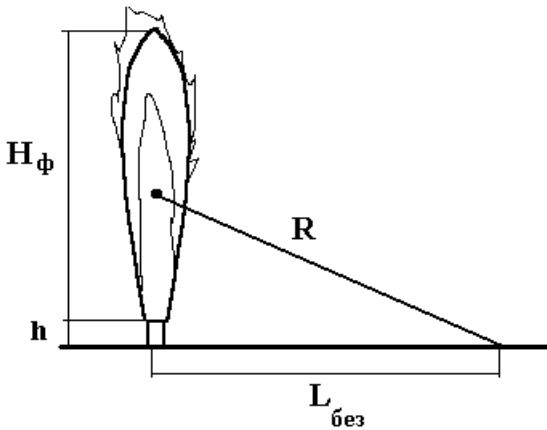


Рис. 4.6 – Схема для визначення безпечної відстані від вертикального газового фонтана

Кількість енергії, що виділяється за одиницю часу при згорянні газу у фонтані, можна визначити як:

$$Q_{\text{пож}} = \eta Q''_{\text{ф}} g_{\text{ф}}, \text{ кДж} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (4.79)$$

де η – коефіцієнт повноти згоряння;

$g_{\text{ф}}$ – витрата (дебіт) газового фонтана, $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$;

$Q''_{\text{ф}}$ – нижча об'ємна теплота згоряння газового фонтана, $\text{кДж} \cdot \text{м}^{-3}$; визначається за формулою:

$$Q''_{\text{ф}} = \sum_i (Q''_{\text{н}i} \cdot r_i), \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (4.80)$$

де $Q''_{\text{н}i}$ – нижча об'ємна теплота згоряння i -го компонента газового фонтана.

Якщо дебіт газового фонтана $g_{\text{ф}}$ заданий у мільйонах метрів кубічних за добу, то теплоту пожежі можна виразити рівнянням:

$$Q_{\text{пож}} = 11,57 \eta Q''_{\text{ф}} g_{\text{ф}}, \text{ кДж} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (4.81)$$

де $g_{\text{ф}}$ – дебіт свердловини, $\text{млн. м}^3 \cdot \text{доба}^{-1}$.

Задаючись критичним значенням густини теплового потоку (для особового складу, що бере участь у ліквідації пожежі, або пожежної техніки) в рівнянні (4.76), можна розрахувати радіус зони критичного теплового впливу від центра факела за формулою:

$$R = \sqrt{\frac{f Q_{\text{пож}}}{4\pi q_{\text{кр}}}}, \text{ м}, \quad (4.82)$$

де $q_{\text{кр}}$ – критична густина теплового потоку, $\text{кВт} \cdot \text{м}^{-2}$,

для людей без захисного одягу: $q_{\text{кр}} = 0,56 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$;

для працівників в бойовому одязі: $q_{\text{кр}} = 4,2 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$;

для пожежної техніки: $q_{\text{кр}} = 12,5 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$.

Безпечну відстань від палаючого фонтана можна визначити з урахуванням висоти факела:

$$L_{\text{без}} = \sqrt{R^2 - \left(h + \frac{H_{\text{ф}}}{2} \right)^2}, \text{ м}, \quad (4.83)$$

де h – відстань від поверхні землі до нижнього краю факела фонтана, м.

При сильному вітрі та незначній витраті свердловини факел газового фонтана може відхилитися від вертикального положення (див. рис. 4.7).

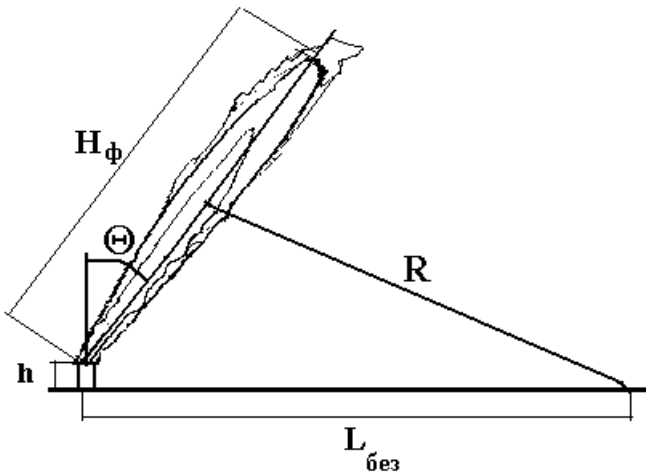


Рис. 4.7 – Схема для визначення безпечної відстані від нахиленого газового фонтана

Зона теплового впливу в цьому випадку приймає форму еліпса, а безпечну відстань можна розрахувати за формулою:

$$L_{\text{без}} = \sqrt{R^2 - \left(h + \left(\frac{H_{\Phi}}{2} - h \right) \cos \Theta \right)^2} + \left(\frac{H_{\Phi}}{2} - h \right) \sin \Theta, \text{ м},$$

(4.84)

де Θ – кут нахилу факела полум'я.

Визначення безпечної відстані від факела фонтана до місця розташування особового складу і пожежної техніки дозволяє правильно організувати бойову роботу по рятуванню людей і гасінню пожеж.

Методика визначення безпечної відстані від полум'я газового фонтана

1. Визначити об'ємну теплоту згорання компонентів газового фонтана за довідником [7], табл. 8 додатків або розрахувати за формулою (1.53).

2. Розрахувати об'ємну теплоту згорання газового фонтана за формулою (4.80).

3. Розрахувати висоту фонтана за значенням дебіту свердловини за формулою (4.74) або (4.75).

4. Розрахувати кількість тепла, що виділяється за одиницю часу при згорянні газового фонтана, за формулою (4.79) або (4.81).

5. Розрахувати середню молярну масу газу за формулою (4.78).

6. Розрахувати коефіцієнт випромінювання факела за формулою (4.77).

7. Розрахувати радіус зони теплового впливу від центра факела за формулою (4.82).

8. Розрахувати безпечну відстань від фонтана за формулою (4.83) або (4.84).

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати безпечну відстань для особового складу в бойовому одязі від вертикального факела газового фонтана такого складу: CH_4 – 92 %; C_2H_6 – 4,5 %; C_3H_8 – 1 %; N_2 – 2 %; CO_2 – 0,5 %. Дебіт свердловини дорівнює $0,1 \text{ млн. м}^3 \cdot \text{доба}^{-1}$; коефіцієнт повноти згорання $\eta = 0,8$; висота зони відриву $h = 1 \text{ м}$.

Розв'язання

1. Визначаємо об'ємні теплоти згорання горючих компонентів газового фонтана за таблицею додатків:
 $Q''_{\text{н CH}_4} = 35880 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}$; $Q''_{\text{н C}_2\text{H}_6} = 64360 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}$;
 $Q''_{\text{н C}_3\text{H}_8} = 93180 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}$.

2. Розраховуємо об'ємну теплоту згорання газового фонтана за формулою (4.80):

$$Q''_{\Phi} = 35880 \cdot 0,92 + 64360 \cdot 0,045 + 93180 \cdot 0,01 = 36837,6 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

3. Розраховуємо висоту фонтана за формулою (4.75):

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

4. Розраховуємо кількість тепла, що виділяється за одиницю часу при згорянні газового факела, за формулою (4.81):

$$Q_{\text{пож}} = 11,57 \cdot 0,8 \cdot 36837,6 \cdot 0,1 = 34097 \text{ кДж} \cdot \text{с}^{-1}.$$

5. Розраховуємо середню молярну масу газу $\mu_{\text{сер}}$ за формулою (4.78):

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

$$\mu_{\text{CH}_4} = 16 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}; \quad \mu_{\text{C}_2\text{H}_6} = 30 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1};$$

$$\mu_{\text{C}_3\text{H}_8} = 44 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}; \quad \mu_{\text{N}_2} = 28 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1};$$

$$\mu_{\text{CO}_2} = 44 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1};$$

$$\mu_{\text{сер}} = 16 \cdot 0,92 + 30 \cdot 0,045 + 44 \cdot 0,01 + 28 \cdot 0,02 + 44 \cdot 0,005 = 17,3 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}.$$

6. Розраховуємо коефіцієнт випромінювання факела за формулою (4.77):

$$f = 0,05 \cdot \sqrt{17,3} = 0,21.$$

7. Розраховуємо радіус зони теплового впливу від центра факела за формулою (4.82), якщо $q_{\text{кр}} = 4,2 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$:

$$R = \sqrt{\frac{0,21 \cdot 34097}{4 \cdot 3,14 \cdot 4,2}} = 11,6 \text{ м}.$$

8. Розраховуємо безпечну відстань для особового складу в бойовому одязі від вертикального фонтана за формулою (4.83):

$$L_{\text{безп}} = \sqrt{11,6^2 - \left(1 + \frac{6,3}{2}\right)^2} = 10,9 \text{ м}.$$

Висновок: безпечна відстань від палаючого газового вертикального фонтана з даними параметрами для особового складу в бойовому одязі дорівнює 10,9 м.

§ 2. Горіння газоповітряного середовища на відкритому просторі

Горючий газ може надійти у навколишнє середовище із негерметичного або пошкодженого зовнішнього технологічного обладнання. Газоповітряна хмара, що виникає внаслідок такої аварійної ситуації, створює загрозу вибуху й утворення вогненного шару.

Інтенсивність виходу газу із обладнання залежить від площі отвору, через який відбувається витік газу, температури газу і навколишнього середовища, властивостей самого газу й тиску в системі.

Від співвідношення тиску в системі подавання газу та тиску в навколишньому середовищі залежать режим і

витрата витоку газу [11]. Відомо, якщо $\frac{P_{\text{сис}}}{P_{\text{атм}}} < 2$, то

режим витоку є докритичним, а якщо $\frac{P_{\text{сис}}}{P_{\text{атм}}} > 2$, то режим

витоку є критичним.

Масову витрату, з якою газ витікає через отвір, можна розрахувати за формулою:

- у докритичному режимі:

$$g_{\Gamma} = K_{\text{отв}} S_{\text{отв}} P_{\text{сис}} \sqrt{\frac{1}{R_{\text{шт}} T} \cdot \frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{P_{\text{атм}}}{P_{\text{сис}}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_{\text{атм}}}{P_{\text{сис}}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}; \quad (4.85)$$

- у критичному режимі:

$$g_{\Gamma} = K_{\text{отв}} S_{\text{отв}} P_{\text{сис}} \sqrt{\frac{1}{R_{\text{пит}} T} \cdot \frac{2k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}}, \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (4.86)$$

де $K_{\text{отв}}$ – коефіцієнт опору отвору, через який надходить газ (зазвичай $K_{\text{отв}} = 0,64$);

k – коефіцієнт адиабати горючого газу (для одноатомних газів $k = 1,67$, двоатомних $k = 1,4$, триатомних та багатоатомних $k = 1,3$);

$P_{\text{сис}}$ – тиск у системі подавання газу, який є більшим за тиск середовища, в яке відбувається витік, Па;

$P_{\text{атм}}$ – тиск у середовищі, в яке відбувається витік газу, Па;

$S_{\text{отв}}$ – площа отвору, через який витікає газ, м^2 ;

T – температура в системі подавання газу, К;

$R_{\text{пит}}$ – питома газова стала, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$:

$$R_{\text{пит}} = \frac{R}{\mu_{\Gamma} \cdot 10^{-3}}, \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}, \quad (4.87)$$

де R – універсальна газова стала, $R = 8,31 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$;

μ_{Γ} – молярна маса газу, що витікає, $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$.

За певний час витіку у навколишнє середовище надійде маса газу, яку можна розрахувати за формулою:

$$m_{\Gamma} = g_{\Gamma} \tau_{\text{вит}}, \text{ кг}, \quad (4.88)$$

де m_{Γ} – маса газу, що вийшла із пошкодженого обладнання, кг;

g_{Γ} – масова витрата надходження газу, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$;

$\tau_{\text{вит}}$ – час витіку газу, с.

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу С

Маса газу, що може надійти до повітряного простору внаслідок аварійної розгерметизації установки, визначає рівень вибухонебезпеки технологічного процесу та повну кількість енергії, що може бути виділена під час згоряння цієї маси:

$$Q_{\text{сум}} = m_{\text{г}} Q'_{\text{н}}, \text{ кДж},$$

де $Q'_{\text{н}}$ – масова нижча теплота згоряння горючого газу, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Внаслідок молекулярної дифузії та конвекційного переносу горючий газ поширюється в навколишньому середовищі й утворює газоповітряну хмару, в якій концентрація горючого газу може перевищувати нижню концентраційну межу поширення полум'я. Таку область називають *зоною вибухонебезпечної загазованості*.

Радіус зони вибухонебезпечної загазованості, що утворюється при витіканні газу в навколишнє середовище, визначають за формулою:

$$R_{\text{заг}} = 14,56 \left(\frac{m_{\text{г}}}{\rho_{\text{г}} \varphi_{\text{н}}} \right)^{0,33}, \text{ м}, \quad (4.89)$$

де $m_{\text{г}}$ – маса горючого газу, що надійшов до відкритого простору під час аварійної ситуації, кг;

$\rho_{\text{г}}$ – густина горючого газу за даних умов, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

$\varphi_{\text{н}}$ – об'ємна нижня концентраційна межа поширення полум'я горючого газу, %.

Зовнішня частина газоповітряної хмари

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

характеризується вибухонебезпечними концентраціями горючого газу ($\varphi_n \geq \varphi_r \geq \varphi_v$). Запалювання й горіння газоповітряної хмари в цій області протікає у кінетичному (вибуховому) режимі. У вибуху бере участь не вся маса горючої речовини, а лише її частка. Коефіцієнт участі газів у вибуху на відкритому просторі приймають рівним $z = 0,1$.

Потужність вибуху можна оцінити у порівнянні зі стандартним вибухом одного кілограма тринітротолуолу з урахуванням, що максимально можливий коефіцієнт корисної дії вибуху газоповітряної хмари може досягати близько 40 %:

$$W_{\text{тнт}} = \frac{0,4Q'_n}{0,9Q_{\text{тнт}}} m_r z, \quad (4.90)$$

де 0,4 і 0,9 – відповідно частка енергії, що витрачається на формування ударної хвилі під час вибуху пароповітряної хмари і тринітротолуолу;

Q'_n – питома масова теплота згоряння горючого газу, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$;

$Q_{\text{тнт}}$ – питома масова енергія вибуху тринітротолуолу, $4520 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Можливу руйнівну дію ударної хвилі під час вибуху можна оцінити за значенням надлишкового тиску ΔP за формулою (4.51). При вибуху утворюється зона ураження, яку визначають від епіцентру вибуху. Радіус зони ураження можна розрахувати за формулою (4.52).

При потужних газових викидах вибухонебезпечні концентрації можуть утворюватися тільки у зовнішньо-

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу С

му шарі зони загазованості. Всередині газоповітряної хмари концентрація горючої речовини може перевищувати верхню концентраційну межу поширення полум'я. У цьому випадку внутрішня частина хмари буде вигоряти у дифузійному режимі у вигляді вогненної сфери. Вогнева сфера випромінює велику кількість тепла, що може призвести до ураження відкритих ділянок людської шкіри. Діаметр, час життя вогненної сфери та відстань, на якій теплове випромінювання вогненної сфери може спричинити опіки відкритих ділянок людської шкіри, можна визначити так само, як і для пароповітряних сумішей, за формулами (4.53) – (4.55).

Методика розрахунку параметрів вибуху газоповітряної хмари на відкритому просторі

1. Визначити параметри зони вибухонебезпечної загазованості повітряного простору.

1.1. Визначити нижню концентраційну межу поширення полум'я газу за довідником або розрахувати за формулами (3.4) – (3.10).

1.2. Розрахувати густину газу за температури навколишнього середовища за формулою (4.39).

1.3. Розрахувати масову витрату, з якою горючий газ поступає у навколишнє середовище, за формулою (4.85) або (4.86) залежно від режиму витоку.

1.4. Розрахувати масу газу, що надійшла до повітряного простору через нещільності технологічного обладнання за час аварійної ситуації, за формулою (4.88).

1.5. Якщо внаслідок аварійної ситуації відбувається повне руйнування технологічного апарата, розрахувати масу горючого газу, що вийшов із обладнання у

навколишнє середовище, за формулою:

$$m_{\Gamma} = \rho_{\Gamma} \frac{T_0 P_{\text{ап}} V_{\text{ап}}}{T_{\text{ап}} P_{\text{атм}}}, \text{ м}^3, \quad (4.91)$$

де ρ_{Γ} – густина газу за температури навколишнього середовища, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

T_0 – температура навколишнього середовища, К;

$T_{\text{ап}}$ – температура газу в апараті, К;

$P_{\text{атм}}$ – атмосферний тиск, кПа;

$P_{\text{ап}}$ – тиск газу в апараті, кПа;

$V_{\text{ап}}$ – об'єм апарата, м^3 .

1.6. Розрахувати радіус зони загазованості за формулою (4.89).

2. Визначити параметри ураження ударною хвилею.

2.1. Визначити коефіцієнт участі газу у вибуху (на відкритому просторі з допускається приймати рівним 0,1).

2.2. Розрахувати нижчу масову теплоту згоряння газу за формулою $Q'_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{гор}} \cdot 1000}{\mu_{\text{гр}}}$, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ (1.52).

2.3. Розрахувати тротиловий еквівалент газоповітряної хмари $W_{\text{тнт}}$ за формулою (4.90).

2.4. Розрахувати надлишковий тиск в ударній хвилі на заданій відстані за формулою (4.51).

2.4. Розрахувати радіус ураження ударною хвилею за формулою (4.52).

3. Розрахувати параметри ураження вогневою сферою: радіус вогненної сфери за формулою (4.53), час життя вогненної сфери за формулою (4.54), радіус опіків за формулою (4.55)

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати радіус зони вибухонебезпечної загазованості, що виникла внаслідок аварійного витоку етилену із газгольдера через нещільність фланцевого з'єднання діаметром 3 мм протягом 20 хв. Тиск в робочій системі дорівнює 150 кПа, атмосферний тиск – 101 кПа, температура навколишнього середовища – 20 °С.

Розв'язання

1. Визначаємо молярну масу та нижню об'ємну концентраційну межу поширення полум'я етилену за довідником [7]: $\mu_{C_2H_4} = 28 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$; $\varphi_n = 3,2 \%$.

2. Розраховуємо густину етилену за даних умов за формулою (4.39):

$$\rho_r = \frac{28}{22,4(1 + 0,00367 \cdot 20)} = 1,16 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

3. Розраховуємо масову витрату, з якою горючий газ поступає у навколишнє середовище.

Визначаємо режим витоку газу із отвору:

$$\frac{P_{\text{сис}}}{P_{\text{атм}}} = \frac{150}{101} = 1,48 < 2,$$

отже, режим витоку є докритичним, витрату газу через отвір розраховуємо за формулою (4.85).

$$R_{\text{вит}} = \frac{8,314}{28 \cdot 10^{-3}} = 296,9 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}.$$

$$g_r = 0,64 \cdot 3,14 (1,5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 150 \cdot 10^3 \times$$

$$\times \sqrt{\frac{1}{296,9 \cdot 293} \cdot \frac{2 \cdot 1,3}{1,3 - 1} \left[\left(\frac{101 \cdot 10^3}{150 \cdot 10^3} \right)^{\frac{2}{1,3}} - \left(\frac{101 \cdot 10^3}{150 \cdot 10^3} \right)^{\frac{1,3+1}{1,3}} \right]} =$$

$$= 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

4. Розраховуємо масу газу, що вийшла із отвору за час витoku 20 хв. = 1200 с, за формулою (4.88):

$$m_r = 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1200 = 1,8 \text{ кг}.$$

5. Розраховуємо радіус зони загазованості за формулою (4.89):

$$R_{\text{заг}} = 14,56 \left(\frac{1,8}{1,16 \cdot 3,2} \right)^{0,33} = 11,4 \text{ м}.$$

Висновок: у випадку аварійного витoku етилену із газгольдера через нещільність фланцевого з'єднання за даних умов радіус зони вибухонебезпечної загазованості дорівнює 11,4 м.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати розміри зон вибухонебезпечної загазованості і ймовірних ушкоджень будівельних конструкцій ударною хвилею вибуху, що може відбутися внаслідок розгерметизації трубопроводу і витoku у

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу С

навколишнє середовище метану об'ємом 1000 м^3 , якщо температура навколишнього середовища дорівнює $5 \text{ }^\circ\text{C}$, атмосферний тиск -98 кПа . Розрахувати надлишковий тиск в ударній хвилі під час згоряння такої хмари на відстані 30 м .

Розв'язання

1. Визначаємо радіус зони вибухонебезпечної загазованості.

1.1. Визначаємо нижню концентраційну межу поширення полум'я метану за довідником [7]: $\varphi_{\text{н}} = 5,28 \%$.

1.2. Розраховуємо густину метану за даних умов за формулою (4.40):

$$\rho_{\text{Г}} = \frac{16 \cdot 98}{2269 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 5)} = 0,68 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

1.3. Розраховуємо масу метану, що надійшов до повітряного простору за даних умов:

$$m_{\text{Г}} = V_{\text{Г}} \rho_{\text{Г}} = 1000 \cdot 0,68 = 680 \text{ кг}.$$

1.4. Розраховуємо радіус зони вибухонебезпечної загазованості за формулою (4.89):

$$R_{\text{заг}} = 14,56 \left(\frac{680}{0,68 \cdot 5,28} \right)^{0,33} = 83,6 \text{ м}.$$

2. Визначаємо параметри ураження ударною хвилею вибуху газоповітряної хмари.

2.1. Розраховуємо нижчу масову теплоту згоряння

метану.

Визначаємо молярну теплоту згоряння метану за довідником [7]: $Q_H = 802 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$.

$$Q'_H = \frac{802 \cdot 1000}{16} = 50125 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

2.2. Розраховуємо тротиловий еквівалент вибуху газоповітряної хмари за формулою (4.90):

$$W_{\text{тнт}} = \frac{0,4 \cdot 50125}{0,9 \cdot 4520} \cdot 680 \cdot 0,1 = 335,2 \text{ кг}.$$

2.3. Розраховуємо надлишковий тиск в ударній хвилі під час вибуху метаноповітряної хмари на відстані 30 м за формулою (4.51):

$$\Delta P = 98 \left(0,8 \frac{335,2^{0,33}}{30} + 3 \frac{335,2^{0,66}}{30^2} + 5 \frac{335,2}{30^3} \right) = 38,8 \text{ кПа}.$$

2.4. Розраховуємо радіус зон ураження будівель ударною хвилею вибуху за формулою (4.52):

- зона повного руйнування будівель:

$$R_{\text{руйн}} (\Delta P = 100 \text{ кПа}) = \frac{3,8 \cdot \sqrt[3]{680}}{\left[1 + \left(\frac{3180}{680} \right)^2 \right]^{\frac{1}{6}}} = 19,8 \text{ м};$$

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу С

- зона значних пошкоджень конструктивних елементів, що несуть навантаження:

$$R_{\text{руйн}} (\Delta P = 28 \text{ кПа}) = \frac{9,6 \cdot \sqrt[3]{680}}{\left[1 + \left(\frac{3180}{680}\right)^2\right]^{\frac{1}{6}}} = 50,1 \text{ м};$$

- зона незначних ушкоджень будівельних конструкцій:

$$R_{\text{руйн}} (\Delta P = 14 \text{ кПа}) = \frac{28 \cdot \sqrt[3]{680}}{\left[1 + \left(\frac{3180}{680}\right)^2\right]^{\frac{1}{6}}} = 146,1 \text{ м};$$

- зона руйнування до 10 % віконного скла:

$$R_{\text{руйн}} (\Delta P = 2 \text{ кПа}) = \frac{56 \cdot \sqrt[3]{680}}{\left[1 + \left(\frac{3180}{680}\right)^2\right]^{\frac{1}{6}}} = 292,1 \text{ м}.$$

Висновок: радіус зони вибухонебезпечної загазованості, що може виникнути внаслідок розгерметизації трубопроводу і витоку у навколишнє середовище 1000 м^3 метану за даних умов, дорівнює 83,6 м. За умови вибуху такої газоповітряної хмари повне руйнування будівель можливе на відстані 19,8 м, значні пошкодження конструктивних елементів можливі

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

на відстані 50,1 м, незначне ушкодження будівельних конструкцій можливе у радіусі 146,1 м, руйнування до 10 % скла відбудеться на відстані 292,1 м. Надлишковий тиск в ударній хвилі під час згоряння такої хмари на відстані 30 м дорівнює 38,8 кПа.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати параметри ураження людей вогневою сферою, що утворилась під час згоряння газоповітряної хмари, яка виникла внаслідок аварійного витоку пропану із пошкодженого шланга автозаправної колонки через отвір площею $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ протягом 15 хвилин. Робочий тиск колонки дорівнює $2,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$, атмосферний тиск – 101 кПа, температура навколишнього середовища – мінус 10 °С.

Розв'язання

1. Визначаємо масу газу, що надійшла до повітряного простору за час аварійної ситуації.

1.1. Розраховуємо масову витрату, з якою горючий газ надходить у навколишнє середовище.

Визначаємо режим витоку газу із отвору:

$$\frac{P_{\text{сис}}}{P_{\text{атм}}} = \frac{2,2 \cdot 10^5}{1,01 \cdot 10^5} = 2,18 > 2,$$

отже, режим витоку є критичним, витрату газу через отвір розраховуємо за формулою (4.86).

$$R_{\text{питг}} = \frac{8,314}{44 \cdot 10^{-3}} = 189 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}.$$

$$g_r = 0,64 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 2,2 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{1}{189 \cdot 263} \cdot \frac{2 \cdot 1,3}{1,3+1} \left(\frac{2}{1,3+1} \right)^{\frac{2}{1,3-1}}} =$$
$$= 0,84 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

1.2. Розраховуємо масу газу, що надійшов до повітряного простору за 15 хв. = 900 с, за формулою (4.88):

$$m_r = 0,84 \cdot 900 = 756 \text{ кг}.$$

2. Визначаємо параметри ураження вогневою сферою.

2.1. Розраховуємо радіус вогненної сфери за формулою (4.53):

$$R_{bc} = 2,66 \cdot 756^{0,327} = 23,3 \text{ м}.$$

2.2. Розраховуємо час життя вогненної сфери за формулою (4.54):

$$\tau_{bc} = 0,92 \cdot 756^{0,303} = 6,8 \text{ с}.$$

2.3. Розраховуємо радіус зони 50 % смертельного ураження людей випромінюванням вогненної сфери:

$$R_{оп1} = 2,3 \cdot 23,3 = 53,6 \text{ м}.$$

2.4. Розраховуємо радіус опіків шкіри:

$$R_{оп2} = 5,5 \cdot 23,3 = 128,1 \text{ м.}$$

Висновок: у разі згорання газової хмари, що утворилась під час витoku пропану із пошкодженого шланга автозаправної колонки за даних умов, 50 % смертельного ураження людей випромінюванням вогненної сфери можливе на відстані до 53,6 м, опіки відкритих ділянок шкіри можливі на відстані 128,1 м.

§ 3. Утворення вибухонебезпечного середовища під час аварійного виходу газу у приміщення

Надзвичайна ситуація з загрозою подальшого виникнення пожежі класу С у приміщенні може створитися внаслідок аварійної розгерметизації технологічного обладнання або газової магістралі. Можливість вибуху при виході горючого газу в об'єм приміщення створюється за умови досягнення концентрації газу нижньої концентраційної межі поширення полум'я. Тому на практиці вирішують такі типи задач:

- визначення небезпеки фактичної середньої концентрації горючого газу, яка утворюється у вільному об'ємі приміщення за певний час витoku;
- визначення розмірів зони загазованості, в якій утворюються вибухонебезпечні концентрації горючого газу;
- визначення часу, за який у даному приміщенні чи у зоні заданих розмірів утвориться вибухонебезпечна концентрація горючого газу;
- визначення надлишкового тиску при вибуху газоповітряної хмари, що утворилася внаслідок аварійного виходу газу у приміщення.

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу С

Для визначення можливості виникнення горіння необхідно порівняти фактичну середню концентрацію горючого газу з нижньою концентраційною межею поширення полум'я цього газу.

Середню фактичну концентрацію газу, що утворилася у приміщенні внаслідок аварійного натікання, можна розрахувати за формулою:

$$\Phi'_{\text{сер}} = \frac{m_{\text{г}}}{V_{\text{прим}}(1 - \eta)} = \frac{m_{\text{г}}}{V_{\text{вільн}}}, \text{ кгм}^{-3}, \quad (4.92)$$

$$\text{або } \Phi_{\text{сер}} = \frac{100m_{\text{г}}}{\rho_{\text{г}} V_{\text{вільн}}}, \%, \quad (4.93)$$

де $\Phi'_{\text{сер}}$, $\Phi_{\text{сер}}$ – відповідно масова та об'ємна середня фактична концентрація газу у вільному об'ємі приміщення;

$m_{\text{г}}$ – маса газу, що надійшла до приміщення за час аварійної ситуації, кг;

$V_{\text{прим}}$ – загальний об'єм приміщення, м³;

η – частка об'єму приміщення, що зайнята обладнанням або меблями;

$V_{\text{вільн}}$ – вільний об'єм приміщення, м³.

Для визначення середньої концентрації горючого газу необхідно знати масу газу, що надійшов до приміщення за певний час розвитку аварійної ситуації. Якщо відбувається аварійне натікання газу у приміщення з певною масовою витратою заданий час, то масу газу можна знайти за формулою:

$$m_{\text{г}} = g_{\text{г}}^{\text{надх}} \tau, \quad (4.94)$$

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

де $g_{\Gamma}^{\text{надх}}$ – масова витрата, з якою горючий газ надходить у приміщення, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$; розраховують залежно від режиму витоку за формулами (4.85) або (4.86);

τ – час аварійного надходження газу у приміщення, с.

Виходячи із формул (4.92) та (4.94), можна визначити час, за який середня фактична концентрація газу, що утворилася у приміщенні внаслідок аварійного натікання, досягне значення нижньої концентраційної межі поширення полум'я:

$$\tau_{\text{нкмш}} = \frac{V_{\text{вільн}} \phi'_{\text{н}}}{g_{\Gamma}^{\text{надх}}}, \text{ с}, \quad (4.95)$$

де $\phi'_{\text{н}}$ – масова нижня концентраційна межа поширення полум'я горючого газу, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

За наявності отворів у приміщенні виникає газообмін внаслідок різниці температур газового середовища у приміщенні і зовні, через що частина горючого газу буде втрачатися разом із потоком повітря. Витрата горючого газу, що витікає з приміщення разом із повітрям, пропорційна поточному значенню масової частки горючого газу в суміші на даний момент часу.

Рівняння матеріального балансу горючого газу, що надходить у приміщення, з урахуванням витоку газу через отвори із потоком повітря можна виразити диференціальним рівнянням:

$$\frac{dm_{\Gamma}}{d\tau} = V_{\text{вільн}} \frac{d\phi'_{\Gamma}}{d\tau} = g_{\Gamma}^{\text{надх}} - g_{\Gamma\text{с}}^{\text{вит}} \frac{\phi'_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma\text{с}}}, \quad (4.96)$$

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу С

де $\varphi'_г$ – середня масова концентрація горючого газу у приміщенні на момент часу τ , $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$;

$g_{гс}^{\text{вит}}$ – масова витрата, з якою суміш повітря і горючого газу витікає із приміщення через отвори, $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}$; розраховують залежно від схеми газообміну за формулами (4.29) - (4.32);

$\rho_{гс}$ – густина газоповітряної суміші за даних умов, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$; розраховують за формулою (4.39).

За певний час розвитку аварійної ситуації у приміщенні, в якому є отвори, накопичується маса газу, що можна розрахувати, виходячи з матеріального балансу, за формулою:

$$m_{г} = \frac{g_{г}^{\text{надх}} \rho_{гс} V_{\text{вільн}}}{g_{гс}^{\text{вит}}} \left(1 - e^{-\frac{g_{гс}^{\text{вит}} \tau}{\rho_{гс} V_{\text{вільн}}}} \right), \text{кг.} \quad (4.97)$$

Вирішення рівняння матеріального балансу (4.96) у межах $\tau = 0$, $\varphi_{г} = 0$ та $\tau = \tau_{\text{нкмш}}$, $\varphi_{г} = \varphi_{н}$ дає можливість розрахувати час, через який середня концентрація горючого газу в вільному об'ємі приміщення досягне значення нижньої концентраційної межі поширення полум'я, з урахуванням витoku горючого газу із приміщення в процесі його аварійного надходження:

$$\tau_{\text{нкмш}} = \frac{V_{\text{вільн}} \rho_{гс}}{g_{гс}^{\text{вит}}} \ln \frac{g_{г}^{\text{надх}}}{g_{г}^{\text{надх}} - \frac{g_{гс}^{\text{вит}} \varphi_{н}}{\rho_{гс}}}, \text{с.} \quad (4.98)$$

Із формули (4.98) випливає, що за певних умов

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

газообміну час досягнення вибухонебезпечної концентрації горючої речовини у всьому об'ємі приміщення буде прямувати до нескінченності, тобто вибухонебезпечна загазованість у приміщенні не буде створюватися. Така ситуація виникне, якщо

$$g_{\Gamma}^{\text{надх}} \leq \frac{g_{\Gamma\text{с}}^{\text{вит}} \varphi_{\text{н}}'}{\rho_{\Gamma\text{с}}}. \quad (4.99)$$

За певний час виходу горючого газу нижня концентраційна межа поширення полум'я може бути досягнута не в усьому приміщенні, а тільки у певній частині приміщення. Створюється *зона вибухонебезпечної загазованості*.

Розміри зони вибухонебезпечної загазованості в горизонтальній площині визначають за формулами:

$$X_{\text{нкмпп}} = 1,1314 \cdot L \sqrt{\ln\left(\frac{1,38\varphi_0}{\varphi_{\text{н}}}\right)}, \text{ м}, \quad (4.100)$$

$$Y_{\text{нкмпп}} = 1,1314 \cdot F \sqrt{\ln\left(\frac{1,38\varphi_0}{\varphi_{\text{н}}}\right)}, \text{ м}, \quad (4.101)$$

де L – довжина приміщення, м;

F – ширина приміщення, м;

$\varphi_{\text{н}}$ – об'ємна нижня концентраційна межа поширення полум'я горючого газу, %;

φ_0 – передекспоненціальний множник, який визначають за емпіричними формулами:

- у нерухомому середовищі:

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу С

$$\varphi_0 = 3,77 \cdot 10^3 \frac{m_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma} V_{\text{вільн}}} = 3,77 \cdot 10^3 \frac{\varphi'_{\text{сер}}}{\rho_{\Gamma}} = 37,7 \varphi_{\text{сер}}, \% \quad (4.102)$$

- у рухомому середовищі ($v_{\text{пов}} > 0,1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$):

$$\varphi_0 = 300 \frac{m_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma} V_{\text{вільн}} v_{\text{пов}}} = \frac{300 \varphi'_{\text{сер}}}{\rho_{\Gamma} v_{\text{пов}}} = \frac{3 \varphi_{\text{сер}}}{v_{\text{пов}}}, \% \quad (4.103)$$

де $v_{\text{пов}}$ – швидкість руху повітряного середовища у приміщенні, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$.

Висоту зони вибухонебезпечних концентрацій газів, що виходять у повітряний простір приміщення з рівня підлоги, розраховують за формулою:

$$H_{\text{нкмпн}} = kH \sqrt{\ln\left(\frac{1,38\varphi_0}{\varphi_{\text{н}}}\right)}, \text{ м}, \quad (4.104)$$

де H – висота приміщення, м;

k – коефіцієнт для розрахунку висоти зони загазованості; для нерухомого газового середовища $k = 0,0253$, для рухомого – $k = 0,02828$.

Якщо витік газу відбувається на деякій висоті від підлоги приміщення, вертикальний розмір зони вибухонебезпечної загазованості визначають з урахуванням висоти розташування джерела витoku газу:

$$H_{\text{нкмпн}} = h + Z_{\text{нкмпн}}, \text{ м}, \quad (4.105)$$

де h – відстань від джерела витoku газу до підлоги за

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

умови, що горючий газ важчий за повітря, або до стелі за умови, що горючий газ легший за повітря, м.

Розміри зони загазованості приймають рівними нулю, якщо $\frac{1,38\varphi_0}{\varphi_n} \leq 1$.

Час, протягом якого за даних умов аварійного надходження горючого газу у приміщення зона вибухонебезпечних концентрацій пошириться до ймовірного джерела запалювання, можна розрахувати при вирішенні системи рівнянь (4.94), (4.100), (4.102), (4.103) за формулами:

- за умови відсутності руху повітряних потоків:

$$\tau_{ДЗ} = \frac{m_{\Gamma}}{g_{\Gamma}^{надх}} = 1,92 \cdot 10^{-4} \frac{\rho_{\Gamma} V_{вільн} \varphi_n}{g_{\Gamma}^{надх}} e^{\left(\frac{R}{1,1314L}\right)^2}, \text{ с, (4.106)}$$

- у рухомому середовищі:

$$\tau_{ДЗ} = 2,4 \cdot 10^{-3} \frac{\rho_{\Gamma} V_{вільн} V_{пов} \varphi_n}{g_{\Gamma}^{надх}} e^{\left(\frac{R}{1,1314L}\right)^2}, \text{ с, (4.107)}$$

де R – відстань від джерела витоку газу до ймовірного джерела запалювання, м.

Якщо в зоні вибухонебезпечної загазованості виникне джерело запалювання, відбудеться вибух, надлишковий тиск якого у приміщенні заданих розмірів можна розрахувати за формулами (4.70) або (4.71).

У вибуху бере участь не вся маса горючого газу, а

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу С

лише зовнішня частина зони загазованості. Для приміщень у формі прямокутного паралелепіпеда з відношенням довжини до ширини не більше 5 за умови, що $\varphi_{сер} < 0,5\varphi_n$ коефіцієнт участі горючого газу у вибуху z можна розраховувати за формулами:

- за умови, що $X_{нкмпп} \leq 0,5L$ та $Y_{нкмпп} \leq 0,5F$:

$$z = \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot \pi}{m_r} \rho_r \left(\varphi_o + \frac{\varphi_n}{1,38} \right) X_{нкмпп} Y_{нкмпп} H_{нкмпп} ; \quad (4.108)$$

- за умови, що $X_{нкмпп} > 0,5L$ та $Y_{нкмпп} > 0,5F$:

$$z = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{m_r} \rho_r \left(\varphi_o + \frac{\varphi_n}{1,38} \right) S_{підл} H_{нкмпп} , \quad (4.109)$$

де m_r – маса горючого газу, що надходить до об'єму приміщення, кг;

$S_{підл}$ – площа підлоги приміщення, m^2 .

Для наближених розрахунків коефіцієнт участі газів у вибуху у приміщенні можна прийняти рівним для водню $z = 1,0$; для інших горючих газів – $z = 0,5$.

Методика розрахунку параметрів надзвичайної ситуації при аварійному надходженні горючого газу у приміщення

1. Визначити за довідником [7] або розрахувати за попередніми методиками молярну масу, об'ємну нижню концентраційну межу поширення полум'я, молярну теплоту згоряння та максимальний тиск вибуху горючого газу.

2. Розрахувати густину газу, що надходить у

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

приміщення; густину газоповітряної суміші у приміщенні та повітря у навколишньому середовищі за даних умов за формулою (4.39).

3. Визначити масу газу, що надійшла у приміщення за даний час аварійної ситуації.

3.1. Якщо сталася повна розгерметизація технологічного обладнання, розрахувати масу горючого газу, що вийшов із обладнання, за формулою (4.91).

3.2. Якщо горючий газ надходить у приміщення через отвір, що утворився в технологічному обладнанні внаслідок аварійної ситуації, розрахувати масову витрату надходження горючого газу за формулою (4.85) або (4.86) залежно від режиму витоку.

3.3. Розрахувати масову витрату, з якою суміш повітря і горючого газу витікає із приміщення через отвори, за формулами (4.29) – (4.32) залежно від схеми газообміну.

3.4. Розрахувати вільний об'єм приміщення.

3.5. Розрахувати масу горючого газу, що накопичилася за час витоку у приміщенні, за відсутності відкритих отворів за формулою (4.94), або за наявності відкритих отворів у приміщенні за формулою (4.97).

4. Розрахувати середню фактичну концентрацію горючого газу, що утворилася у приміщенні за час витоку, за формулою (4.92) або (4.93).

5. Розрахувати час, через який середня концентрація горючого газу у вільному об'ємі приміщення досягне значення нижньої концентраційної межі поширення полум'я, за формулою (4.95) – за відсутності відкритих отворів, або за формулою (4.98) – з урахуванням витоку горючого газу із приміщення у процесі його аварійного надходження.

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу С

6. Якщо середня фактична концентрація горючого газу у приміщенні є меншою за нижню концентраційну межу поширення полум'я, визначити розміри зони вибухонебезпечної загазованості.

6.1. Розрахувати передекспоненційний множник за формулою (4.102) або (4.103) залежно від умов руху повітряного середовища у приміщенні.

6.2. Розрахувати горизонтальні розміри зони вибухонебезпечної загазованості за формулами (4.100) та (4.101).

6.3. Розрахувати вертикальний розмір зони загазованості за формулою (4.104) або (4.105), якщо витік газу стався на деякій висоті від підлоги.

Зробити висновок щодо можливості утворення вибухонебезпечної ситуації у ході розвитку аварійної ситуації, яка розглядається.

7. Розрахувати час, протягом якого за даних умов аварійного надходження горючого газу у приміщення зона вибухонебезпечних концентрацій пошириться на певну відстань від осередку аварійного виходу газу (наприклад, на відстань до ймовірного джерела запалювання), за формулами (4.106) або (4.107) залежно від умов руху повітряного середовища у приміщенні.

8. Визначити надлишковий тиск вибуху газоповітряної хмари, що утворилася внаслідок аварійного надходження газу у приміщення.

8.1. Розрахувати коефіцієнт участі горючого газу у вибуху z за формулами (4.108) або (4.109) залежно від співвідношення розмірів зони загазованості та приміщення.

Для наближених розрахунків коефіцієнт участі

горючих газів у вибуху у приміщенні можна прийняти рівним 0,5 або 1 для водню.

8.2. Розрахувати стехіометричну концентрацію горючої речовини для індивідуальних горючих газів, що складаються із атомів С, Н, О, N, галогенів, або масову теплоту згоряння для сумішей горючих газів.

8.3. Розрахувати надлишковий тиск вибуху газоповітряної хмари за формулами (4.70) або (4.71).

Приклад розв'язання задачі

Визначити можливість утворення вибухонебезпечної газоповітряної суміші у вільному об'ємі приміщення розмірами 3×4×2,5 м за умови аварійного виходу метану протягом 10 хв. із пошкодженої магістралі газової плити. Діаметр отвору, через який витікає газ, дорівнює 2 мм, тиск у системі подавання газу дорівнює 140 кПа. Прийняти, що 10 % об'єму приміщення зайнято меблями. Газообмін у приміщенні здійснюється через відкритий віконний отвір шириною 0,5 м і висотою 1,2 м. Температура газового середовища у приміщенні дорівнює 25 °С, температура повітря зовні – 0 °С, атмосферний тиск – 101,3 кПа.

Розв'язання

1. Визначаємо за довідником [7] молярну масу та об'ємну нижню концентраційну межу поширення полум'я метану: $\mu_{\text{CH}_4} = 16 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$; $\varphi_{\text{H}} = 5,28 \%$.

2. Розраховуємо густину метану, а також газоповітряної суміші у приміщенні та зовні за даних умов (середня молярна маса повітря дорівнює $\mu_{\text{пов}} = 29 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$) за формулою (4.39):

$$\rho_{\text{CH}_4} = \frac{16}{22,4(1 + 0,00367 \cdot 25)} = 0,65 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$\rho_{\text{пов}}^{25^\circ\text{C}} = \frac{29}{22,4(1 + 0,00367 \cdot 25)} = 1,18 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$\rho_{\text{пов}}^{0^\circ\text{C}} = \frac{29}{22,4(1 + 0,00367 \cdot 0)} = 1,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

3. Визначаємо масу газу, що надійшов за час аварійної ситуації до повітряного простору приміщення.

3.1. Розраховуємо масову витрату, з якою метан надходить у приміщення.

Визначаємо режим витоку газу із отвору:

$$\frac{P_{\text{сис}}}{P_{\text{атм}}} = \frac{140 \cdot 10^3}{101,3 \cdot 10^3} = 1,4 < 2.$$

Отже режим витоку є до критичним; витрату газу через отвір розраховуємо за формулою (4.85).

Питома газова стала для метану дорівнює:

$$R_{\text{пит}} = \frac{8,314}{16 \cdot 10^{-3}} = 520 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}.$$

Метан є багатоатомним газом, тому коефіцієнт політропи $k = 1,3$.

$$g_{\Gamma}^{\text{надх}} = 0,64 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot 140 \cdot 10^3 \times \\ \times \sqrt{\frac{1}{520 \cdot 298} \left(\frac{2 \cdot 1,3}{1,3 - 1} \right) \left[\left(\frac{101,3}{140} \right)^{\frac{2}{1,3}} - \left(\frac{101,3}{140} \right)^{\frac{1,3+1}{1,3}} \right]} = \\ = 4,4 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

3.2. Розраховуємо масову витрату, з якою газоповітряна суміш виходить із приміщення через відкритий отвір, за формулою (4.31).

$$\text{Площа відкритого отвору: } S_{\text{отв}} = 0,5 \cdot 1,2 = 0,6 \text{ м}^2.$$

$$g_{\text{пов}}^{\text{вит}} = \frac{2}{3} \cdot 0,65 \cdot 0,6 \sqrt{\frac{2 \cdot 9,8 \cdot 1,2 \cdot 1,3 \cdot 1,18(1,3 - 1,18)}{(\sqrt[3]{1,3} + \sqrt[3]{1,18})^3}} = \\ = 0,17 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

3.3. Розраховуємо вільний об'єм приміщення:

$$V_{\text{вільн}} = (1 - 0,1)3 \cdot 4 \cdot 2,5 = 27 \text{ м}^3.$$

3.4. Розраховуємо масу метану, що накопичився у приміщенні за 10 хв. аварійного виток за наявності газообміну через відкритий отвір, за формулою (4.97):

$$m_{\Gamma} = \frac{4,4 \cdot 10^{-4} \cdot 1,18 \cdot 27}{0,17} \left(1 - e^{-\frac{0,17 \cdot 600}{1,18 \cdot 27}} \right) = 7,9 \cdot 10^{-2} \text{ кг}.$$

4. Розраховуємо середню фактичну концентрацію

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу С

метану, що утворилася у вільному об'ємі приміщення за час витоку, за формулою (4.93):

$$\varphi_{\text{сер}} = \frac{100 \cdot 7,9 \cdot 10^{-2}}{0,65 \cdot 27} = 0,45 \%$$

Отже середня концентрація метану за даних умов є меншою за нижню концентраційну межу поширення полум'я $\varphi_{\text{н}} = 5,28 \%$, тобто середня фактична концентрація метану є безпечною.

5. Визначимо, чи можливе виникнення вибухо-небезпечної загазованості приміщення за даних умов витоку метану та газообміну, за формулою (4.99).

Розраховуємо масову нижню концентраційну межу поширення полум'я $\varphi'_{\text{н}}$ метану за даних умов за формулою (3.3):

$$\varphi'_{\text{н}} = 5,28 \frac{16}{100 \cdot 24,4} = 0,035 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$$

Розраховуємо значення $\frac{g_{\text{гс}}^{\text{виг}} \varphi'_{\text{н}}}{\rho_{\text{гс}}}$ і порівнюємо його з масовою витратою метану, що надходить у приміщення внаслідок аварійної ситуації:

$$\frac{g_{\text{гс}}^{\text{виг}} \varphi'_{\text{н}}}{\rho_{\text{гс}}} = \frac{0,17 \cdot 0,035}{1,18} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1} > 4,4 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$$

Отже, за даних умов витоку метану та газообміну у

приміщенні накопичення горючого газу не відбувається.

Висновок: у даному приміщенні за 10 хв. аварійної ситуації накопичилось 0,079 кг метану; при цьому утворилася фактична середня концентрація горючого газу 0,45 %, яка є безпечною. За даних умов витoku метану та газообміну у приміщенні створення вибухонебезпечної загазованості є неможливим.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати час, за який середня концентрація горючого газу у вільному об'ємі приміщення розмірами $3 \times 4 \times 2,5$ м досягне значення нижньої концентраційної межі поширення полум'я за умови аварійного виходу метану через пошкодження магістралі газової плити площею 1 см^2 , якщо тиск у системі подавання газу дорівнює 140 кПа, 10 % об'єму приміщення зайнято меблями, а газообмін у приміщенні здійснюється через відкритий віконний отвір із масовою витратою $0,17 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$. Розрахувати час, за який середня концентрація горючого газу в цьому приміщенні досягне значення нижньої концентраційної межі поширення полум'я за умови, що вікно закрито. Температура газового середовища у приміщенні дорівнює $25 \text{ }^\circ\text{C}$, атмосферний тиск – 101,3 кПа.

Розв'язання

1. Визначаємо за довідником [7] молярну масу та об'ємну нижню концентраційну межу поширення полум'я метану: $\mu_{\text{CH}_4} = 16 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$; $\varphi_{\text{H}} = 5,28 \%$.

2. Розраховуємо густину метану і газоповітряної суміші у приміщенні за формулою (4.39):

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу С

$$\rho_{\text{CH}_4} = \frac{16}{22,4(1 + 0,00367 \cdot 25)} = 0,65 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$\rho_{\text{пов}}^{25^\circ\text{C}} = \frac{29}{22,4(1 + 0,00367 \cdot 25)} = 1,18 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

3. Розраховуємо вільний об'єм приміщення:

$$V_{\text{вільн}} = (1 - 0,1)3 \cdot 4 \cdot 2,5 = 27 \text{ м}^3.$$

4. Розраховуємо масову нижню концентраційну межу поширення полум'я φ'_n метану за даних умов:

$$\varphi'_n = \frac{5,28 \cdot 0,65}{100} = 0,034 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

5. Розраховуємо масову витрату метану, що надходить у приміщення, з урахуванням, що режим витоку є докритичним, питома газова стала метану дорівнює $520 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, а коефіцієнт політропи $k = 1,3$.

$$\begin{aligned} g_{\text{Г}}^{\text{надх}} &= 0,64 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 140 \cdot 10^3 \times \\ &\times \sqrt{\frac{1}{520 \cdot 298} \left(\frac{2 \cdot 1,3}{1,3 - 1} \right) \left[\left(\frac{101,3}{140} \right)^{\frac{2}{1,3}} - \left(\frac{101,3}{140} \right)^{\frac{1,3+1}{1,3}} \right]} = \\ &= 0,014 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}. \end{aligned}$$

6. Розраховуємо час, за який середня концентрація

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

метану в об'ємі приміщення досягне значення нижньої концентраційної межі поширення полум'я з урахуванням витоку газу із приміщення у процесі його аварійного надходження, за формулою (4.98):

$$\tau_{\text{нкмш}} = \frac{27 \cdot 1,18}{0,17} \ln \frac{0,014}{0,014 - \frac{0,17 \cdot 0,034}{1,18}} = 81 \text{ с.}$$

7. Розраховуємо час, за який середня концентрація метану в об'ємі приміщення досягне значення нижньої концентраційної межі поширення полум'я за умови відсутності витоку газу із приміщення, за формулою (4.95):

$$\tau_{\text{нкмш}} = \frac{27 \cdot 0,034}{0,014} = 66 \text{ с.}$$

Висновок: у даному приміщенні за умови аварійного виходу метану через пошкодження магістралі газової плити середня концентрація горючого газу досягне значення нижньої концентраційної межі поширення полум'я через 81 с з урахуванням витоку газу із приміщення або через 66 с за умови відсутності витоку газу із приміщення.

Приклад розв'язання задачі

Під час проведення газозварювальних робіт у приміщенні розмірами 4×10×3 м через нещільності переносного ацетиленового генератора виходить газ із

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу С

масовою витратою $5 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$. Визначити час, за який концентрація ацетилену біля відкритого полум'я пальника досягне значення нижньої концентраційної межі поширення полум'я, якщо газовий генератор розташовано з порушенням правил пожежної безпеки на відстані 5 м від місця проведення зварювальних робіт. Прийняти, що 15 % об'єму приміщення зайнято обладнанням. Температура повітря у приміщенні дорівнює $20 \text{ }^\circ\text{C}$, швидкість руху повітря у приміщенні дорівнює $0,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, атмосферний тиск – $101,3 \text{ кПа}$.

Розв'язання

1. Визначаємо молярну масу та нижню концентраційну межу поширення полум'я ацетилену за довідником [7]: $\mu_{\text{C}_2\text{H}_2} = 26 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$; $\varphi_{\text{H}} = 2,5 \%$.

2. Розраховуємо густину ацетилену у приміщенні за даних умов за формулою (4.39):

$$\rho_{\text{C}_2\text{H}_2} = \frac{26}{22,4(1 + 0,00367 \cdot 20)} = 1,08 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

3. Розраховуємо вільний об'єм приміщення:

$$V_{\text{вільн}} = (1 - 0,15)10 \cdot 4 \cdot 3 = 102 \text{ м}^3.$$

4. Розраховуємо час, за який концентрація ацетилену на відстані 5 м від джерела витoku досягне нижньої концентраційної межі поширення полум'я, за формулою (4.107):

$$\tau = 2,4 \cdot 10^{-3} \frac{1,08 \cdot 102 \cdot 0,1 \cdot 2,5}{5 \cdot 10^{-5}} e^{\left(\frac{5}{1,1314 \cdot 10}\right)^2} = 1600 \text{ с.}$$

Висновок: за умови порушення правил пожежної безпеки та розташування газового генератора ацетилену на відстані 5 м від місця проведення газозварювальних робіт вибух може статися через 1600 с після початку аварійного витoku горючого газу з даною масовою витратою.

Приклад розв'язання задачі

Визначити можливість утворення вибухонебезпечної концентрації пропілену у приміщенні компресорної станції розмірами 4×12×2,8 м біля електричного вимикача, який знаходиться на висоті 1,7 м від підлоги, якщо промислова вентиляція вийшла з ладу, а горючий газ надходить у приміщення протягом 2 хв. через пошкодження газової магістралі на відстані 5 м від стіни та на висоті 1,1 м від підлоги. Діаметр отвору, через який виходить газ, дорівнює 1 мм, тиск у системі подавання газу дорівнює 1400 кПа. Прийняти, що 25 % об'єму приміщення зайнято обладнанням, температура повітря у приміщенні дорівнює 10 °С, атмосферний тиск – 100 кПа, швидкість руху повітряного середовища у приміщенні внаслідок інфільтрації дорівнює 0,2 м·с⁻¹.

Розв'язання

1. Визначаємо молярну масу та нижню концентраційну межу поширення полум'я пропілену за довідником [7]: $\mu = 42 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$; $\varphi_n = 2,4 \%$.

2. Розраховуємо густину пропілену за формулою (4.39):

$$\rho_{C_3H_6} = \frac{42}{22,4(1 + 0,00367 \cdot 10)} = 1,8 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

3. Визначаємо масу газу, що надійшов до повітряного простору приміщення за час аварійної ситуації.

3.1. Розраховуємо масову витрату пропілену, який надходить у приміщення.

Визначаємо режим витоку газу із отвору:

$$\frac{D_{\text{н\ddot{e}н}}}{D_{\text{à\ddot{o}i}}} = \frac{1400}{100} = 14 > 2.$$

Отже, режим витоку є критичним; витрату газу через отвір розраховуємо за формулою (4.86). Пропілен є багатоатомним газом, тому коефіцієнт політропи $k = 1,3$.

$$R_{\text{пит}} = \frac{8,314}{42 \cdot 10^{-3}} = 198 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}.$$

$$g_{\text{г}}^{\text{надх}} = 0,64 \cdot 3,14 (0,5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1,4 \cdot 10^6 \times \\ \times \sqrt{\frac{1}{198 \cdot 283} \left(\frac{2 \cdot 1,3}{1,3 + 1} \right) \left(\frac{2}{1,3 + 1} \right)^{\frac{2}{1,3 - 1}}} = 0,002 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

3.2. Оскільки у приміщенні немає відкритих отворів

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

і не працює промислова вентиляція, прийmemo, що витікання горючого газу із приміщення не відбувається.

Розраховуємо масу пропілену, що надійшов до приміщення за 2 хв. = 120 с, за формулою (4.94):

$$m_{\Gamma} = 0,002 \cdot 120 = 0,24 \text{ кг.}$$

4. Розраховуємо середню концентрацію газу, що утворилася у приміщенні за час витoku, за формулою (4.93):

$$V_{\text{вильн}} = (1 - 0,25)12 \cdot 4 \cdot 2,8 = 100,8 \text{ м}^3.$$

$$\varphi_{\text{сер}} = \frac{100 \cdot 0,24}{1,8 \cdot 100,8} = 0,13 \text{ \%}.$$

Середня фактична концентрація пропілену у приміщенні є меншою, за нижню концентраційну межу поширення полум'я, отже у всьому приміщенні вибухонебезпечна газоповітряна суміш не утвориться.

5. Визначаємо розміри зони вибухонебезпечної загазованості.

5.1. Розраховуємо передекспоненційний множник φ_0 за формулою (4.103):

$$\varphi_0 = \frac{3 \cdot 0,13}{0,2} = 1,95 \text{ \%}.$$

5.2. Розраховуємо горизонтальні розміри зони

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу С

вибухонебезпечної загазованості за формулами (4.100) та (4.101):

$$X_{\text{нкмпш}} = 1,1314 \cdot 4 \sqrt{\ln\left(\frac{1,38 \cdot 1,95}{2,4}\right)} = 1,5 \text{ м.}$$

$$Y_{\text{нкмпш}} = 1,1314 \cdot 12 \sqrt{\ln\left(\frac{1,38 \cdot 1,95}{2,4}\right)} = 4,6 \text{ м;}$$

5.3. Розраховуємо вертикальний розмір зони загазованості за формулою (4.105):

$$Z_{\text{нкмпш}} = 0,02828 \cdot 2,8 \sqrt{\ln\left(\frac{1,38 \cdot 1,95}{2,4}\right)} = 0,03 \text{ м;}$$

$$H_{\text{нкмпш}} = 1,1 + 0,03 = 1,13 \text{ м.}$$

Висновок: у даному приміщенні на 2-гу хвилину розвитку аварійної ситуації розміри зони загазованості є меншими, ніж відстань від джерела надходження пропілену до електричного вимикача (5 м), тобто концентрація пропілену біля електричного вимикача є вибухобезпечною.

Приклад розв'язання задачі

Визначити наслідки надзвичайної ситуації, що сталася у кухонному приміщенні розмірами 6×6×4 м внаслідок руйнування балона об'ємом 12 л, що містить

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

6 кг зрідженої пропан-бутанової суміші. Склад суміші: 60 об. % пропану, 40 об. % бутану. Робочий тиск у балоні дорівнює 1,6 МПа. Прийняти, що 10 % об'єму приміщення зайнято меблями. Температура у приміщенні дорівнює 20 °С, атмосферний тиск – 100 кПа.

Розв'язання

1. Визначаємо за довідником [7] нижню концентраційну межу поширення полум'я, молярну теплоту згоряння і молярну масу компонентів пропан-бутанової суміші:

пропан: $\varphi_{\text{н}} = 2,3 \%$; $Q_{\text{н}} = 2044 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$; $\mu = 44 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$;

бутан: $\varphi_{\text{н}} = 1,8 \%$; $Q_{\text{н}} = 2657 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$; $\mu = 58 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$.

2. Розраховуємо нижню концентраційну межу поширення полум'я суміші за її відсотковим складом та значенням нижньої КМПП компонентів за формулою (3.10):

$$\varphi_{\text{н сум}} = \frac{60 + 40}{\frac{60}{2,3} + \frac{40}{1,8}} = 2,07 \%$$

3. Розраховуємо середню молярну масу пропан-бутанової суміші даного складу за формулою (4.78):

$$\mu_{\text{сум}} = 0,6 \cdot 44 + 0,4 \cdot 58 = 49,6 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$$

4. Розраховуємо густину повітря у приміщенні і пропан-бутанової суміші за даних умов за формулою (4.39):

$$\rho_{\text{пов}} = \frac{29}{22,4(1 + 0,00367 \cdot 20)} = 1,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$\rho_{\text{г}} = \frac{49,6}{22,4(1 + 0,00367 \cdot 20)} = 2,06 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

5. Розраховуємо вільний об'єм приміщення:

$$V_{\text{вільн}} = 6 \cdot 6 \cdot 4(1 - 0,1) = 129,6 \text{ м}^3.$$

6. Визначаємо масу газу, що надійшов у приміщення за аварійної ситуації.

Через те що робочий тиск у балоні перевищує атмосферний тиск, витікання пропан-бутанової суміші із балона у приміщення буде відбуватися доти, доки тиск у балоні не зрівняється з тиском у приміщенні. Оскільки пропан-бутанова суміш є важчою за повітря, частина її ($12 \text{ л} = 0,012 \text{ м}^3$) залишиться в балоні.

$$m_{\text{г}} = 6 - 0,012 \cdot 2,06 = 5,97 \text{ кг}.$$

7. Розраховуємо середню фактичну концентрацію газової суміші, що утворилася у приміщенні внаслідок аварійного витоку 6 кг пропан-бутанової суміші, за даних умов за формулою (4.93):

$$\varphi_{\text{сер}} = \frac{5,97}{2,06 \cdot 129,6} 100 = 2,24 \text{ \%}.$$

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

Середня фактична концентрація пропан-бутанової суміші у приміщенні є більшою, за нижню концентраційну межу поширення полум'я, отже у всьому приміщенні утвориться вибухонебезпечна газоповітряна хмара.

8. Визначаємо надлишковий тиск вибуху газоповітряної хмари, що утворилася у приміщенні внаслідок аварійної ситуації.

8.1. Розраховуємо масову теплоту згоряння суміші з використанням формул перерахунку молярної теплоти у масову та об'ємної частки у масову частку компонентів суміші (див. частина 1, розділ 1, глава 2):

$$Q'_{nC_3H_8} = \frac{2044 \cdot 1000}{44} = 46454 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1};$$

$$Q'_{nC_4H_{10}} = \frac{2657 \cdot 1000}{58} = 45810 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1};$$

$$g_{C_3H_8} = \frac{0,6 \cdot 44}{0,6 \cdot 44 + 0,4 \cdot 58} = 0,53;$$

$$g_{C_4H_{10}} = \frac{0,4 \cdot 58}{0,6 \cdot 44 + 0,4 \cdot 58} = 0,47;$$

$$Q'_{n\text{сум}} = 46454 \cdot 0,53 + 45810 \cdot 0,47 = 46048 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

8.2. Розраховуємо надлишковий тиск вибуху за формулою (4.71).

Приймаємо, що теплоємність повітря дорівнює $1,01 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, а коефіцієнт участі газів у вибуху у приміщенні дорівнює $z = 0,5$.

$$\Delta P = \frac{100 \cdot 46048 \cdot 5,97 \cdot 0,5}{129,6 \cdot 1,2 \cdot 1,01 \cdot 293 \cdot 3} = 99,5 \text{ кПа.}$$

Висновок: у випадку витоку пропан-бутанової суміші у приміщення за даних умов зона вибухонебезпечної загазованості займе все приміщення. Вибух цієї хмари буде супроводжуватися підвищенням тиску на 99,5 кПа. Оскільки $99,5 \text{ кПа} > 50 \text{ кПа}$, за умови вибуху станеться повне руйнування несучих будівельних конструкцій та загибель людей.

Приклад розв'язання задачі

У технологічному процесі нарощування кремнію здійснюється відновлення тетрахлориду кремнію в атмосфері водню в реакторі об'ємом $0,09 \text{ м}^3$ під тиском 200 кПа за температури $1200 \text{ }^\circ\text{C}$. Водень подають до реактора по трубопроводу довжиною 15 м, діаметром 2 см під тиском 300 кПа.

Визначити параметри надзвичайної ситуації, що сталася внаслідок розгерметизації на рівні підлоги трубопроводу подавання водню. Площа аварійного отвору в трубопроводі дорівнює $0,5 \text{ см}^2$. Час автоматичного вимкнення колектора з воднем від трубопроводу дорівнює 120 с. Приміщення цеху має розміри $14 \times 18 \times 6 \text{ м}$, 25 % об'єму приміщення зайнято обладнанням. Рух повітря у приміщенні відбувається зі швидкістю $0,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Атмосферний тиск дорівнює 101,3 кПа, температура повітря – $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Розв'язання

1. Визначаємо нижню концентраційну межу

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

поширення полум'я та максимальний тиск вибуху водню за довідником [7]: $\varphi_H = 4,1 \%$; $P_{\max} = 730$ кПа.

2. Розраховуємо густину водню, що вийшов у приміщення за даних умов, за формулою (4.39):

$$\rho_{H_2} = \frac{2}{22,4(1 + 0,00367 \cdot 20)} = 0,083 \text{ кг} \cdot \text{м}^3.$$

3. Розраховуємо масу водню, що надійшов у приміщення із розгерметизованого обладнання.

3.1. Розраховуємо масу водню, що надійшов у приміщення із реактора, за формулою (4.91):

$$m_{H_2}(\text{реакт}) = 0,083 \frac{0,09 \cdot 200 \cdot 293}{1473 \cdot 101,3} = 0,003 \text{ кг}.$$

3.2. Розраховуємо масу водню, що надійшов у приміщення із трубопроводу.

Розраховуємо витрату, з якою водень виходить із трубопроводу до спрацьовування автоматичної системи вимкнення під тиском 300 кПа, за формулою (4.86), через те що режим витоку є критичним:

$$R_{\text{штг}} = \frac{8,314}{2 \cdot 10^{-3}} = 4157 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}.$$

$$g_{\text{H}_2}^{\text{надх}} = 0,64 \cdot 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot 3 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{1}{4157 \cdot 293} \cdot \frac{2 \cdot 1,4}{1,4+1} \left(\frac{2}{1,4+1} \right)^{\frac{2}{1,4-1}}} =$$
$$= 0,006 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

До спрацьовування автоматичної системи вимкнення із трубопроводу у приміщення надійшла маса водню, яку розраховуємо за формулою (4.94):

$$m_{\text{H}_2} = 0,006 \cdot 120 = 0,72 \text{ кг.}$$

Розраховуємо масу водню, що залишився у трубопроводі після спрацьовування автоматичної системи вимкнення і також буде витікати у приміщення, за формулою (4.91):

$$m_{\text{H}_2}(\text{тр.}) = 0,083 \frac{15 \cdot 3,14 \cdot 0,01^2 \cdot 300 \cdot 293}{293 \cdot 101,3} = 0,001 \text{ кг.}$$

3.3. Розраховуємо загальну масу водню, що надійшов у приміщення:

$$m_{\text{H}_2} = 0,003 + 0,72 + 0,001 = 0,724 \text{ кг.}$$

4. Розраховуємо вільний об'єм приміщення:

$$V_{\text{вільн}} = (1 - 0,25)14 \cdot 18 \cdot 6 = 1134 \text{ м}^3.$$

5. Розраховуємо середню концентрацію водню у приміщенні за формулою (4.93):

$$\varphi_{\text{сер}} = \frac{100 \cdot 0,724}{0,083 \cdot 1134} = 0,77 \%$$

Середня концентрація водню у приміщенні є меншою, за його нижню концентраційну межу поширення полум'я ($\varphi_n = 4,1 \%$), отже, в певній частині приміщення утвориться зона вибухонебезпечної загазованості.

6. Розраховуємо розміри зони вибухонебезпечної загазованості.

6.1. Розраховуємо передекспоненційний множник для рухомого газового середовища за формулою (4.103):

$$\varphi_0 = \frac{3 \cdot 0,77}{0,1} = 23,1 \%$$

6.2. Розраховуємо горизонтальні розміри зони вибухонебезпечної загазованості за формулами (4.100) та (4.101):

$$X_{\text{нкмш}} = 1,1314 \cdot 14 \sqrt{\ln\left(\frac{1,38 \cdot 23,1}{4,1}\right)} = 22,7 \text{ м};$$

$$Y_{\text{нкмш}} = 1,1314 \cdot 18 \sqrt{\ln\left(\frac{1,38 \cdot 23,1}{4,1}\right)} = 29,1 \text{ м}.$$

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу С

6.3. Розраховуємо висоту зони вибухонебезпечних концентрацій за формулою (4.104):

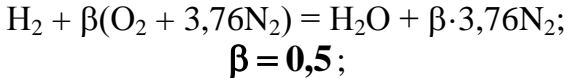
$$H_{\text{НКМПП}} = 0,02828 \cdot 6 \sqrt{\ln\left(\frac{1,38 \cdot 23,1}{4,1}\right)} = 0,24 \text{ м.}$$

7. Оскільки $\varphi_{\text{сер}} < 0,5\varphi_{\text{н}}$, коефіцієнт участі водню у вибуху розраховуємо за формулою (4.109), через те що $X_{\text{НКМПП}} > 0,5L$ та $Y_{\text{НКМПП}} > 0,5F$:

$$z = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{0,724} 0,083 \left(23,1 + \frac{4,1}{1,38} \right) 14 \cdot 18 \cdot 0,24 = 0,92$$

8. Розраховуємо надлишковий тиск вибуху газоповітряної хмари, що утворюється у приміщенні внаслідок аварійної ситуації.

8.1. Розраховуємо стехіометричну концентрацію водню:



$$\varphi_{\text{стм}} = \frac{100}{1 + 0,5 \cdot 4,76} = 29,6 \text{ \%}.$$

8.2. Розраховуємо надлишковий тиск вибуху водню за даних умов за формулою (4.70):

$$\Delta P = (730 - 101) \frac{100 \cdot 0,724 \cdot 0,92}{1134 \cdot 0,083 \cdot 29,6 \cdot 3} = 5 \text{ кПа.}$$

Висновок: внаслідок надзвичайної ситуації, що сталася при розгерметизації трубопроводу подавання водню, у приміщенні цеху за даних умов утворилася зона вибухонебезпечної загазованості, горизонтальні розміри якої перевищують розміри приміщення, а висота зони загазованості дорівнює 0,24 м. Вибух цієї хмари буде супроводжуватися надлишковим тиском 5 кПа.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Для газового фонтана, параметри якого наведено у таблиці, розрахувати безпечну відстань від факела:

- а) для людей без захисного одягу;
- б) для особового складу у бойовому одязі;
- в) для пожежної техніки.

Коефіцієнт повноти згоряння прийняти рівним 0,85.

№	Склад газового фонтана, об. %				Дебіт, млн. м ³ ·доба ⁻¹	Висота відриву факела, м	Кут нахилу, °
	метан	етан	пропан	бутан			
1	95,0	5,0			3,0	1,0	0
2		95,0	5,0		6,0	1,5	5
3			95,0	5,0	3,1	1,1	10
4	5,0			95,0	4,0	0,5	15
5	93,0		7,0		5,9	1,6	20
6	95,7	4,3			3,2	1,3	25
7	97,2	2,8			5,8	1,7	30
8	90,3			9,7	3,3	1,4	35
9	97,6			2,4	5,6	1,8	45
10	93,8	2,0	4,2		3,5	1,5	0
11	94,5	2,0	1,5	2,0	5,4	1,9	5
12	95,9	2,1	1,1	0,9	3,7	1,6	10
13	97,8	2,2			5,2	2,0	15
14	82,0	9,7	6,0	2,3	3,9	1,9	20
15	93,4	2,9	1,9	1,8	5,0	1,7	25
16	90,8	5,2	3,6	0,4	4,1	1,8	30
17	85,6	5,1	5,3	4,2	4,8	1,1	35
18	84,6	4,4	0,9	0,3	4,3	1,2	45
19	87,2	6,0	4,3	2,5	2,5	0,0	0
20	89,0	5,1	3,9	2,0	3,5	0,7	5

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

2. Для наведених у таблиці горючих газів, що надходять певний час у навколишнє середовище через нещільність технологічного обладнання заданого розміру, розрахувати такі параметри надзвичайної ситуації:

- а) радіус зони вибухонебезпечної загазованості;
- б) надлишковий тиск в ударній хвилі вибуху на заданій відстані від джерела витоку газу;
- в) радіус зон ураження ударною хвилею вибуху;
- г) радіус ураження людей випромінюванням «вогневої сфери».

Робочий тиск і температура в апараті та параметри навколишнього середовища наведено у таблиці.

№ варіанта	Газ	Діаметр отвору, мм	Тиск в апараті, кПа	Температура в апараті, °С	Час витоку газу, хв.	Температура повітря, °С	Атмосферний тиск, кПа	Відстань від джерела витоку газу, м
1	ацетилен	15	300	50	10	15	96	5
2	водень	18	240	100	5	10	97	6
3	метан	7	130	200	8	5	100	7
4	етан	8	170	300	10	20	101	8
5	пропан	15	350	150	12	15	96,5	9
6	бутан	7	240	250	11	7	102	10
7	сірководень	8	250	20	12	10	97,5	11
8	силан	8	240	40	10	10	98,5	12
9	етилен	7	140	60	8	5	98	13
10	пропілен	8	140	80	7	10	99	14
11	бутилен	6	130	100	10	10	96	15
12	етилен	8	120	10	7	8	97	16
13	циклобутан	5	150	30	10	10	100	17

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу С

№ варіанта	Газ	Діаметр отвору, мм	Тиск в апараті, кПа	Температура в апараті, °С	Час витоку газу, хв.	Температура повітря, °С	Атмосферний тиск, кПа	Відстань від джерела витоку газу, м
14	ацетилен	7	200	50	8	12	101	18
15	водень	6	150	70	10	10	96,5	19
16	метан	5	130	90	8	15	102	20
17	пропан	7	300	150	12	0	103	22
18	бутан	9	170	130	11	8	98,5	23
19	ізобутан	4	220	170	10	-20	96	24
20	циклопропан	5	230	190	9	-15	97	25
21	диметилпропан	6	240	270	1	-10	98	26
22	пропілен	7	250	210	2	-5	99	27
23	бутилен	8	260	0	3	10	100	28
24	аміак	9	270	10	4	0	101	29
25	бутадиєн-1,3	10	280	20	5	5	102	30
26	ізобутилен	11	290	30	6	15	103	31
27	хлоретилен	12	300	40	7	20	104	31
28	кетен	4	310	50	8	25	105	33
29	хлорметан	5	320	60	9	30	96,5	34
30	метиламін	6	330	70	10	35	97,5	35
31	діазометан	8	350	90	12	-5	99,5	37
32	триметиламін	9	360	100	13	10	100,5	38
33	формальдегід	10	370	110	14	0	101,5	39
34	етилена оксид	11	380	120	16	5	102,5	40
35	формаїд	12	390	130	15	15	103,5	41

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

3. Для наведених у таблиці горючих газів, витік яких стався у навколишнє середовище внаслідок повного аварійного руйнування технологічного апарата, розрахувати:

- а) радіус зон ураження ударною хвилею вибуху;
- б) параметри ураження людей вогневою сферою, що утворилась під час згоряння газоповітряної хмари;
- в) радіус зони вибухонебезпечної загазованості.

Робочий тиск і температура в апараті та параметри навколишнього середовища наведено у таблиці.

№ варіанта	Газ	Об'єм апарата, м ³	Тиск в апараті, кПа	Температура газу в апараті, °С	Температура повітря, °С	Атмосферний тиск, кПа
1	водень	1100	240	100	10	97
2	водень	500	500	400	-10	98
3	водень	100	150	25	-5	99
4	метан	1200	1100	150	5	100
5	метан	600	250	300	0	101
6	метан	200	450	10	5	102
7	ацетилен	1000	200	100	15	96
8	ацетилен	400	170	50	20	103
9	ацетилен	150	130	0	-20	104
10	етан	1300	170	200	20	101
11	етан	550	260	300	-15	97,5
12	етан	250	350	35	5	98,5
13	етилен	1700	150	120	-5	99,5
15	етилен	300	300	60	35	100,5
16	етилен	50	250	20	15	96,5
14	етилен	500	2000	100	20	101,3
17	пропан	2000	130	250	40	101,5
18	пропан	700	500	350	20	102,5
19	пропан	350	800	0	-5	103,5
20	пропілен	2300	160	140	20	104,5

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу С

№ варіанга	Газ	Об'єм апарата, м ³	Тиск в апараті, кПа	Температура газу в апараті, °С	Температура повітря, °С	Атмосферний тиск, кПа
21	пропілен	750	220	70	0	101,3
22	пропілен	250	520	50	0	103,5
23	аміак	1000	170	50	20	103
24	аміак	400	130	0	-20	104
25	аміак	150	170	200	20	101
26	епоксіетан	1300	260	300	-15	97,5
27	епоксіетан	550	350	35	5	98,5
28	епоксіетан	250	150	120	-5	99,5
29	оксид карбону (II)	1700	300	60	35	100,5
30	оксид карбону (II)	300	800	0	-5	103,5
31	оксид карбону (II)	350	200	100	15	96
32	винилхлорид	20	150	50	20	100
33	винилхлорид	50	500	120	10	101
34	гідроген сульфур	100	700	200	35	99
35	гідроген сульфур	75	350	400	-15	100,5

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

4. Для наведених у таблиці горючих газів, що надходять унаслідок аварійної ситуації у приміщення, параметри якого наведено у таблиці, розрахувати:

а) чи буде досягнута вибухонебезпечна концентрація газу в об'ємі приміщення за час аварійного витoku газу;

б) за який мінімальний час утвориться вибухонебезпечна концентрація газу в об'ємі приміщення;

в) масу газу, яка повинна надійти до об'єму приміщення для досягнення нижньої концентраційної межі поширення полум'я за даних умов газообміну.

№ варіанта	Газ	Діаметр отвору в трубі, мм	Параметри приміщення				Розміри вікна, м		Температура зовні, °С	Температура у приміщенні, °С	Час витoku газу, хв.	Тиск у системі, кПа
			L, м	F, м	H, м	η	h	b				
1	метан	15	3	2	2,5	0,2	1,0	0,6	15	25	10	300
2	метан	1,8	4	3	2,8	0,1	-	-	10	24	5	2000
3	метан	8	4	5	3,0	0,2	-	-	10	18	12	150
4	етан	7	3	2	2,5	0,1	1,8	0,8	5	23	8	1500
5	етан	0,8	5	3	3,0	0,2	-	-	20	22	10	170
6	етан	8	4	3	2,9	0,1	1,0	0,6	5	15	9	370
7	етан	0,7	5	4	3	0,2	-	-	0	25	12	300
8	етилен	1,5	4	3	3,0	0,3	1,2	0,5	15	21	12	320
9	етилен	7	4	4	2,8	0,2	0,9	0,7	7	19	11	200
10	бутан	0,7	4	3	2,7	0,2	1,2	0,7	15	16	10	400
11	бутан	8	5	4	3	0,3	1,2	0,5	10	15	10	300
12	бутан	8	3	2	2,5	0,3	0,5	0,5	8	22	7	150
13	бутан	5	3	4	2,8	0,1	-	-	10	21	10	500
14	пропан	9	4	3	2,8	0,1	1,4	0,5	-8	24	11	210
15	пропан	0,8	3	3	2,9	0,3	1,0	0,6	10	23	10	140
16	пропан	6	4	5	2,8	0,2	-	-	15	22	8	220
17	пропан	0,5	5	3	2,8	0,1	-	-	10	21	10	250

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу С

№ варіанта	Газ	Діаметр отвору в трубі, мм	Параметри приміщення				Розміри вікна, м		Температура зовні, °С	Температура у приміщенні, °С	Час витоку газу, хв.	Тиск у системі, кПа
			L, м	F, м	H, м	η	h	b				
18	ацетилен	8	4	3	2,8	0,2	-	-	10	19	11	230
19	ацетилен	0,7	4	5	3,0	0,3	1,0	0,6	5	18	12	340
20	ацетилен	9	4	3	2,7	0,1	-	-	0	16	10	420
21	аміак	8	3	3	2,9	0,3	1,8	0,8	10	24	11	240
22	аміак	5	4	3	2,7	0,2	-	-	10	18	10	600
23	аміак	9	5	4	3	0,3	1,0	0,6	5	23	8	700
24	аміак	0,8	3	2	2,5	0,3	-	-	20	22	10	800
25	ізобутан	6	3	4	2,8	0,1	1,2	0,5	5	15	11	900
26	ізобутан	0,5	3	2	2,5	0,2	0,9	0,7	0	25	12	950
27	ізобутан	0,7	4	3	2,8	0,1	1,2	0,7	15	21	8	990
28	ізобутан	1,5	4	5	3,0	0,2	1,2	0,5	7	19	10	1050
29	силан	7	3	2	2,5	0,1	0,5	0,5	15	16	9	210
30	силан	0,7	3	4	2,8	0,1	-	-	10	15	12	310

5*. Унаслідок аварійного пошкодження зовнішньої технологічної установки з етиленом, горючий газ надходив до навколишнього середовища протягом 12 хвилин крізь нещільність діаметром 20 мм. Робочий режим експлуатації технологічної установки – тиск 2,4 МПа, температура – 400 °С. Розрахувати такі параметри надзвичайної ситуації: радіус зони вибухонебезпечної загазованості; надлишковий тиск в ударній хвилі вибуху на відстані 30 м від джерела витоку газу; радіуси зон ураження ударною хвилею вибуху та випромінюванням вогневої сфери. Температура повітряного середовища – мінус 20 °С, атмосферний тиск – 99 кПа.

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

6*. У виробничому приміщенні розмірами $18 \times 4 \times 3$ м з відкритим віконним отвором розміром $1,5 \times 2$ м відбувається аварійне витікання суміші пропану (30 об. %) і пропілену (70 об. %) із реактора через отвір діаметром 5 мм під тиском 2,5 МПа з температурою 400 К. Визначити, чи буде досягнута вибухонебезпечна концентрація газу в об'ємі приміщення за 5 хв. аварійного витікання газової суміші, а також за який мінімальний час утвориться вибухонебезпечна концентрація газової суміші у вільному об'ємі приміщення. Розрахувати надлишковий тиск вибуху газової суміші, яка утворилася у вільному об'ємі приміщення за даних умов газообміну через 10 хв. аварійного витікання.

Прийняти, що 15 % об'єму приміщення зайнято обладнанням. Температура газового середовища у приміщенні дорівнює 300 К, ззовні приміщення – 270 К, атмосферний тиск дорівнює 100,5 кПа.

7*. Для силану SiH_4 , витік якого стався у навколишнє середовище внаслідок повного аварійного руйнування технологічного апарата об'ємом 300 м^3 , розрахувати радіус зон ураження ударною хвилею вибуху, параметри ураження людей вогневою сферою, що утворилась під час згоряння газоповітряної хмари, радіус зони вибухонебезпечної загазованості. Робочий тиск в апараті 2,1 МПа, температура в апараті дорівнює 350 К. Параметри навколишнього середовища: $P_{\text{атм}} = 100 \text{ кПа}$, $T_0 = 280 \text{ К}$.

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу С

8. Для наведених у таблиці горючих газів, що надходять унаслідок аварійної ситуації в ізольоване приміщення, параметри якого наведено у таблиці, розрахувати:

а) чи буде досягнута за час аварійного витoku вибухонебезпечна концентрація газу біля джерела запалювання (ДЗ), що знаходиться на заданій відстані від місця витoku газу;

б) за який час утвориться вибухонебезпечна концентрація газу біля джерела запалювання, що знаходиться на заданій відстані від місця витoku газу;

в) розміри зони вибухонебезпечної загазованості на заданий час розвитку аварійної ситуації.

Прийняти умови у приміщенні стандартними.

№ варіанта	Газ	Діаметр аварійного отвору, мм	Параметри приміщення				Швидкість руху повітря у приміщенні, м·с ⁻¹	Висота розташування джерела витoku газу, м	Час витoku газу, хв.	Відстань до ДЗ, м	Тиск у системі, кПа
			L, м	F, м	H, м	η					
1	метан	15	3	2	2,5	0,15	0	0	10	2,5	300
2	метан	1,8	4	3	2,8	0,10	0	0,1	5	3,0	240
3	етан	7	3	2	2,5	0,1	0,5	0,2	8	1,5	130
4	етан	8	5	3	3,0	0,15	0,4	0,6	10	1,7	170
5	етилен	5	4	3	3,0	0,20	0,25	0,7	12	1,5	500
6	етилен	7	4	6	2,8	0,2	0,7	0,8	11	1,7	200
7	метан	8	4	5	3,0	0,18	0	1,1	12	1,8	150
8	буган	2,7	4	3	2,7	0,20	0,1	1,2	10	2,0	400
9	буган	8	5	4	3	0,25	0	1,3	10	2,0	950
10	буган	7	4	3	3	0,25	0,5	1,4	8	1,8	740
11	бутилен	4,8	3	6	2,8	0,10	0,4	0	7	1,5	400
12	бутилен	8	3	3	2,5	0,10	0,7	0,4	7	0,9	120

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

№ варіанта	Газ	Діаметр аварійного отвору, мм	Параметри приміщення				Швидкість руху повітря у приміщенні, м·с ⁻¹	Висота розташування джерела витоку газу, м	Час витоку газу, хв.	Відстань до ДЗ, м	Тиск у системі, кПа
			L, м	F, м	H, м	η					
13	бутилен	5	3	4	2,8	0,15	0	0,3	10	1,3	500
14	пропілен	3	4	5	3	0,20	0,1	0,5	8	2,5	700
15	пропілен	6	4	3	2,5	0,15	0	1,0	10	1,5	150
16	пропілен	8	4	3	2,9	0,15	0,5	0	9	1,5	220
17	пропілен	7	5	4	3	0,25	0,3	0,1	12	2,5	300
18	пропан	6	4	3	2,8	0,15	0,7	0,2	11	1,8	170
19	пропан	8	3	3	2,9	0,10	0	0,6	10	2,0	140
20	пропан	6	4	3	2,8	0,20	0	0,7	8	1,5	210
21	пропан	5	5	3	2,8	0,25	0	0,8	10	2,0	250
22	ацетилен	8	4	5	2,8	0,15	0	1,1	11	1,7	200
23	ацетилен	7	4	6	3,0	0,15	0,5	1,2	12	1,8	150
24	ацетилен	9	4	3	2,7	0,25	0,7	1,3	10	2,0	400
25	ацетилен	8	5	4	3	0,15	0,2	1,4	10	2,0	250
26	аміак	7	4	3	2,9	0,10	0	0	11	1,7	200
27	аміак	3	3	3	2,8	0,20	0,1	0,4	12	1,8	150
28	аміак	8	3	3	2,8	0,25	0	0,3	10	2,0	400
29	ізобутан	5	3	5	2,8	0,15	0	0,5	10	2,0	250
30	ізобутан	7	4	6	3,0	0,15	0,5	1,0	8	1,8	840
31	водень	2	4	3	3	0,15	0,2	1,3	10	1,8	140
32	водень	9	5	5	3,4	0,10	0,3	1,4	8	2,0	210
33	водень	10	4	6	4	0,20	0	0	10	2,0	250
34	водень	15	5	3	5	0,25	0,15	0,4	11	1,7	200
35	водень	8	4	4	2,9	0,15	0,4	0,3	12	1,8	150

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу С

9. Для горючих газів, наведених у таблиці, розрахувати надлишковий тиск вибуху, що стався унаслідок аварійної розгерметизації у приміщенні заданих розмірів ємності з горючим газом за нормальних умов.

№ варіанта	Газ	Параметри приміщення				Швидкість руху повітря у приміщенні, м/с	Температура в апараті, °С	Тиск в апараті, Р·10 ³ Па	Об'єм апарата, м ³
		L, м	F, м	H, м	η				
1	ацетилен	10	6	4	0,15	0,1	50	3,0	1
2	водень	5	5	3	0,18	0,13	100	2,4	1,1
3	метан	8	6	3	0,07	0,5	150	1,3	1,2
4	етан	9	6	3	0,08	0,15	200	1,7	1,3
5	пропан	12	8	4	0,25	0,2	250	3,5	1,4
6	бутан	11	6	3	0,07	0,22	300	2,4	1,5
7	сірководень	15	8	4	0,18	0,25	50	2,5	1,6
8	силан	10	8	3	0,28	0,7	100	2,4	1,8
9	етилен	12	7	4	0,17	0,33	150	1,4	1,9
10	пропілен	11	8	2	0,08	0,3	200	1,4	2,0
11	бутилен	15	9	4	0,06	0,37	250	1,3	2,1
12	етилен	18	8	5	0,18	0,27	300	1,2	2,2
13	циклобутан	10	16	4	0,15	0,6	350	1,5	2,3
14	вінілацетилен	10	5	4	0,08	0,7	50	2,2	2,8
15	пропан	12	5	3	0,07	0,35	500	3,0	2,9
16	ацетилен	12	8	4	0,17	0,33	50	1,7	2,0
17	водень	11	6	3	0,08	0,3	100	3,5	2,1
18	метан	15	8	4	0,06	0,37	150	2,4	2,2
19	етан	10	5	3	0,28	0,27	200	2,5	2,3
20	пропан	12	5	3	0,05	0,6	250	2,4	2,8

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

21	хлорметан	10	8	4	0,25	0,15	300	2,4	1,5
22	метиламін	12	7	3	0,07	0,18	50	1,3	1,6
23	триметиламін	11	8	4	0,18	0,07	100	1,7	1,8
24	формальдегід	15	9	3	0,28	0,08	150	3,5	1,9
25	ізобутилен	18	8	4	0,17	0,25	200	2,4	2,0
26	хлоретилен	10	16	2	0,08	0,07	250	2,5	2,1
27	кетен	10	5	4	0,06	0,18	300	2,4	2,2
28	формамід	15	8	5	0,18	0,28	350	1,4	2,3
29	бромметан	10	5	4	0,15	0,17	450	1,4	2,8
30	діазометан	12	5	4	0,08	0,08	500	1,3	2,9

10*. У закритому приміщенні компресорної станції розмірами 8×6×3 м відбувається аварійне витікання метану через пошкоджене фланцеве з'єднання діаметром 5 мм під тиском 150 кПа протягом 12 хв. Розрахувати, чи буде досягнута за час аварійного витікання вибухонебезпечна концентрація метану біля джерела запалювання, що знаходиться на відстані 3 м від місця витікання газу; за який мінімальний час утвориться вибухонебезпечна концентрація газу біля джерела запалювання; розміри зони вибухонебезпечної загазованості.

Прийняти умови газового середовища у приміщенні стандартними; вільний об'єм приміщення становить 80 % його об'єму.

Глава 3 Параметри розвитку пожежі класу С

11. Розрахувати тиск вибуху при надзвичайній ситуації, що сталася в ізольованому приміщенні, параметри якого наведено у таблиці, унаслідок розгерметизації на рівні підлоги технологічної ємності із сумішшю горючих газів. Прийняти, що температура середовища у приміщенні дорівнює 20 °С.

№ варіанта	Газ	Склад суміші, %, (об'ємних відсотків)	Атмосферний тиск, кПа	Швидкість руху повітря у приміщенні, м/с	Параметри приміщення				Тиск в апараті, $P \cdot 10^{-5}$ Па	Об'єм апарата, м ³
					a, м	b, м	h, м	η		
1	ацетилен	10	96	0,1	10	6	4	0,15	3,0	1
	водень	90								
2	метан	20	100	0,15	8	6	3	0,07	1,3	1,1
	етан	80								
3	пропан	30	97	0,2	12	8	4	0,15	3,5	1,4
	бутан	70								
4	сірководень	35	98	0,25	15	8	3	0,08	2,5	1,5
	метан	65								
5	силан	40	99	0,3	10	7	3	0,18	1,4	1,9
	етилен	60								
6	пропілен	45	100	0,35	11	8	2	0,08	1,3	2,1
	бутилен	55								
7	етилен	5	97	0,45	18	7	5	0,28	1,2	2,2
	циклобутан	95								
8	ацетилен	15	101	0,4	11	6	2	0,07	2,0	2,9
	водень	85								
9	метан	25	102	0,05	10	5	4	0,05	1,3	2,0
	оксид карбону (II)	75								
10	пропан	35	103	0,5	12	5	3	0,17	3,0	2,2
	бутан	65								

12*. Розрахувати надлишковий тиск вибуху пропану у приміщенні розмірами $10 \times 5 \times 3$ м. Пропан потрапляє у приміщення унаслідок його аварійного виходу через отвір площиною 3 см^2 із технологічної системи, яка складається з реактора об'ємом 3 м^3 та вхідного трубопроводу довжиною 10 м і діаметром 4 см. Тиск у реакторі дорівнює 900 кПа. Тиск у трубопроводі дорівнює 500 кПа. Температура пропану у технологічному реакторі дорівнює $400 \text{ }^\circ\text{C}$, у трубопроводі – $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Час автоматичного аварійного вимкнення подачі газу дорівнює 180 с.

Прийняти, що 30 % приміщення зайнято обладнанням. Рух повітря у приміщенні відбувається зі швидкістю $0,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Атмосферний тиск дорівнює 101,3 кПа, температура повітря – $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

13*. У приміщення розмірами $8 \times 6 \times 3,5$ м потрапляє метан з відкритої газової конфорки через отвір діаметром 5 мм. Яку масову витрату повинна забезпечити система витяжної аварійної вентиляції із приміщення, щоб вибухонебезпечна загазованість у приміщенні не створювалася. Прийняти, що 17 % об'єму приміщення зайнято обладнанням. Тиск у системі подачі газу 130 кПа. Умови газового середовища у приміщенні: $T = 299 \text{ K}$, $P = 100 \text{ кПа}$.

РОЗДІЛ 5. ПАРАМЕТРИ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ ВОГНЕГАСНИМИ ЗАСОБАМИ

Загасити пожежу, з фізичної точки зору, означає припинити процес горіння у всіх його видах, тобто створити в зоні реакції умови, що виключають можливість швидкого хімічного перетворення. Відповідно до теплової теорії погасання [1], [5], [10] припинення горіння відбудеться, якщо тепловиділення в зоні хімічної реакції стане менше, ніж тепловтрати від системи у навколишнє середовище.

Інтенсивність виділення тепла у фронті полум'я залежить від виду горючої речовини, концентрації реагуючих компонентів та температури полум'я і виражається рівнянням:

$$q(+)=Q_{\text{н}}\varphi_{\text{гр}}^n\varphi_{\text{ок}}^m k_0 \exp\left(-\frac{E_{\text{акт}}}{RT}\right),$$

де $Q_{\text{н}}$ – нижча теплота згорання горючої речовини;

$\varphi_{\text{гр}}$ – концентрація горючої речовини;

$\varphi_{\text{ок}}$ – концентрація окисника;

m, n – стехіометричні коефіцієнти відповідно при горючій речовині й окиснику в реакції горіння;

k_0 – константа швидкості хімічної реакції;

$E_{\text{акт}}$ – енергія активації;

R – універсальна газова стала;

T – температура системи.

За температур вищих, за температуру самоспалахування, поступово відбувається зниження

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

концентрації реагентів унаслідок їх вигорання. За рахунок цього швидкість хімічної реакції, а, отже, й інтенсивність тепловиділення за температур, близьких до температури горіння, прагнуть не до нескінченності, як випливає з рівняння, а асимптотично наближаються до деякого максимального значення. Тому функція $q(+)=f(T)$ має точку перегину (див. рис. 5.1).

Інтенсивність тепловіддачі від поверхні фронту полум'я визначається променистою теплопередачею і передачею тепла конвекцією й описується рівнянням:

$$q(-) = \alpha S_{\text{ТВ}} (T_{\text{Гор}} - T_0) + \sigma \varepsilon S_{\text{ТВ}} (T_{\text{Гор}}^4 - T_0^4),$$

де α – коефіцієнт конвекційної теплопередачі;

$S_{\text{ТВ}}$ – площа тепловіддачі;

σ – константа Больцмана;

ε – ступінь чорноти полум'я;

$T_{\text{Гор}}$ – температура у фронті полум'я;

T_0 – температура навколишнього середовища.

Якщо в зоні реакції тепла виділяється менше, ніж віддається у навколишнє середовище, відбувається поступове зниження температури системи нижче критичного значення. За більш низьких температур протікання швидкої реакції окиснення стає неможливим і горіння припиняється. Температуру зони реакції, нижче якої горіння стає неможливим, називають **температурою погасання**.

За умови зниження з будь якої причини температури в зоні реакції нижче температури погасання, горіння припиняється навіть за наявності горючої речовини й окисника, через те що зона реакції перестає бути постійно діючим джерелом запалювання

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами
для вихідної горючої суміші.

Співвідношення між інтенсивністю тепловиділення й інтенсивністю тепловтрат від зони горіння під час нестійкого горіння за температури погасання можна подати у вигляді графіка на рис. 5.1.

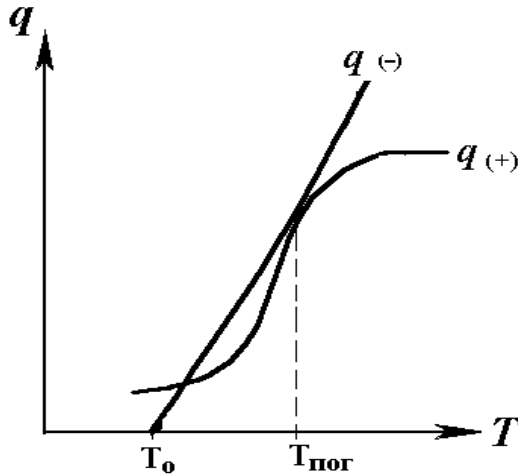


Рис. 5.1 – Графічне відображення критичних умов припинення горіння

Припинення горіння в системі відбудеться за умови зниження температури у зоні реакції горіння на деяку критичну величину ΔT . Максимально можливий розмір зниження температури залежить від режиму горіння. Так, за умови дифузійного горіння температура погасання дорівнює:

$$T_{\text{пог}} = T_{\text{ад}} - \frac{3RT_{\text{ад}}^2}{E_{\text{акт}}}, \text{ К}, \quad (5.1)$$

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

а за умови кінетичного полум'я температура погасання дорівнює:

$$T_{\text{пог}} = T_{\text{ад}} - \frac{RT_{\text{ад}}^2}{E_{\text{акт}}}, \text{ К}, \quad (5.2)$$

де $T_{\text{ад}}$ – адіабатична температура полум'я;

$E_{\text{акт}}$ – енергія активації горючої речовини;

R – універсальна газова стала.

На практиці для припинення горіння використовують різні методи, способи і прийоми пожежогасіння.

Порушення теплової рівноваги в зоні горіння можна здійснити за рахунок або зниження інтенсивності тепловиділення в зоні реакції нижче граничного значення, або підвищення інтенсивності тепловіддачі від системи у навколишнє середовище, або за рахунок одночасного зниження інтенсивності тепловиділення і підвищення інтенсивності тепловіддачі, доки температура в зоні реакції не знизиться до критичного значення – температури погасання.

Для реалізації цих методів припинення горіння використовують певні *способи пожежогасіння*:

- зменшення концентрацій компонентів, що реагують, унаслідок зменшення швидкості надходження або повного припинення доступу окисника чи горючої речовини в зону горіння або додавання в систему негорючих компонентів;

- збільшення енергії активації горючої системи внаслідок введення в систему інгібіторів;

- зниження температури середовища навколо зони горіння шляхом використання речовин, які мають низьку початкову температуру, високу теплоємність і теплоту

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами
фазового переходу;

- збільшення коефіцієнтів тепловіддачі шляхом різкого збільшення швидкості натікання холодного компонента горючої суміші в зону горіння (зрив полум'я) або підвищення ступеня чорноти полум'я (введення в зону горіння спеціальних домішок, які мають велику випромінювальну здатність);

- збільшення площі тепловіддачі шляхом застосування спеціальних пристроїв, вогнеперешкоджувачів або внесення в зону горіння вогнегасних речовини з великою теплоємністю і розвинутою поверхнею теплосприйняття.

Способи пожежогасіння реалізують з використанням певних *тактичних прийомів* припинення горіння:

1. Охолодження:

1.1. охолодження зони горіння до температури, меншої за температуру погасання;

1.2. охолодження поверхні конденсованої горючої речовини до температури, меншої за критичну (для рідин – температура спалаху, для твердих горючих матеріалів – температура піролізу).

2. Розбавлення:

2.1. розбавлення зони горіння негорючими розріджувачами;

2.2. розбавлення горючих рідин взаємно розчинними негорючими домішками.

3. Ізоляція:

3.1. ізоляція горючої речовини від зони горіння;

3.2. ізоляція окисника від зони горіння;

3.3. ізоляція зони горіння як джерела запалювання від горючої суміші.

4. Хімічне гальмування реакції горіння.

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

Поняття способу пожежогасіння включає в себе не тільки механізм припинення горіння, але і тактичні особливості *подавання вогнегасного складу в зону горіння*. Розрізняють *об'ємний і поверхневий способи гасіння*.

При виникненні горіння в умовах обмеженого повітрообміну можна використовувати *спосіб об'ємного гасіння*, при якому вогнегасні засоби подають всередину об'єму, що захищається; при цьому вони розбавляють горюче середовище або витісняють повітря з приміщення чи апарата.

При гасінні пожежі на відкритому просторі застосування вогнегасних засобів об'ємного гасіння є малоефективним, отже у даному випадку використовують переважно *поверхневий спосіб гасіння*, коли вогнегасну речовину подають на поверхню горючої речовини. Це можливо лише в тому випадку, коли горюча речовина знаходиться у конденсованому стані.

Засіб пожежогасіння – це речовини або пристрої, які використовують для припинення горіння під час пожежі. Основними засобами гасіння пожеж є вогнегасні речовини.

Під ***вогнегасними речовинами*** розуміють такі речовини, які можуть безпосередньо впливати на процес горіння та створювати умови для його припинення, або запобігати процесу виникнення горіння.

При подаванні 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 і, в деяких випадках, навіть безпосередньо впливають на швидкість хімічної реакції між компонентами, але при

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

цьому одна з дій переважає над усіма іншими. *За домінуючим впливом*, який справляє вогнегасна речовина на горючу систему в процесі припинення горіння, всі вогнегасні речовини умовно поділяють на чотири класи: *вогнегасні речовини, що розбавляють, ізолюють, охолоджують і інгібірують*.

Вибір вогнегасної речовини залежить від характеру пожежі й визначається:

- властивостями та агрегатним станом речовин, що горять;
- параметрами пожежі (площею пожежі, температурою горіння тощо);
- умовами тепло- й газообміну під час пожежі (в огороженні чи на відкритому просторі);
- наявністю та запасами вогнегасних засобів;
- ефективністю способу гасіння пожежі.

Забороняється застосовувати вогнегасні речовини, які можуть:

- бурхливо реагувати з горючими речовинами і підтримувати процес горіння;
- реагувати з іншими речовинами з виділенням горючих продуктів реакції;
- взаємодіяти з горючими речовинами з утворенням вибухонебезпечних продуктів реакції.

Визначальною умовою вибору вогнегасного засобу є клас пожежі.

Параметри пожежогоасіння показники, що характеризують процес припинення горіння з використанням вогнегасних засобів; їх використовують для визначення показників роботи підрозділів під час гасіння пожежі,

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами
вибору вогнегасного засобу, вирішального напрямку, прийомів і способів подавання вогнегасного засобу. Такими показниками є час гасіння, вогнегасна ефективність та інтенсивність подавання вогнегасної речовини, питома витрата та загальна витрата вогнегасної речовини. Всі параметри пожежогасіння взаємопов'язані між собою.

Час гасіння $\tau_{\text{гас}}$ – час від початку подавання вогнегасної речовини до припинення горіння.

Ефективність вогнегасного засобу E – величина, обернено пропорційна часу гасіння або найменшій концентрації вогнегасної речовини, за якої процес горіння припиняється:

$$E = \frac{1}{\tau_{\text{гас}}} \quad \text{або} \quad E = \frac{1}{\Phi_{\text{вогн}}}. \quad (5.3)$$

Чим меншою є вогнегасна концентрація речовини, тим більша її ефективність. Чим меншою є вогнегасна ефективність засобу, тим більшим є час гасіння та загальна витрата речовини.

Загальна кількість вогнегасної речовини m – кількість вогнегасного засобу, яку подають за час гасіння пожежі на загальну площу пожежі або в об'єм приміщення.

Загальна витрата G – кількість вогнегасної речовини, яку було витрачено під час гасіння пожежі на одиницю розрахункового параметра пожежі:

$$G = \frac{m}{\Pi_{\text{пож}}}, \quad (5.4)$$

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

де $\Pi_{\text{пож}}$ – величина параметра пожежі (периметр пожежі, площа пожежі, об'єм приміщення, що захищається).

Питома витрата – кількість вогнегасного засобу, яку витрачають за одиницю часу на гасіння пожежі:

$$g = \frac{m}{\tau_{\text{гас}}}. \quad (5.5)$$

Інтенсивність подавання 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 подавання вогнегасного засобу можна визначити через витрати:

$$I = \frac{G}{\tau_{\text{гас}}} \quad \text{або} \quad I = \frac{g}{\Pi_{\text{пож}}}. \quad (5.7)$$

З цих формул можна отримати співвідношення:

$$G = I \cdot \tau_{\text{гас}} \quad \text{або} \quad g = I \cdot \Pi_{\text{пож}}. \quad (5.8)$$

Витрата вогнегасного засобу залежить від часу гасіння й інтенсивності його подавання. За малої

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами
інтенсивності подавання час гасіння збільшується; за зростання інтенсивності подавання – час гасіння зменшується. Існує *критична інтенсивність подавання*, за якої гасіння не відбудеться, тобто час гасіння наближається до нескінченності (рис. 5.2).

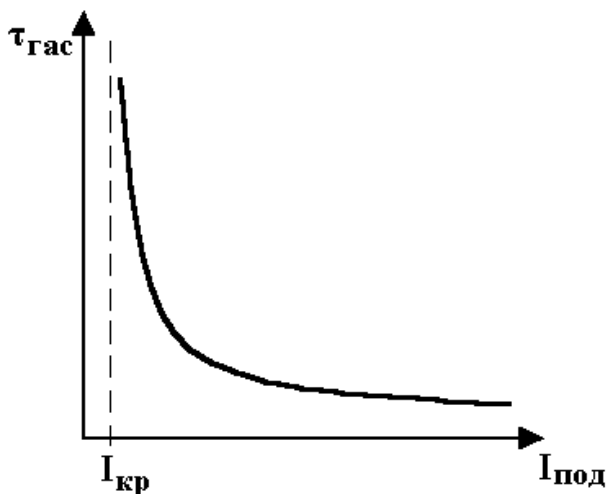


Рис. 5.2 – Залежність часу гасіння від інтенсивності подавання вогнегасного засобу

Залежність загальної витрати від інтенсивності подавання вогнегасної речовини має більш складний характер, який зображено на рис. 5.3. За критичної інтенсивності подавання витрата прямує до нескінченності, через те що час гасіння також прямує до нескінченності. Незначне збільшення інтенсивності подавання суттєво зменшує час гасіння, а отже, витрата зменшується. За значного збільшення інтенсивності подавання вогнегасної речовини час гасіння перестає істотно зменшуватися,

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

загальна витрата починає зростати, через те що надлишок вогнегасного засобу вже не бере участі у процесі гасіння. Отже, існує *оптимальна інтенсивність подавання* вогнегасного засобу та *оптимальний час гасіння* пожежі, за яких витрата вогнегасної речовини буде мінімальною.

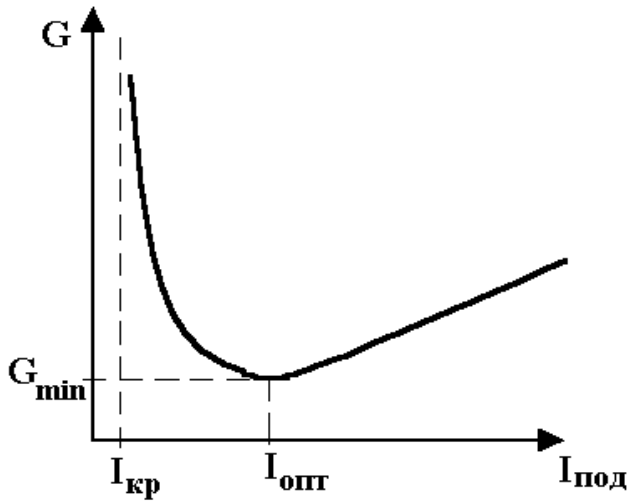


Рис. 5.3 – Залежність загальної витрати вогнегасного засобу від інтенсивності його подавання

Для різних видів вогнегасних засобів характер зміни питомої витрати від інтенсивності подавання зберігає подібну залежність.

Інтенсивність подавання вогнегасного засобу можна визначити або при теоретичному аналізі умов припинення горіння, або дослідним шляхом і розрахунком, або при аналізі загашених пожеж. Інтенсивність подавання вогнегасного засобу, яку отримано при аналізі теоретичних умов припинення горіння, називають

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами
теоретичною. На основі вивчення загашених пожеж отримано узагальнені значення інтенсивності подавання вогнегасної речовини, які зведено у таблиці нормативних документів і довідників. Таку інтенсивність подавання вогнегасної речовини прийнято називати *нормативно*.

Відношення теоретичної інтенсивності подавання вогнегасної речовини до нормативної (або фактичної інтенсивності подавання) називають **коефіцієнтом використання**:

$$K_{\text{вик}} = \frac{I_{\text{теорет}}}{I_{\text{норм}}} . \quad (5.9)$$

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 $m_{\text{под}}$ – маса вогнегасної речовини, що було подано на гасіння;

$m_{\text{втр}}$ – маса вогнегасної речовини, яку втрачено під час гасіння (не бере участі у гасінні).

Для успішного гасіння пожежі необхідно правильно розрахувати оптимальну інтенсивність подавання вогнегасного засобу I , при цьому, загальна витрата вогнегасного засобу G повинна бути мінімальною, а час гасіння τ – не більшим за допустимий.

ГЛАВА 1. ПАРАМЕТРИ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ НЕГОРЮЧИМИ ГАЗАМИ

Припинення горіння шляхом введення в зону реакції негорючих речовин є одним із найбільше ефективних способів гасіння. Негорючі гази широко застосовуються під час гасіння пожеж у приміщеннях. Особливо ефективним є застосування негорючих газів під час захисту музеїв, архівів, бібліотек, обчислювальних центрів та інших особливо важливих об'єктів, де найбільш пріоритетним завданням є максимально можливе збереження матеріальних цінностей.

Вогнегасні речовини, що розбавляють, при введенні 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, при введенні негорючих газів у систему відбувається втрата частини тепла, що виділяється, на нагрівання цих розріджувачів від початкової температури до температури зони горіння. Отже, 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 призведе до припинення горіння.

Негорючі гази можуть використовуватися для запобігання виникненню горіння в замкнених об'ємах.

Запобігання утворенню горючого середовища в газовому просторі за допомогою газів-розріджувачів називають *флегматизацією*.

Флегматизацію широко використовують для забезпечення безаварійної роботи технологічного устаткування, а також під час пуску та зупинення обладнання, в якому можуть утворитися вибухонебезпечні концентрації горючих речовин.

При введенні 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).

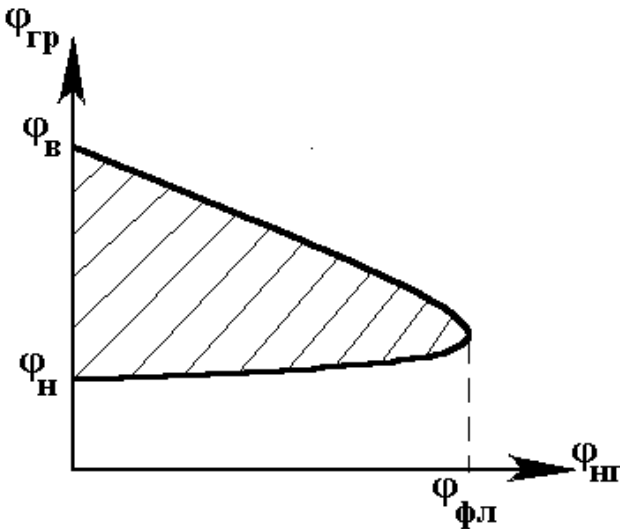


Рис. 5.4 – Залежність області займання від концентрації негорючого газу в суміші “горюча речовина – окисник – негорючий газ”

Флегматизуюча концентрація – це найменша

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

концентрація негорючого газу в суміші з горючої речовиною й окисником, за якої суміш стає нездатною до поширення полум'я за будь-якого співвідношення горючої речовини й окисника.

Флегматизуючу концентрацію газових засобів пожежогасіння розраховують за формулою [38]:

$$\Phi_{\text{фл}} = \frac{100F}{F + \gamma \left(1 + \frac{\Phi_{\text{O}_2}}{100\beta_{\text{CO}}} \right)}, \%, \quad (5.11)$$

де γ – емпіричний параметр, значення якого наведено у таблиці 5.1;

Φ_{O_2} – концентрація кисню в окислювальному середовищі, %;

β_{CO} – стехіометричний коефіцієнт кисню в реакції згоряння речовини до CO та H₂O ($\beta_{\text{CO}} = 0,5n_{\text{C}} + 0,25n_{\text{H}} - 0,5n_{\text{O}}$, де n_{C} , n_{H} , n_{O} – число атомів С, Н, О в молекулі горючої речовини);

F – безрозмірна функція, яку розраховують за формулою:

$$F = \frac{\Phi_{\text{O}_2}}{100\beta_{\text{CO}}} \left(h_{\text{f}} \Delta H_{\text{f}}^{\circ} + \sum_j h_j n_j \right) - 1, \quad (5.12)$$

де $\Delta H_{\text{f}}^{\circ}$ – стандартна теплота утворення горючої речовини в газоподібному стані, кДж·моль⁻¹;

h_{f} – коефіцієнт, рівний $2,58 \cdot 10^{-2}$ моль·кДж⁻¹;

j – тип атома в молекулі горючої речовини;

h_j – коефіцієнт j -го атома в молекулі грючої речовини ($h_{\text{C}} = 2,373$, $h_{\text{H}} = 2,757$, $h_{\text{O}} = -0,522$, $h_{\text{N}} = -0,494$);

Глава 1. Параметри гасіння пожежі негорючими газами

n_j – число атомів j -го типу в молекулі горючої речовини.

Таблиця 5.1 – Емпіричний параметр γ формули (5.11) для визначення флегматизуючої концентрації різних газів-розріджувачів

Флегматизатор	γ	Флегматизатор	γ
N ₂	1,0	SF ₆	3,9
H ₂ O	1,2	CCl ₄	4,8
CO ₂	1,6	CFCl ₃	4,0
C ₂ F ₄ Br ₂	21,3	CF ₂ Cl ₂	4,5
CF ₃ Br	16,2	C ₂ F ₃ Cl ₃	5,6
CF ₃ I	15,5	C ₂ F ₄ Cl ₂	6,0
CF ₄	2,4	C ₂ F ₅ Cl	6,0
C ₂ F ₅ I	5,6	CHF ₂ Cl	3,3
C ₃ F ₈	6,1	C ₃ HF ₇	3,0
C ₄ F ₁₀	4,3	C ₂ HF ₅	2,5
C ₄ F ₈	2,7	CHF ₃	1,6

Концентрацію горючої речовини в суміші, склад якої відповідає точці флегматизації, розраховують за формулою:

$$\varphi_{\text{гр(фл)}} = \frac{100 - \varphi_{\text{фл}}}{1 + \frac{100\beta_{\text{CO}}}{\varphi_{\text{O}_2}}}, \% \quad (5.13)$$

Унаслідок флегматизації концентрація окисника в системі стає меншою, ніж критичне значення, при цьому вміст кисню зменшується до **мінімальної вибухонебезпечної концентрації кисню**, який в

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами
 потрібній суміші «горюча речовина – окисник – флегматизатор» розраховують за формулою:

$$\varphi_{\text{мвкк}} = \frac{\varphi_{\text{O}_2}}{100} (100 - \varphi_{\text{ф.л}} - \varphi_{\text{гр(ф.л)}}), \% \quad (5.14)$$

Відносна середня квадратична похибка розрахунку за формулами (5.11) та (5.14) не перевищує 10 %.

Для найбільш поширених газів-розріджувачів, таких як азот, водяна пара або оксид карбону (IV), флегматизуючу концентрацію в середовищі повітря згідно [31] можна розрахувати за формулою:

$$\varphi_{\text{ф.л}} = 100 \frac{h_f \Delta H_f^0 + h'_f + \sum_j h'_j m_j}{h''_{\text{ф}} - 1 + \sum_j h''_j m_j}, \% \quad (5.115)$$

де ΔH_f^0 – стандартна теплота утворення горючої речовини в газоподібному стані, кДж·моль⁻¹;

h_f – коефіцієнт при теплоті утворення горючої речовини, моль·кДж⁻¹;

j – тип атома в молекулі горючої речовини;

m_j – число атомів j -го типу в горючій речовині;

h'_f та $h''_{\text{ф}}$ – коефіцієнти для даного флегматизатора;

h'_j і h''_j – коефіцієнти j -го типу для даного флегматизатора (див. табл. 5.2).

Якщо флегматизується паро- або газоповітряна суміш декількох горючих речовин, то замість значень ΔH_f^0 і m_j використовують середню теплоту утворення горючих складових суміші та середнє число атомів даного типу, які розраховують як узагальнені параметри

Глава 1. Параметри гасіння пожежі негорючими газами

для суміші горючих газів за формулами (3.17) і (3.18).

Таблиця 5.2 – Коефіцієнти формули (5.115) визначення флегматизуючої концентрації негорючих газів

Коефіцієнти	Значення коефіцієнтів при розведенні суміші		
	N ₂	H ₂ O (пара)	CO ₂
h _f	0,865·10 ⁻²	0,802·10 ⁻²	0,736·10 ⁻²
h' _ф	1,256	0,780	0,584
h' _C	2,528	1,651	1,292
h' _H	0,759	0,527	0,427
h' _O	0,197	0,446	0,570
h' _N	-0,151	-0,147	-0,133
h'' _ф	2,800	2,236	2,020
h'' _C	5,946	5,000	4,642
h'' _H	1,486	1,250	1,160
h'' _O	-2,973	-2,500	-2,321
h'' _N	0	0	0

Унаслідок флегматизації концентрація окисника стає меншою, ніж критичне значення, і досягає **мінімальної вибухонебезпечної концентрації кисню**, яку можна розрахувати за формулою:

$$\varphi_{\text{МВКК}} = 2,09 \cdot 10^{-3} \left(100 - \varphi_{\text{фл}} \right) \left(100 - E \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{атм}}} \right), \%, \quad (5.126)$$

де E – відносна вологість повітря за даних умов, %;

P_{H₂O} – парціальний тиск пари води за даних умов, кПа;

P_{атм} – атмосферний тиск, кПа.

За стандартних умов (температура повітря – 25 °С, атмосферний тиск – 101,3 кПа, відносна вологість повітря – 70 %) формулу (5.126) можна представити у вигляді:

$$\varphi_{\text{МВКК}} = \frac{100 - \varphi_{\text{фл}}}{4,86}, \%. \quad (5.137)$$

Проте зміна зовнішніх умов (збільшення потужності джерела запалювання, підвищення температури чи тиску в системі) призводить до зменшення мінімальної вибухонебезпечної концентрації кисню, тому для забезпечення гарантованих умов пожежовибухобезпеки розраховують *безпечну концентрацію кисню* за формулою:

$$\varphi_{\text{без}} = 1,2\varphi_{\text{МВКК}} - 4,2, \%. \quad (5.148)$$

Чим більш ефективним є негорючий газ (має велике значення питомої теплосмності й невелике значення коефіцієнта теплопровідності), тим меншим є значення його флегматизуючої концентрації, а отже, за більш високого вмісту кисню в системі не може виникнути горіння.

Об'ємну флегматизуючу концентрацію негорючого газу можна перерахувати в масову за формулою:

$$\varphi'_{\text{фл}} = \varphi_{\text{фл}} \frac{\mu_{\text{нг}}}{100V_{\mu}}, \text{ кг} \cdot \text{М}^{-3}, \quad (5.159)$$

де μ – молярна маса газу флегматизатора;

V_{μ} – об'єм, який займає моль газу за даних умов, $\text{М}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$.

Негорючі гази широко використовують для об'ємного *гасіння пожежі в огороженні*.

Під час пожежі у приміщенні встановлюється певний режим газообміну – потік гарячих продуктів горіння змішується з повітрям, підіймається вгору і

Глава 1. Параметри гасіння пожежі негорючими газами

виходить з приміщення через верхній отвір (або верхню частину отвору), а через нижній отвір (або нижню частину отвору) у приміщення поступає повітря, маса якого у сталому режимі горіння приблизно дорівнює масі газової суміші, що виходить (див. гл. 4.1). Частина негорючого газу, що подають на гасіння, буде виходити з продуктами горіння. Витрата негорючого газу, що витікає з приміщення разом із продуктами горіння, є пропорційною поточному значенню концентрації негорючого газу в суміші $\varphi'_{нг}$ на момент часу гасіння τ_i .

Рівняння матеріального балансу негорючого газу, поданого у приміщення, можна виразити наступним диференціальним рівнянням:

$$V_{в\dot{и}л} d\varphi'_{нг} = g_{нг}^{под} d\tau_{под} - \frac{g_{гс}^{вит}}{\rho_{гс}} \varphi'_{нг} d\tau_{под}, \quad (5.20)$$

де $V_{в\dot{и}л}$ – вільний об'єм приміщення, в якому відбувається гасіння пожежі, $V_{в\dot{и}льн} = V_{прим} (1 - \eta)$, м³ (η – частка об'єму приміщення, яка зайнята меблями та обладнанням);

$\varphi'_{нг}$ – середня масова концентрація негорючого газу у приміщенні на момент часу подавання $\tau_{под}$, кг·м⁻³;

$g_{нг}^{под}$ – масова витрата, з якою подають негорючий газ у приміщення, кг·с⁻¹;

$g_{гс}^{вит}$ – масова витрата, з якою газова суміш витікає із приміщення, кг·с⁻¹;

$\rho_{гс}$ – густина газової суміші, що витікає із приміщення через отвори і має середньооб'ємну температуру газового середовища у приміщенні на

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

даний час розвитку пожежі, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Витрата, з якою негорючий газ потрапляє у приміщення, залежить від площі отвору, через який відбувається подача, та тиску в системі подавання й визначається за формулами (4.85) або (4.86) залежно від режиму витоку.

Витрата, з якою газова суміш витікає із приміщення, залежить від умов газообміну з навколишнім середовищем і визначається за формулами (4.30) або (4.32).

Вирішення рівняння (5.20) у межах $\tau_{\text{под}} = 0$, $\phi'_{\text{нг}} = 0$ та $\tau_{\text{под}} = \tau_{\text{гас}}$, $\phi'_{\text{нг}} = \phi'_{\text{вогн}}$ дає вираз для розрахунку часу гасіння пожежі у приміщенні з урахуванням витоку негорючого газу із приміщення у процесі його подавання:

$$\tau_{\text{гас}} = \frac{V_{\text{віл}} \rho_{\text{гс}}}{g_{\text{гс}}^{\text{вит}}} \ln \frac{g_{\text{нг}}^{\text{под}}}{g_{\text{нг}}^{\text{под}} - \frac{g_{\text{гс}}^{\text{вит}}}{\rho_{\text{гс}}} \phi'_{\text{вогн}}}, \text{ с}, \quad (5.2116)$$

де $\phi'_{\text{вогн}}$ – масова **вогнегасна концентрація** – найменший вміст вогнегасного засобу в суміші з горючою речовиною й окисником, достатній для припинення горіння, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Гасіння пожежі негорючим газом відбудеться за умови, що його витрата перевищує деяку критичну величину. Якщо знаменник дробу виразу (5.211621) дорівнює нулю, то час гасіння прямує до нескінченності, отже припинення горіння не станеться. Таким чином, *критична витрата вогнегасної речовини дорівнює:*

$$g_{\text{нг}}^{\text{под}}_{\text{кр}} = g_{\text{гс}}^{\text{вит}} \frac{\phi'_{\text{вогн}}}{\rho_{\text{гс}}}, \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (5.22)$$

Глава 1. Параметри гасіння пожежі негорючими газами

Критична витрата негорючого газу залежить не тільки від вогнегасної концентрації негорючого газу для конкретної горючої речовини, але й від параметрів пожежі, зокрема від часу вільного розвитку та умов газообміну, які впливають на витрату газової суміші, що витікає із приміщення через отвори, $g_{гс}^{вит}$.

Інтенсивність подавання негорючого газу на гасіння пожежі в об'ємі приміщення можна визначити за формулою:

$$I = \frac{g_{нг}^{под}}{V_{віл}}, \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}. \quad (5.23)$$

Якщо інтенсивність подавання помножити на час гасіння, то можна отримати загальну витрату негорючого газу на процес гасіння $G_{нг}$:

$$G_{нг} = \frac{g_{нг}^{под} \rho_{гс}}{g_{гс}^{вит}} \ln \frac{g_{нг}^{под}}{g_{нг}^{под} - \frac{g_{гс}^{вит} \Phi'_{вогн}}{\rho_{гс}}}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}. \quad (5.174)$$

Після ряду математичних перетворень і спрощень можна отримати *оптимальну питому витрату* вогнегасної речовини, за якої загальна витрата негорючого газу буде мінімальною:

$$g_{нг\text{ опт}}^{под} = 2,4 g_{нг\text{ кр}}^{под}, \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (5.185)$$

Для розрахунку *нормативної загальної витрати*

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами
негорючих газів уводять коефіцієнт запасу, який враховує нерівномірність розподілу негорючих газів по всьому об'єму приміщення:

$$G_{\text{нг}}^{\text{норм}} = k_{\text{зап}} G_{\text{нг}}^{\text{опт}}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (5.196)$$

де $k_{\text{зап}}$ – коефіцієнт запасу (1,5÷3,2).

Тоді *нормативну інтенсивність подавання* негорючого газу на гасіння пожежі в об'ємі приміщення можна визначити за формулою:

$$I_{\text{норм}} = \frac{G_{\text{нг}}^{\text{норм}}}{\tau_{\text{гас}}}, \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}. \quad (5.207)$$

Таким чином, для проведення розрахунків параметрів гасіння пожежі у приміщенні негорючими газами необхідно знати вогнегасну концентрацію негорючого газу, середню температуру продуктів горіння, що витікають із приміщення, схему газообміну й параметри самого приміщення.

Величина вогнегасної концентрації негорючого газу з часом розвитку пожежі змінюється: зменшується через вогнегасний вплив самих продуктів горіння, що утворюються під час горіння і заповнюють об'єм приміщення, та одночасно збільшується через підвищення середньооб'ємної температури газового середовища у приміщенні. Тому для розрахунків параметрів об'ємного пожежогасіння негорючим газом використовують не вогнегасну, а флегматизуючу концентрацію, яка залежить від виду горючої речовини і завжди є більшою.

Методика розрахунку параметрів флегматизації негорючими газами

1. Визначити стандартну теплоту утворення горючої речовини ΔH_f° за довідниками [7], [9] або таблицею 8 додатків.

2. Визначити число атомів j -го типу в горючій речовині та значення коефіцієнтів β_{CO} та γ із таблиці 5.1 або коефіцієнтів h'_f , h''_f , h_f , h'_j , h''_j із таблиці 5.1 для даного виду негорючого газу.

3. Розрахувати об'ємну флегматизуючу концентрацію даного негорючого газу за формулою (5.11) або (5.115). У разі потреби, перерахувати об'ємну флегматизуючу концентрацію в масову за формулою (5.159).

4. Розрахувати мінімальну вибухонебезпечну концентрацію кисню за формулою (5.134) або (5.117).

5. Розрахувати безпечну концентрацію кисню за формулою (5.148).

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати флегматизуючу концентрацію хладона C_3F_8 і мінімальну вибухонебезпечну концентрацію кисню в пароповітряному просторі технологічного апарата, в якому переробляється тетраметилбензол $C_{10}H_{14}$.

Розв'язання

1. Із таблиці 8 додатків знаходимо значення теплоти утворення тетраметилбензолу: $\Delta H_f = -41,9 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$.

2. Визначаємо число атомів j -го типу в горючій речовині й значення коефіцієнтів h_f , h_j , β_{CO} та розраховуємо безрозмірний коефіцієнт f за формулою (5.12):

$$n_C = 10; n_H = 14;$$

$$h_f = 2,58 \cdot 10^{-2} \text{ моль} \cdot \text{кДж}^{-1}; h_C = 2,373, h_H = 2,757;$$

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

$$\beta_{\text{CO}} = 0,5 \cdot 10 + 0,25 \cdot 14 = 8,5;$$

$$F = \frac{21}{100 \cdot 8,5} (2,58 \cdot 10^{-2} \cdot (-41,9) + 2,373 \cdot 10 + 2,757 \cdot 14) - 1 = 0,513.$$

3. Визначаємо значення параметра γ із таблиці 5.1 для флегматизатора та розраховуємо флегматизуючу концентрацію хладона за формулою (5.11):

$$\gamma = 6,1:$$
$$\varphi_{\text{фл}} = \frac{100 \cdot 0,513}{0,513 + 6,1 \left(1 + \frac{21}{100 \cdot 8,5} \right)} = 7,6 \text{ \%}.$$

де ΔH_f^0 – стандартна теплота утворення горючої речовини в газоподібному стані, кДж·моль⁻¹;

4. Визначаємо концентрацію тетраметилбензолу $\text{C}_{10}\text{H}_{14}$ в суміші, склад якої відповідає точці флегматизації, за формулою (5.13):

$$\varphi_{\text{гр(фл)}} = \frac{100 - 7,6}{1 + \frac{100 \cdot 8,5}{21}} = 2,2 \text{ \%}.$$

5. Розраховуємо мінімальну вибухонебезпечну концентрацію кисню в повітряному просторі технологічного апарата за формулою (5.14):

$$\varphi_{\text{МВКК}} = \frac{21}{100} (100 - 7,6 - 2,2) = 18,9 \text{ \%}.$$

Висновок: концентрація хладона C_3F_8 при флегматизації тетраметилбензолу дорівнює 7,6 %, а мінімальна

Глава 1. Параметри гасіння пожежі негорючими газами

вибухонебезпечна концентрація кисню в повітряному просторі технологічного апарата становить 18,9 %.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати об'ємну та масову флегматизуючу концентрацію вуглекислого газу для захисту внутрішнього об'єму технологічного обладнання, в якому за стандартних умов обертається вибухонебезпечна пароповітряна суміш ацетону C_3H_6O . Порівняти з експериментально визначеною флегматизуючою концентрацією, рівною 28 %.

Розв'язання

1. Із довідника [7] знаходимо значення теплоти утворення ацетону: $\Delta H_f = -217,6 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$.

2. Визначаємо число атомів j -го виду в горючій речовині та значення коефіцієнтів h_f , h'_{ϕ} , h''_{ϕ} , h'_j , h''_j для флегматизатора (вуглекислий газ) із таблиці 5.2:

$$h_f = 0,736 \cdot 10^{-2} \text{ моль} \cdot \text{кДж}^{-1}; h'_{\phi} = 0,584; h''_{\phi} = 2,020;$$

j -ий тип атома	n_j	h'_j	h''_j
C	3	1,292	4,642
H	6	0,427	1,160
O	1	0,570	-2,321

3. Розраховуємо об'ємну флегматизуючу концентрацію вуглекислого газу за формулою (5.115):

$$\varphi_{\text{фл}} = 100 \cdot \frac{0,736 \cdot 10^{-2} \cdot (-217,6) + 0,584 + 3 \cdot 1,292 + 6 \cdot 0,427 + 1 \cdot 0,570}{2,02 - 1 + 3 \cdot 4,642 + 6 \cdot 1,160 + 1 \cdot (-2,321)} = 30,6\%.$$

4. Розраховуємо масову флегматизуючу концентрацію вуглекислого газу за стандартних умов за формулою (5.159):

$$\mu_{\text{CO}_2} = 44 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}; V_{\mu} = 24,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1};$$

$$\varphi'_{\text{фл}} = 30,6 \frac{44}{100 \cdot 24,4} = 0,55 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

5. Розраховуємо відносну похибку розрахунку:

$$\Delta = 100 \frac{30,6 - 28}{28} = 9 \%.$$

Висновок: розрахована величина флегматизуючої концентрації вуглекислого газу для захисту внутрішнього об'єму технологічного обладнання, в якому обертається вибухонебезпечна повітряна суміш ацетону, дорівнює 30,6 % або $0,55 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$. Відносна похибка розрахунку становить 9 %.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати мінімальну вибухонебезпечну та безпечну концентрацію кисню, за якої неможливо виникнення горіння бензолу C_6H_6 за умови флегматизації горючої пароповітряної суміші азотом. Порівняти розраховане значення з експериментально отриманим, що дорівнює 11,5 %.

Розв'язання

1. Із довідника [7] для бензолу знаходимо значення флегматизуючої концентрації азоту: $\varphi_{\text{фл}} = 45 \%$.

2. Розраховуємо мінімальну вибухонебезпечну концентрацію кисню за формулою (5.137):

$$\varphi_{\text{МВКК}} = \frac{100 - 45}{4,86} = 11,4 \%.$$

3. Розраховуємо безпечну концентрацію кисню за формулою (5.148):

$$\Phi_{\text{без}} = 1,2 \cdot 11,4 - 4,2 = 9,4 \%$$

Висновок: при флегматизації пароповітряної суміші бензолу азотом розрахункове значення мінімальної вибухонебезпечної концентрації кисню дорівнює 11,4 %, що відрізняється від експериментально отриманого значення на 0,1 %, а безпечна концентрація кисню дорівнює 9,4 %.

Методика розрахунку основних параметрів об'ємного гасіння пожежі негорючими газами у приміщенні з відкритими отворами

1. Розрахувати середньооб'ємну температуру газового середовища, що витікає із приміщення через отвори, на заданий час розвитку пожежі за методикою, викладеною в розділі 4, главі 1, § 2.

2. Розрахувати густину газового середовища у приміщенні і зовні за формулою (4.39).

3. Розрахувати питому витрату $g_{\text{Гс}}^{\text{ВИГ}}$, з якою газова суміш витікає із приміщення, за формулами (4.29), (4.30) або (4.31), (4.32) залежно від схеми газообміну.

4. Визначити за довідником або розрахувати за формулою (5.115) об'ємну флегматизуючу концентрацію негорючого газу.

5. Перерахувати об'ємну флегматизуючу концентрацію негорючого газу в масову за формулою (5.159).

6. Розрахувати питому критичну та оптимальну

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

витрату подавання негорючого газу відповідно за формулами (5.22) та (5.185).

Якщо відомі параметри системи подавання негорючого газу (діаметр отвору та тиск, з яким надходить газ у приміщення), розрахувати фактичну питому масову витрату надходження негорючого газу за формулами (4.85) або (4.86) залежно від співвідношення тиску негорючого газу та середовища у приміщенні.

7. Розрахувати час гасіння пожежі негорючим газом в даному приміщенні за оптимальної чи заданої питомої масової витрати негорючого газу за формулою (5.211621).

Якщо фактична питома масова витрата надходження негорючого газу є меншою, за значення

$$\frac{g_{гс}^{вит}}{\rho_{гс}} \varphi'_{фл},$$

то гасіння не відбудеться.

8. Розрахувати загальну витрату негорючого газу на гасіння (критичну, оптимальну за формулою (5.174) та нормативну з урахуванням коефіцієнта запасу за формулою (5.196)).

9. Розрахувати інтенсивність подавання негорючого газу (критичну, оптимальну або нормативну) за формулами (5.23) або (5.207).

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати час об'ємного гасіння вуглекислим газом приміщення, в якому відбувається горіння ацетону, якщо питома витрата подавання негорючого газу є оптимальною, вільний час розвитку пожежі дорівнює 10 хв., площа горіння ацетону – 10 м², розміри приміщення –

Глава 1. Параметри гасіння пожежі негорючими газами

7 м × 20 м × 2,9 м; 10 % об'єму приміщення зайнято обладнанням. Газообмін здійснюється через відкритий дверний отвір розмірами 1,2 м × 2,3 м. Температура навколишнього повітря – 15 °С, тиск – 101,3 кПа.

Розв'язання

1. Визначаємо середньооб'ємну температуру газової суміші, яка витікає з приміщення.

1.1. Для ацетону за таблицею додатків визначаємо параметри горіння: масова теплота згоряння $Q'_H = 31360 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$; масова швидкість вигорання $v_m = 43,8 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; питомий теоретичний об'єм повітря $v^{\circ}_{\text{пов}} = 7,35 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$; коефіцієнт повноти згоряння $\eta = 0,93$.

1.2. Розраховуємо загальну площу відкритих отворів і площу отворів, що працюють на приплив повітря, площу підлоги та огорожувальних конструкцій приміщення:

$$S_{\text{отв}} = 1,2 \cdot 2,3 = 2,76 \text{ м}^2, S_{\text{прип}} = S_{\text{отв}}/3 = 2,76/3 = 0,92 \text{ м}^2; \\ S_{\text{підл}} = 20 \cdot 7 = 140 \text{ м}^2; S_{\text{огор}} = 2 \cdot (20 \cdot 7 + 20 \cdot 2,9 + 7 \cdot 2,9) = 436,6 \text{ м}^2.$$

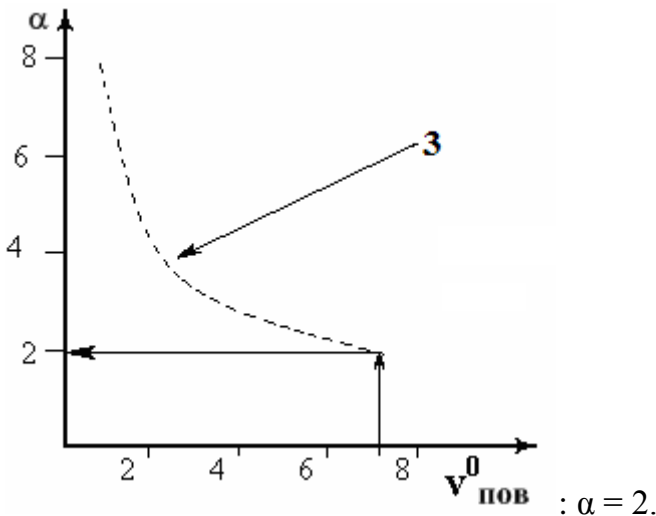
1.3. Розраховуємо співвідношення $S_{\text{пож}}/S_{\text{підл}}$, $S_{\text{прип}}/S_{\text{пож}}$ та визначаємо тип і номер кривої номограми 13 додатків:

$$\frac{S_{\text{пож}}}{S_{\text{підл}}} = \frac{10}{140} = 0,07 < 0,25, \text{ тип кривої – пунктирна;}$$

$$\frac{S_{\text{прип}}}{S_{\text{пож}}} = \frac{0,92}{10} = 0,092 < 0,1, \text{ номер кривої – № 3.}$$

1.4. Визначаємо коефіцієнт надлишку повітря за

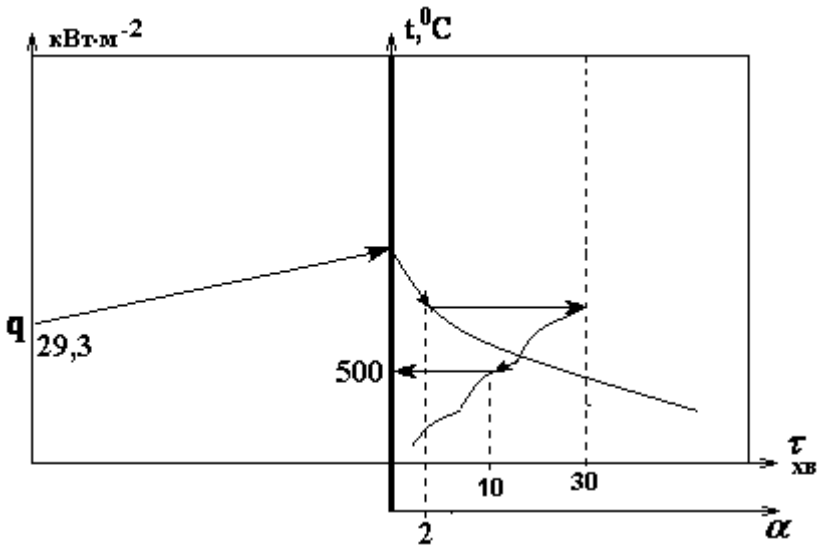
Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами
 допомогою номограми Номограма 12 додатків.



1.5. Розраховуємо величину густини теплового потоку за формулою (4.37):

$$q = \frac{0,93 \cdot 43,8 \cdot 10^{-3} \cdot 31360 \cdot 10}{436,6} = 29,3 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}.$$

1.6. Визначаємо температуру пожежі на 10-ту хвилину вільного розвитку за отриманих значень густини теплового потоку та коефіцієнта надлишку повітря, користуючись номограмою 13 додатків.



$$t_{\text{пож}} = 500 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2. Розраховуємо густину газового середовища та навколишнього повітря за формулою (4.39):

$$\rho_{\text{пов}}^{15^\circ\text{C}} = \frac{29}{22,4 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 15)} = 1,23 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$\rho_{\text{гс}}^{500^\circ\text{C}} = \frac{29}{22,4 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 500)} = 0,46 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

3. Розраховуємо питому витрату газової суміші, що витікає з приміщення через дверний отвір, за формулою (4.31), приймаючи, що коефіцієнт витрати отвору $K_{\text{отв}}$ дорівнює 0,65:

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

$$g_{\text{гс}}^{\text{виг}} = \frac{2}{3} \cdot 0,65 \cdot 2,76 \sqrt{\frac{2 \cdot 9,8 \cdot 2,3 \cdot 1,23 \cdot 0,46(1,23 - 0,46)}{(1,23^{0,33} + 0,46^{0,33})^3}} = 2,02 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

4. Визначаємо об'ємну флегматизуючу концентрацію вуглекислого газу для ацетону за довідником [7]: $\phi_{\text{фл}} = 28 \%$.

5. Перераховуємо об'ємну флегматизуючу концентрацію вуглекислого газу для ацетону в масову за формулою (5.159):

$$\mu_{\text{CO}_2} = 44 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1};$$
$$V_{\mu} = 22,4 \frac{101,3 \cdot (500 + 273)}{101,3 \cdot 273} = 63,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1};$$

$$\phi'_{\text{фл}} = 28 \frac{44}{100 \cdot 63,4} = 0,19 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

6. Розраховуємо питому критичну та оптимальну витрати подавання негорючого газу за формулами (5.22) та (5.185) відповідно:

$$g_{\text{нг кр}}^{\text{под}} = 2,02 \frac{0,19}{0,46} = 0,84 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$g_{\text{нг опт}}^{\text{под}} = 2,4 \cdot 0,84 = 2,0 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

7. Розраховуємо час гасіння пожежі ацетону вуглекислим газом у даному приміщенні за оптимальної
400

Глава 1. Параметри гасіння пожежі негорючими газами

питомої витрати подавання негорючого газу за формулою (5.211621):

$$\tau_{\text{гас}} = \frac{7 \cdot 20 \cdot 2,9(1 - 0,1)0,46}{2,02} \ln \frac{2,0}{2,0 - \frac{2,02 \cdot 0,19}{0,46}} = 44,9 \text{ с.}$$

Висновок: для гасіння пожежі ацетону на площі 10 м^2 в заданому приміщенні з відкритим дверним отвором із оптимальною питомою витратою подавання вуглекислого газу $2,0 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$ потрібно 44,9 с.

Приклад розв'язання задачі

Визначити питому критичну та оптимальну масову витрату подавання азоту на об'ємне гасіння пожежі толуолу C_7H_8 у приміщенні із відкритим дверним отвором розмірами $2 \text{ м} \times 2 \text{ м}$, якщо середньооб'ємна температура у приміщенні під час пожежі дорівнює $400 \text{ }^\circ\text{C}$, температура навколишнього повітря – $20 \text{ }^\circ\text{C}$, атмосферний тиск – $101,3 \text{ кПа}$.

Розв'язання

1. Розраховуємо густину навколишнього повітря і газового середовища у приміщенні за формулою (4.39):

$$\rho_{\text{пов}}^{20^\circ\text{C}} = \frac{29}{22,4 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 20)} = 1,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$\rho_{\text{гс}}^{400^\circ\text{C}} = \frac{29}{22,4 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 400)} = 0,52 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

2. Розраховуємо питому масову витрату, з якою газова суміш витікає із приміщення, за формулою (4.31), через те що газообмін здійснюється через один отвір:

$$g_{\text{гс}}^{\text{виг}} = \frac{2}{3} \cdot 0,65 \cdot 2 \cdot 2 \sqrt{\frac{2 \cdot 9,8 \cdot 2 \cdot 1,2 \cdot 0,52(1,2 - 0,52)}{(1,2^{0,33} + 0,52^{0,33})^3}} = 2,77 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

3. Визначаємо за довідником [7] об'ємну флегматизуючу концентрацію азоту для толуолу: $\varphi_{\text{фл}} = 46 \%$.

4. Перерахуємо об'ємну флегматизуючу концентрацію азоту в масову за даних умов:

$$\mu_{\text{N}_2} = 28 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1};$$
$$V_{\mu} = 22,4 \frac{101,3 \cdot (400 + 273)}{101,3 \cdot 273} = 55,2 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1};$$

$$\varphi'_{\text{фл}} = 46 \frac{28}{100 \cdot 55,2} = 0,23 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

5. Розраховуємо питому критичну та оптимальну витрати подавання негорючого газу на об'ємне гасіння пожежі толуолу відповідно за формулами (5.22) та (5.185):

$$g_{\text{нг кр}}^{\text{под}} = 2,77 \frac{0,23}{0,52} = 1,22 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$g_{\text{нг опт}}^{\text{под}} = 2,4 \cdot 1,22 = 2,94 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Висновок: критична та оптимальна масові питомі витрати подавання азоту на об'ємне гасіння пожежі толуолу за даних умов газообміну – $1,22 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$ та $2,94 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$ відповідно.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати загальну витрату та нормативну інтенсивність подавання водяної пари на об'ємне гасіння пожежі метилового спирту $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$ у приміщенні розмірами $8 \text{ м} \times 15 \text{ м} \times 4 \text{ м}$ із вхідним отвором розмірами $3 \text{ м} \times 3 \text{ м}$ і витяжним люком розмірами $1,5 \text{ м} \times 1 \text{ м}$ за оптимальної питомої витрати подавання водяної пари, якщо меблями та обладнанням у приміщенні зайнято 20 % об'єму, середньооб'ємна температура газового середовища у приміщенні під час пожежі дорівнює $350 \text{ }^\circ\text{C}$, а температура навколишнього повітря – $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Розв'язання

1. Розраховуємо густину навколишнього повітря і газового середовища у приміщенні за формулою (4.39):

$$\rho_{\text{пов}}^{10^\circ\text{C}} = \frac{29}{22,4 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 10)} = 1,25 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$\rho_{\text{гс}}^{350^\circ\text{C}} = \frac{29}{22,4 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 350)} = 0,57 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

2. Розраховуємо питому масову витрату, з якою газова суміш витікає із приміщення, за формулою (4.29), оскільки газообмін під час пожежі відбувається через отвори, які знаходяться на різних рівнях.

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

Відстань між центрами отворів: $H = 4 - 1,5 = 2,5$ м;

$$g_{\text{гс}}^{\text{вип}} = 0,65 \cdot 9 \cdot 1,5 \sqrt{\frac{2 \cdot 9,8 \cdot 2,5 \cdot 1,25 \cdot 0,57(1,25 - 0,57)}{1,25 \cdot 9^2 + 0,57 \cdot 1,5^2}} = 4,2 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

3. Розраховуємо об'ємну флегматизуючу концентрацію водяної пари для метилового спирту CH_4O .

3.1. Із довідника [7] знаходимо значення теплоти утворення метилового спирту: $\Delta H_f = -201,3 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$.

3.2. Визначаємо число атомів j -го виду в горючій речовині та значення коефіцієнтів h_f , h'_f , h''_f , h'_j , h''_j для флегматизатора – водяна пара із таблиці 5.2:

$$h_f = 0,802 \cdot 10^{-2} \text{ моль} \cdot \text{кДж}^{-1}; h'_f = 0,78; h''_f = 2,236;$$

j -ий тип атома	n_j	h'_j	h''_j
C	1	1,651	5,00
H	4	0,527	1,25
O	1	0,446	-2,50

3.3. Розраховуємо об'ємну флегматизуючу концентрацію водяної пари для метилового спирту за формулою (5.115):

$$\Phi_{\text{пл}} = 100 \cdot \frac{0,802 \cdot 10^{-2} \cdot (-201,3) + 0,78 + 1,651 + 4 \cdot 0,527 + 0,446}{2,236 - 1 + 5,0 + 4 \cdot 1,25 + (-2,5)} = 38,6 \%$$

4. Розраховуємо масову флегматизуючу концентрацію водяної пари за формулою (5.159):

$$\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1};$$
$$V_{\mu} = 22,4 \frac{101,3 \cdot (350 + 273)}{101,3 \cdot 273} = 51,1 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1};$$

$$\varphi'_{\text{фл}} = 30,6 \frac{18}{100 \cdot 51,1} = 0,136 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

5. Розраховуємо питому критичну та оптимальну витрати подавання водяної пари на об'ємне гасіння метилового спирту відповідно за формулами (5.22) та (5.185):

$$g_{\text{нг кр}}^{\text{под}} = 4,2 \frac{0,136}{0,57} = 1,0 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$g_{\text{нг опт}}^{\text{под}} = 2,4 \cdot 1,0 = 2,4 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

6. Розраховуємо час гасіння пожежі негорючим газом у даному приміщенні за оптимальної питомої витрати подавання водяної пари за формулою (5.211621):

$$V_{\text{вільн}} = 8 \cdot 15 \cdot 4(1 - 0,2) = 384 \text{ м}^3;$$

$$\tau_{\text{гас}} = \frac{384 \cdot 0,57}{4,2} \ln \frac{2,4}{2,4 - \frac{4,2}{0,57} \cdot 0,136} = 28,2 \text{ с}.$$

7. Розраховуємо загальну витрату подавання водяної пари на об'ємне гасіння заданого приміщення з урахуванням нерівномірності розподілу негорючого газу по об'єму приміщення.

7.1. Розраховуємо оптимальну загальну витрату подавання водяної пари на об'ємне гасіння приміщення за формулою (5.174):

$$G_{\text{нг}}^{\text{опт}} = \frac{2,4 \cdot 0,57}{4,2} \ln \frac{2,4}{2,4 - \frac{4,2 \cdot 0,136}{0,57}} = 0,17 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

7.2. Розраховуємо загальну витрату подавання водяної пари з урахуванням нерівномірності розподілу негорючого газу по об'єму приміщення за формулою (5.196), приймаючи коефіцієнт запасу $k_{\text{зап}}$ рівним 1,5:

$$G_{\text{нг}}^{\text{норм}} = 1,5 \cdot 0,17 = 0,26 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

8. Розраховуємо нормативну інтенсивність подавання водяної пари на об'ємне гасіння метилового спирту за даних умов газообміну у приміщенні за формулою (5.207):

$$I_{\text{нг}}^{\text{норм}} = \frac{0,26}{28,2} = 0,009 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}.$$

Висновок: загальна витрата подавання водяної пари на об'ємне гасіння пожежі метилового спирту за даних умов газообміну у приміщенні дорівнює $0,18 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, а нормативна інтенсивність подавання водяної пари у приміщення з даними відкритими отворами дорівнює $0,009 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}$.

Приклад розв'язання задачі

Визначити час гасіння пожежі октилбутирату $\text{C}_{12}\text{H}_{24}\text{O}_2$ вуглекислим газом у приміщенні розмірами $8 \times 4 \times 3 \text{ м}$,

Глава 1. Параметри гасіння пожежі негорючими газами

якщо тиск у системі подавання газу – 250 кПа, а загальна площа отворів, через які відбувається подавання газу, дорівнює 10 см². У приміщенні відкритий дверний отвір розміром 2,2×0,8 м; 15 % об'єму приміщення зайнято обладнанням. Середньооб'ємна температура газового середовища у приміщенні під час пожежі досягла 300 °С, а умови зовні приміщення є стандартними.

Розв'язання

1. Розраховуємо густину газового середовища у приміщенні і ззовні за формулою (4.39):

$$\rho_{\text{пов}}^{25^{\circ}\text{C}} = \frac{29}{22,4(1 + 0,00367 \cdot 25)} = 1,12 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$\rho_{\text{гс}}^{300^{\circ}\text{C}} = \frac{29}{22,4(1 + 0,00367 \cdot 300)} = 0,62 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

2. Розраховуємо питому масову витрату, з якою газова суміш витікає із приміщення, за формулою (4.31), оскільки газообмін здійснюється через один отвір:

$$S_{\text{отв}} = 0,8 \cdot 2,2 = 1,76 \text{ м}^2.$$

$$g_{\text{гс}}^{\text{вит}} = \frac{2}{3} \cdot 0,65 \cdot 1,76 \sqrt{\frac{2 \cdot 9,8 \cdot 1,76 \cdot 1,12 \cdot 0,57(1,12 - 0,62)}{(1,12^{0,33} + 0,62^{0,33})^3}} = 0,97 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

3. Розраховуємо об'ємну флегматизуючу концентрацію вуглекислого газу для октилбутирату C₁₂H₂₄O₂ за формулою (5.115), враховуючи коефіцієнти табл. 5.2.

Визначаємо теплоту утворення октилбутирату за довідником [7]: $\Delta H_f^{\circ} = -711 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$.

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

$$\varphi_{\text{фл}} = 100 \cdot \frac{0,736 \cdot 10^{-2} \cdot (-711) + 0,584 + 12 \cdot 1,292 + 24 \cdot 0,427 + 2 \cdot 0,57}{2,02 - 1 + 12 \cdot 4,642 + 24 \cdot 1,160 - 2 \cdot 2,321} = 33,6 \%$$

4. Перераховуємо об'ємну флегматизуючу концентрацію вуглекислого газу в масову за даних умов за формулою (5.159):

$$\mu_{\text{CO}_2} = 44 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1};$$
$$V_{\mu} = 22,4 \frac{101,3 \cdot (300 + 273)}{101,3 \cdot 273} = 47 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1};$$

$$\varphi'_{\text{фл}} = 33,6 \frac{44}{100 \cdot 47} = 0,32 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

5. Розраховуємо масову витрату, з якою вуглекислий газ надходить у приміщення через отвори площею 10 см^2 , за формулою (4.86), оскільки $\frac{P_{\text{сис}}}{P_{\text{атм}}} = \frac{250}{101,3} > 2$. Вуглекислий газ є багатоатомним газом, тому коефіцієнт політропи $k = 1,3$.

Розраховуємо питому газову сталу вуглекислого газу за формулою (4.87):

$$R_{\text{пит}} = \frac{8314}{44} = 188,95 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1};$$

$$g_{\tilde{a}}^{\tilde{a}} = 0,64 \cdot 10 \cdot 10^{-4} \cdot 2,5 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{1}{188,95 \cdot 298} \cdot \frac{2 \cdot 1,3}{1,3 + 1} \left(\frac{2}{1,3 + 1} \right)^{\frac{2}{1,3 - 1}}} = 0,59 \hat{a} \cdot \tilde{n}^{-1}.$$

6. Розраховуємо час гасіння пожежі вуглекислим газом у даному приміщенні за фактичної питомої масової витрати подавання негорючого газу за формулою (5.211621):

$$V_{\text{вільн}} = 8 \cdot 3 \cdot 4(1 - 0,15) = 81,6 \text{ м}^3;$$
$$\tau_{\text{гас}} = \frac{81,6 \cdot 0,57}{0,97} \ln \frac{0,59}{0,59 - \frac{0,97}{0,62} 0,32} = 90,5 \text{ с.}$$

Висновок: час об'ємного гасіння пожежі октилбутирату вуглекислим газом за даної питомої масової витрати подавання негорючого газу в дане приміщення дорівнює 90,5 с.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати час, за який концентрація кисню у приміщенні розмірами $4 \times 4 \times 2,8$ м досягне 11 %, якщо в дане приміщення подається азот із питомою масовою витратою $0,5 \text{ кг с}^{-1}$. У приміщенні є відкритими дверний отвір площею $2,5 \text{ м}^2$ та квартира площею $0,25 \text{ м}^2$; відстань між центрами отворів – 1,5 м, 7 % об'єму приміщення зайнято меблями. Умови зовні приміщення є стандартними, а середньооб'ємна температура газового середовища у приміщенні дорівнює $65 \text{ }^\circ\text{C}$.

Розв'язання

1. Розраховуємо густину газового середовища у приміщенні і ззовні за формулою (4.39):

$$\rho_{\text{пов}}^{25^{\circ}\text{C}} = \frac{29}{22,4(1 + 0,00367 \cdot 25)} = 1,12 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$\rho_{\text{гс}}^{65^{\circ}\text{C}} = \frac{29}{22,4(1 + 0,00367 \cdot 65)} = 1,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

2. Розраховуємо питому витрату, з якою газова суміш витікає з приміщення, за формулою (4.29), оскільки газообмін у приміщенні здійснюється через отвори, які знаходяться на різних рівнях:

$$g_{\text{гс}}^{\text{виг}} = 0,65 \cdot 2,5 \cdot 0,25 \sqrt{\frac{2 \cdot 9,8 \cdot 1,5 \cdot 1,12 \cdot 1,05(1,12 - 1,05)}{1,12 \cdot 2,5^2 + 1,05 \cdot 0,25^2}} =$$
$$= 0,24 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$$

3. Розраховуємо об'ємну концентрацію азоту, яку необхідно створити для досягнення заданого вмісту кисню у газовому середовищі приміщення, виходячи з формули (5.13):

$$\varphi_{\text{нг}} = 100 - 4,86\varphi_{\text{O}_2} = 100 - 4,86 \cdot 11 = 46,5 \text{ \%}.$$

4. Перераховуємо об'ємну концентрацію азоту в масову за формулою (5.15):

$$\mu_{\text{N}_2} = 28 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1};$$
$$V_{\mu} = 22,4 \frac{101,3 \cdot (65 + 273)}{101,3 \cdot 273} = 27,7 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1};$$

$$\varphi'_{\text{фл}} = 46,5 \frac{28}{100 \cdot 27,7} = 0,47 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

5. Масова витрата, з якою азот надходить у приміщення, за умовою задачі $g_{\text{нп}}^{\text{под}} = 0,5 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$.

6. Розраховуємо час досягнення в даному приміщенні заданої концентрації кисню при подаванні азоту за формулою (5.211621):

$$V_{\text{вільн}} = 442,50,93 = 37,2 \text{ м}^3;$$
$$\tau_{\text{под}} = \frac{37,2 \cdot 1,05}{0,24} \ln \frac{0,5}{0,5 - \frac{0,24}{1,05} 0,47} = 39 \text{ с}.$$

Висновок: час досягнення концентрації кисню 11 %, за умови подавання азоту із заданою питомою масовою витратою в дане приміщення, становить 39 с.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Для речовин, наведених у таблиці, розрахувати:

а) флегматизуючу об'ємну та масову концентрації негорючого газу для захисту апарата, в якому обертається горюча речовина;

б) безпечну концентрацію кисню, за якої неможливий вибух при дії джерела запалювання всередині технологічних установок (флегматизуючу концентрацію негорючого газу визначити за довідником [7]).

№	Речовина	Хімічна формула	Газ-флегматизатор
1	етилацетат	$C_4H_8O_2$	оксид карбону (IV)
2	амілацетат	$C_7H_{14}O_2$	оксид карбону (IV)
3	метиловий спирт	CH_4O	оксид карбону (IV)
4	пропіловий спирт	C_3H_8O	оксид карбону (IV)
5	гептиловий спирт	$C_7H_{16}O$	оксид карбону (IV)
6	циклогексан	C_6H_{12}	оксид карбону (IV)
7	метилциклогексан	C_7H_{14}	оксид карбону (IV)
8	гексан	C_6H_{14}	оксид карбону (IV)
9	гептан	C_7H_{16}	оксид карбону (IV)
10	оцтова кислота	$C_2H_4O_2$	оксид карбону (IV)
11	стирол	C_8H_8	азот
12	гліцерин	$C_3H_8O_3$	азот
13	етиленгліколь	$C_2H_6O_2$	азот
14	пентан	C_5H_{12}	азот
15	метанова кислота	CH_2O_2	азот
16	октан	C_8H_{18}	азот
17	нонан	C_9H_{20}	азот
18	декан	$C_{10}H_{22}$	азот
19	ундекан	$C_{11}H_{24}$	азот
20	етилбензол	C_8H_{10}	азот
21	кумол	C_9H_{12}	водяна пара
22	толуол	C_7H_8	водяна пара

Глава 1. Параметри гасіння пожежі негорючими газами

23	бензиловий спирт	C_7H_8O	водяна пара
24	m-метилфенол	C_7H_8O	водяна пара
25	етилбензол	C_8H_{10}	водяна пара
26	етилпропіонат	$C_5H_{10}O_2$	водяна пара
27	ацетон	C_3H_6O	водяна пара
28	метилбутилкетон	$C_6H_{12}O$	водяна пара
29	пропілбензол	C_9H_{12}	водяна пара
30	метилпропілкетон	$C_5H_{10}O$	водяна пара

2*. Розрахувати об'ємну та масову флегматизуючу концентрацію негорючого газу й безпечну концентрацію кисню, за якої неможливий вибух при дії джерела запалювання всередині технологічного апарата, в якому обертається суміш парів бензолу (70 об. %), толуолу (25 об. %) та ксилолу (5 об. %), якщо захист апарата здійснюється

- а) оксидом карбону (IV);
- б) азотом;
- в) парою води.

3*. Розрахувати мінімальну концентрацію азоту, яку необхідно створити всередині технологічного обладнання для флегматизації пароповітряного простору, якщо в апараті обертається розчинник Р-12. Визначити мінімальну вибухонебезпечну концентрацію кисню всередині апарата.

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

4. Для речовин, наведених у таблиці, розрахувати критичну та оптимальну питому масову витрату подавання негорючого газу для об'ємного гасіння пожежі за вказаною схемою газообміну

- а) при гасінні оксидом карбону (IV);
- б) при гасінні азотом;
- в) при гасінні паром води.

Параметри пожежі, приміщення, отворів та навколишнього середовища наведено в таблиці. Прийняти, що атмосферний тиск дорівнює 101,3 кПа, висота нижніх отворів приміщення – 2,0 м від підлоги, верхніх – 1,0 м від стелі. Середньооб'ємну температуру газового середовища у приміщенні визначити за допомогою номограм.

№ варіанта	Горюча речовина	Площа отворів, м ²		Параметри приміщення			Параметри пожежі		Температура повітря ззовні, °С
		нижнього	верхнього	площа, м ²	висота, м	η	площа, м ²	час розвитку, хв	
1	акрилова кислота $C_3H_4O_2$	2,0	-	25	2,5	0,05	10	3	20
2	амілацетат $C_7H_{14}O_2$	3,0	-	30	2,7	0,1	7	5	-10
3	аміловий спирт $C_5H_{12}O$	3,0	2,0	35	2,9	0,06	4	7	30
4	анілін C_6H_7N	2,0	3,0	40	3,1	0,07	2	9	15
5	ацетон C_3H_6O	1,0	-	45	3,3	0,08	20	11	25
6	сірковуглець CS_2	2,0	-	50	3,5	0	17	13	10
7	бензол C_6H_6	2,0	1,0	55	3,7	0,11	14	15	5
8	стирол C_8H_8	2,0	2,0	60	3,9	0,12	11	20	35
9	бутанон-2 C_4H_8O	3,5	-	65	4,1	0,13	8	30	40

Глава 1. Параметри гасіння пожежі негорючими газами

10	бутилацетат $C_6H_{12}O_2$	3,5	-	70	4,3	0,14	30	25	-5
11	бутиловий спирт $C_4H_{10}O$	3,0	1,0	75	2,5	0,15	27	3	-15
12	пінен $C_{10}H_{16}$	2,0	3,0	80	2,7	0	24	5	20
13	гексан C_6H_{14}	2,0	3,0	40	3,3	0,1	20	6	30
14	гексиловий спирт $C_6H_{14}O$	3,0	-	45	3,5	0,06	17	11	15
15	гліцерин $C_3H_8O_3$	3,0	-	50	3,7	0,07	14	13	25
16	пентан C_5H_{12}	2,0	1,0	55	3,9	0,08	11	15	10
17	толуол C_7H_8	1,0	2,0	60	4,1	0	8	20	5
18	діетиловий ефір $C_4H_{10}O$	2,0	-	65	4,3	0,11	30	30	35
19	етилацетат $C_4H_8O_2$	2,0	-	70	2,5	0,12	27	25	20
20	етилбензол C_8H_{10}	3,1	1,0		2,7	0,13	24	3	10
21	етиленгліколь $C_2H_6O_2$	4,5	3,0	85	2,9	0,17	21	7	30
22	етиловий спирт C_2H_6O	2,5	-	90	3,1	0,18	18	9	15
23	метилформіат $C_2H_4O_2$	4,0	1,5	95	3,3	0,19	15	11	35
24	ізопентан C_5H_{12}	4,5	4,0	100	3,5	0,2	12	13	-25
25	хлорбензол C_6H_5Cl	4,0	-	20	3,7	0,21	9	15	10
26	ізопропіловий спирт C_3H_8O	5,0	-	25	3,9	0	6	20	-10
27	ізопропілформіат $C_4H_8O_2$	5,0	1,0	30	4,1	0,23	3	30	-15
28	камфен $C_{10}H_{16}$	1,0	5,0	35	4,3	0,24	1	17	-5
29	ксилол C_8H_{10}	2,0	3,0	90	3,3	0,2	18	20	35
30	метиловий спирт CH_4O	3,1	-	95	3,5	0,21	15	30	-25

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

5. Для речовин, наведених у таблиці, розрахувати оптимальну інтенсивність подавання негорючого газу на об'ємне гасіння пожежі у приміщенні та мінімальний час гасіння, якщо вогнегасною речовиною є

- а) оксид карбону (IV);
- б) азот;
- в) пара води.

Параметри пожежі, приміщення, отворів та навколишнього середовища наведено у таблиці. Прийняти, що атмосферний тиск дорівнює 101,3 кПа, висота нижніх отворів приміщення – 2,2 м від підлоги, верхніх – 0,5 м від стелі. Середньооб'ємну температуру газового середовища у приміщенні визначити за допомогою номограм.

№ варіанта	Горюча речовина	Площа отворів, м ²		Параметри приміщення			Параметри пожежі		Температура ззовні, °С
		нижнього	верхнього	площа, м ²	висота, м	η	площа, м ²	час розвитку хв.	
1	акрилова кислота $C_3H_4O_2$	1,8	-	25	2,5	0,25	10	3	10
2	амілацетат $C_7H_{14}O_2$	2,0	-	50	3,5	0	17	13	-10
3	аміловий спирт $C_5H_{12}O$	3,0	-	85	2,9	0,13	21	7	0
4	анілін C_6H_7N	3,5	-	70	4,3	0,16	30	35	35
5	ацетон C_3H_6O	2,5	-	90	3,1	0,11	18	9	-5
6	сірковуглець CS_2	4,0	1,5	95	3,3	0,1	15	11	30
7	бензол C_6H_6	3,5	-	20	3,7	0,08	9	15	20
8	стирол C_8H_8	2,0	-	65	4,1	0,17	8	30	40
9	бутанон-2 C_4H_8O	5,0	-	25	3,9	0	6	20	-5
10	бутилацетат $C_6H_{12}O_2$	5,0	1,0	30	4,1	0,06	3	30	15

Глава 1. Параметри гасіння пожежі негорючими газами

№ варіанта	Горюча речовина	Площа отворів, м ²		Параметри приміщення			Параметри пожежі		Температура ззовні, °С
		нижнього	верхнього	площа, м ²	висота, м	η	площа, м ²	час розвитку, хв.	
11	бутиловий спирт C ₄ H ₁₀ O	1,8	4,0	100	3,5	0,09	12	13	-25
12	пінен C ₁₀ H ₁₆	3,0	-	75	2,5	0,15	27	3	-15
13	гексан C ₆ H ₁₄	1,9	5,0	35	4,3	0,05	1	35	5
14	гексиловий спирт C ₆ H ₁₄ O	2,0	3,0	40	3,1	0,22	2	9	25
15	гліцерин C ₃ H ₈ O ₃	4,0	-	70	4,3	0,25	18	35	40
16	пентан C ₅ H ₁₂	3,5	1,0	90	3,1	0	15	9	-5
17	толуол C ₇ H ₈	2,0	4,0	95	3,3	0,13	9	11	15
18	діетилловий ефір C ₄ H ₁₀ O	5,0	-	20	3,7	0,16	8	15	-25
19	етилацетат C ₄ H ₈ O ₂	5,0	5,0	65	4,1	0,11	6	30	-15
20	етилбензол C ₈ H ₁₀	1,8	3,0	25	3,9	0,1	3	20	5
21	етиленгліколь C ₂ H ₆ O ₂	3,0	2,0	30	4,1	0,08	12	30	25
22	етилловий спирт C ₂ H ₆ O	2,0	-	100	3,5	0,17	27	13	
23	метилформіат C ₂ H ₄ O ₂	1,9	3,0	80	2,7	0	1	5	-20
24	ізопентан C ₅ H ₁₂	3,0	-	30	2,7	0,24	7	5	-10
25	хлорбензол C ₆ H ₅ Cl	3,0	-	35	3,3	0,19	4	11	10
26	ізопропанол C ₃ H ₈ O	2,5	1,0	45	3,7	0,18	20	15	45
27	ізопропілформіат C ₄ H ₈ O ₂	3,0	2,0	35	2,9	0,23	4	7	20
28	камфен C ₁₀ H ₁₆	2,5	-	45	3,3	0,21	20	11	30
29	циклогексанол C ₆ H ₁₂ O	2,0	1,0	55	3,7	0,19	14	15	10
30	циклогексанон C ₆ H ₁₀ O	1,0	2,0	60	3,9	0,18	11	20	45

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

6. Розрахувати час, за який концентрація кисню у приміщенні при подаванні негорючого газу із заданою масовою витратою досягне заданого значення:

- а) при подаванні оксиду карбону (IV);
- б) при подаванні азоту;
- в) при подаванні пари води.

Параметри приміщення, отворів та температура навколишнього середовища наведено у таблиці. Прийняти, що відстань між центрами отворів за умови їх розташування на різному рівні дорівнює 1,7 м.

№ варіанта	Площа отворів, м ²		Параметри приміщення			Температура середовища у приміщенні, °С	Температура повітря ззовні приміщення, °С	Концентрація кисню у приміщенні, %	Витрата подавання негорючого газу у приміщення, кг·с
	нижнього	верхнього	площа, м ²	висота, м	η				
1	4,0	-	25	2,5	0,01	50	15	10,0	2,2
2	3,0	-	30	2,7	0,04	40	10	11,0	1,0
3	3,0	2,0	35	2,9	0,07	30	20	12,0	1,5
4	2,0	3,0	40	3,1	0,10	20	10	13,0	2,0
5	3,5	-	45	3,3	0,13	10	5	14,0	2,5
6	2,0	-	50	3,5	0,15	60	40	15,0	3,0
7	2,0	1,0	55	3,7	0,19	80	35	16,0	3,0
8	1,0	2,0	60	3,9	0,02	90	0	17,0	3,5
9	3,0	-	65	4,1	0,05	100	5	18,0	4,0
10	3,5	-	70	4,3	0,08	110	-5	19,0	4,5
11	3,0	1,0	75	2,5	0,11	120	-10	15,5	5,0
12	1,0	3,0	80	2,7	0,2	70	-25	16,5	5,5
13	2,5	-	85	2,9	0,17	130	-15	17,5	6,0
14	2,5	-	90	3,1	0,2	140	-20	18,5	6,5
15	4,0	1,5	95	3,3	0,03	150	-30	10,5	7,0

Глава 1. Параметри гасіння пожежі негорючими газами

16	1,5	4,0	99	3,5	0,06	160	40	11,5	7,5
17	2,0	-	20	3,7	0,25	170	35	12,5	8,0
18	5,0	-	25	3,9	0,12	180	20	13,5	8,5
19	5,0	1,0	30	4,1	0,15	190	30	14,5	9,0
20	2,0	2,0	65	4,3	0,13	60	35	17,0	4,5
21	1,0	-	70	2,5	0,15	80	0	18,0	5,0
22	3,0	-	75	2,7	0,19	90	5	19,0	5,5
23	3,5	1,0	80	2,9	0,02	100	-5	15,5	6,0
24	3,0	3,0	85	3,1	0,05	110	-10	16,5	6,5
25	1,0	-	90	3,3	0,08	120	-25	17,5	7,0
26	2,5	-	95	3,5	0,11	70	-15	18,5	7,5
27	2,5	1,5	99	3,7	0,2	130	-20	10,5	8,0
28	4,0	4,0	20	3,9	0,17	140	-30	11,5	8,5
29	3,5	-	25	4,1	0,2	160	40	12,5	9,0
30	1,0	5,0	35	4,3	0,18	200	25	19,5	9,5

7. Розрахувати час, за який всередині закритого апарата по переробці диму тилового ефіру об'ємом 10 м³ буде створена вибухобезпечна концентрація кисню

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

8. Для речовин, наведених у таблиці, розрахувати можливість та час об'ємного гасіння пожежі негорючим газом, якщо відомі об'єм приміщення, діаметр отвору та тиск у системі подавання негорючого газу, а також масова витрата, з якою газова суміш витікає із приміщення унаслідок газообміну із навколишнім середовищем:

- а) при гасінні оксидом карбону (IV);
- б) при гасінні азотом;
- в) при гасінні парою води.

Прийняти, що атмосферний тиск дорівнює 101,3 кПа.

№ варіанта	Горюча речовина	Діаметр отвору, через який подають негорючий газ, мм	Тиск у системі подавання негорючого газу, кПа	Вільний об'єм приміщення $V_{\text{віль}}, \text{м}^3$	Температура газового середовища у приміщенні, $^{\circ}\text{C}$	Витрата витікання газової суміші із приміщення, $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}$
1	гексан C_6H_{14}	5	200	100	200	0,01
2	пропіонова кислота $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$	13	130	70	100	1,5
3	<i>n</i> -ксилол C_8H_{10}	10	260	40	900	0,02
4	фенол $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$	3	190	20	85	1,4
5	пропанол $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$	6	320	20	500	0,03
6	етилпропілкетон $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$	4	350	170	1000	1,3
7	пропаналь $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	7	380	140	800	0,04
8	пентанол-2 $\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$	8	410	110	450	1,2
9	метилформіат $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	10	210	80	400	0,05

Глава 1. Параметри гасіння пожежі негорючими газами

№ варіанта	Горюча речовина	Діаметр отвору, через який подають негорючий газ, мм	Тиск у системі подавання негорючого газу, кПа	Вільний об'єм приміщення $V_{\text{віль}} \text{ м}^3$	Температура газового середовища у приміщенні, °С	Витрата витікання газової суміші із приміщення, кг·с ⁻¹
10	толуол C_7H_8	11	240	300	135	1,1
11	бензиловий спирт C_7H_8O	12	170	270	150	0,06
12	<i>m</i> -метилфенол C_7H_8O	10	300	240	700	1,0
13	етилбензол C_8H_{10}	14	330	210	600	0,07
14	етилпропіонат $C_5H_{10}O_2$	25	160	180	150	0,9
15	ацетон C_3H_6O	16	390	150	300	0,08
16	нонан C_9H_{20}	15	220	120	250	0,8
17	пропілбензол C_9H_{12}	17	250	90	70	0,09
18	метилпропілкетон $C_5H_{10}O$	18	180	600	100	0,7
19	пропілформіат $C_4H_8O_2$	19	310	300	150	0,1
20	гексилловий спирт $C_6H_{14}O$	12	210	300	400	0,2
21	гептан C_7H_{14}	10	240	270	135	0,3
22	декан $C_{10}H_{22}$	14	170	240	150	0,4
23	діацетоновий спирт $C_6H_{12}O_2$	25	300	210	700	0,5
24	крезол C_7H_8O	16	330	180	600	0,6
25	ксилідин $C_8H_{11}N$	15	160	150	150	1,3
26	кумол C_9H_{12}	17	390	120	300	0,04
27	мезитилен C_9H_{12}	18	220	90	250	1,2
28	метилгексан-2 C_7H_{14}	19	250	600	700	0,05
29	метанол CH_4O	10	180	300	100	1,1
30	етиленгліколь $C_2H_6O_2$	20	340	100	150	0,06

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

9. Розрахувати загальну витрату та нормативну інтенсивність подавання негорючого газу на об'ємне гасіння пожежі, якщо подавання негорючого газу у приміщення здійснюється із заданою маосовою витратою

- а) при гасінні оксидом карбону (IV);
- б) при гасінні азотом;
- в) при гасінні парою води.

Прийняти, що умови газового середовища назовні є нормальними, а відстань між центрами отворів за умови їх розташування на різному рівні дорівнює 1,2 м.

№ варіанта	Горюча речовина	Площа отворів, м ²		Вільний об'єм приміщення, м ³	Температура пожежі, °С	Витрата, з якою негорючий газ подають у приміщення, кг·с ⁻¹
		нижнього	верхнього			
1	пропіонова кислота C ₃ H ₆ O ₂	1,0	-	100	40	1,0
2	гексан C ₆ H ₁₄	3,0	-	70	50	1,5
3	пропаном C ₃ H ₈ O	3,0	-	40	90	2,0
4	<i>n</i> -ксилол C ₈ H ₁₀	2,0	3,0	20	85	2,5
5	фенол C ₆ H ₆ O	1,5	-	20	50	3,0
6	пропаналь C ₃ H ₆ O	2,0	-	170	100	3,0
7	етилпропілкетон C ₆ H ₁₂ O	2,0	1,0	140	80	3,5
8	кумол C ₉ H ₁₂	1,0	2,0	110	45	4,0
9	пентанол-2 C ₅ H ₁₂ O	2,0	-	80	40	4,5
10	бензиловий спирт C ₇ H ₈ O	3,5	-	300	135	5,0
11	толуол C ₇ H ₈	3,0	1,0	270	65	5,5
12	етилбензол C ₈ H ₁₀	1,0	3,0	240	70	6,0
13	<i>m</i> -метилфенол C ₇ H ₉ O	2,5	-	210	60	6,5
14	ацетон C ₃ H ₆ O	2,5	-	180	150	7,0
15	етилпропіонат C ₅ H ₁₀ O ₂	4,0	1,5	150	30	7,5

Глава 1. Параметри гасіння пожежі негорючими газами

16	пропілбензол C_9H_{12}	1,5	4,0	120	75	8,0
17	нонан C_9H_{20}	3,0	-	90	70	8,5
18	пропілформіат $C_4H_8O_2$	5,0	-	600	110	9,0
19	метилпропілкетон $C_5H_{10}O$	5,0	1,0	300	155	9,5
20	декан $C_{10}H_{22}$	2,0	-	170	40	3,0
21	ноніловий спирт $C_9H_{20}O$	1,0	-	140	135	3,5
22	октан C_8H_{18}	2,0	1,0	110	65	4,0
23	октаналь $C_8H_{16}O$	3,5	3,0	80	70	4,5
24	піридин C_5H_5N	3,0	-	300	60	5,0
25	пірол C_4H_5N	1,0	-	270	150	5,5
26	пропаналь $C_3H_6O_2$	2,5	1,5	240	30	6,0
27	пропіламін C_3H_9N	2,5	4,0	210	75	6,5
28	цимол $C_{10}H_{14}$	4,0	-	180	70	7,0
29	етилацетат $C_4H_8O_2$	2,5	-	150	110	7,5
30	метилформіат $C_2H_4O_2$	1,0	5,0	120	155	10,0

10*. У фарбувальній камері розмірами 4×4×2,8 м відбувся аварійний розлив метилового спирту. Попередження виникнення вибуху здійснюють за допомогою водяної пари. Розрахувати мінімальний вибухонебезпечний вміст кисню для метилового спирту та час, за який така концентрація кисню буде досягнута в об'ємі камери при подаванні водяної пари з питомою масовою витратою 1,5 кг с⁻¹. У приміщенні відкритий дверний отвір розміром 2×1,5 м. Прийняти, що 17 % об'єму камери зайнята обладнанням, умови повітряного середовища назовні є стандартними, а середньооб'ємна температура газового середовища у фарбувальній камері дорівнює 55 °С.

11*. Визначити загальну витрату та час гасіння пожежі пропаналю C_3H_6O азотом у приміщенні розмірами 18×8×3,5 м, якщо тиск в системі подавання негорючого газу – 350 кПа, а загальна площа сприсків, через які

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами
відбувається подавання газу, дорівнює 30 см^2 . У приміщенні відкритий дверний отвір розміром $2,2 \times 1,8 \text{ м}$, 25% об'єму приміщення зайнята обладнанням. Середньооб'ємна температура газового середовища у приміщенні під час пожежі досягла $250 \text{ }^\circ\text{C}$, а умови повітряного середовища назовні приміщення є стандартними.

12*. В об'ємі фарбувальної камери розмірами $5 \text{ м} \times 10 \text{ м} \times 3,0 \text{ м}$ відбувається горіння аварійного розливу октану на площі 15 м^2 . Розрахувати оптимальну витрату та інтенсивність подавання оксиду карбону (IV), а також відповідний час об'ємного гасіння пожежі, якщо негорючий газ введено на гасіння на 5 хв. вільного розвитку пожежі. Прийняти, що 20% об'єму камери зайнята обладнанням. Газообмін здійснюється через відкритий дверний отвір розмірами $2,0 \text{ м} \times 2,5 \text{ м}$. Температура навколишнього повітря дорівнює $35 \text{ }^\circ\text{C}$, атмосферний тиск – $101,3 \text{ кПа}$.

13*. Розрахувати загальну витрату та нормативну інтенсивність подавання водяної пари на об'ємне гасіння пожежі бензолу у приміщенні розмірами $10 \text{ м} \times 10 \text{ м} \times 3,5 \text{ м}$ із вхідним отвором розмірами $2 \text{ м} \times 3 \text{ м}$ і витяжним люком розмірами $0,5 \text{ м} \times 1 \text{ м}$ за оптимальної питомої витрати подавання водяної пари, якщо меблями та обладнанням у приміщенні зайнято 12% об'єму, середньооб'ємна температура газового середовища у приміщенні під час пожежі дорівнює $150 \text{ }^\circ\text{C}$, а температура навколишнього повітря – мінус $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

ГЛАВА 2. ПАРАМЕТРИ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ ОХОЛОДЖУЮЧИМИ ВОГНЕГАСНИМИ ЗАСОБАМИ

У практиці пожежогасіння найчастіше застосовують припинення горіння з використанням охолоджуючих вогнегасних засобів. Вогнегасною речовиною охолоджуючої дії може бути будь-яка речовина, що відповідає загальним вимогам і має високу теплоємність, велику теплоту фазових переходів, низьку температуру початку фазового переходу та термічну стійкість у діапазоні температур горіння речовин. Найбільше цим вимогам відповідає вода. За статистичними даними майже 90 % всіх пожеж гасять за допомогою води або вогнегасних складів на основі води. Вода є надійною й ефективною під час гасіння пожеж, пов'язаних з горінням речовин в усіх агрегатних станах.

Припинення горіння охолодженням ґрунтується на зниженні температури в зоні реакції горіння до температури погасання за рахунок:

охолодження самої зони горіння;

охолодження поверхні конденсованої горючої речовини.

Якщо *охолоджують зону горіння*, наприклад, при згорянні газів або пароповітряних сумішей, умовою припинення горіння є співвідношення:

$$T_{зг} < T_{пог},$$

де $T_{зг}$ – температура зони горіння, К;

$T_{пог}$ – температура погасання, К.

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

Виконати цю умову можна, якщо забезпечити певну інтенсивність тепловідводу із зони реакції горіння.

Для більшості вуглеводнів дійсна температура горіння становить 1400-1500 К. Якщо вважати, що початкова температура горючої системи становила 300 К, то можна вважати, що температура системи підвищилась на 1200 К. На це підвищення температури затрачується приблизно 60 % загального тепла Q_n , яке виділяється під час горіння даної речовини (з урахуванням тепловтрат у навколишнє середовище за рахунок променистої теплопередачі). Температура погасання більшості вуглеводнів становить приблизно 1200-1300 К, отже, для припинення горіння методом охолодження зони горіння потрібно знизити температуру полум'я приблизно на 200 °С. Таким чином, згідно з [15], для того щоб припинити горіння вуглеводнів методом охолодження зони горіння, необхідно відвести:

$$Q_{\text{відв}} \approx \frac{200}{1200} 0,6Q'_n = 0,1Q'_n \cdot \text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}. \quad (5.218)$$

Однак потрібно зазначити, що за умови полум'яного горіння охолодити безпосередньо зону горіння, яка являє собою тонкий рухливий шар газу, досить важко. Тому використовують інший метод гасіння – *охолодження поверхні конденсованої речовини*, що горить, нижче критичної температури. За дифузійного горіння рідини надійного ефекту гасіння можна досягти тільки після того, як температура поверхневого шару стане меншою за температуру спалаху горючої рідини, а при гасінні твердих горючих матеріалів –

меншою за температуру початку піролізу. При цьому інтенсивність надходження продуктів газифікації (пари чи газів розкладання) в зону реакції знизиться, концентрація горючої речовини стане меншою за нижню концентраційну межу поширення полум'я φ_n , унаслідок чого горіння припиняється.

Для того щоб під час пожежі охолодити поверхневий шар горючої речовини до критичної температури ($t_{сп}$ або $t_{пір}$), необхідно також компенсувати тепло, яке підводиться до поверхні речовини випромінюванням і конвекцією із зони горіння під час гасіння. Ця умова реалізується, якщо буде відведено:

$$Q_{відв} \geq \tau_{гас} (q_{пром} + q_{конв}) + Q_{зап_{пш}}, \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-2}, \quad (5.229)$$

де $Q_{відв}$ – питоме відведення тепла від одиниці площі поверхневого шару горючої речовини, $\text{кДж} \cdot \text{м}^{-2}$;

$\tau_{гас}$ – час гасіння, с;

$q_{пром}$ – 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, $\text{кДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;

$Q_{зап_{пш}}$ – питома кількість тепла, яка запасена у прогрітому шарі горючої речовини на одиниці площі її поверхні, $\text{кДж} \cdot \text{м}^{-2}$:

$$Q_{зап} = c_{р_{пш}} \rho_{пш} \delta_{пш} (t_s - t_{кр}), \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-2}, \quad (5.30)$$

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

де $c_{p_{пш}}$ – питома 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 $t_{пир}$), $^{\circ}\text{C}$;

Гасіння відбудеться, якщо кількість тепла, яку поглинає охолоджуючий вогнегасний засіб у зоні полум'яного горіння або на поверхні горючої речовини, буде перевищувати кількість тепла, що необхідно відвести від зони горіння або поверхневого шару палаючого матеріалу:

$$Q_{\text{погл}} \geq Q_{\text{відв}} \quad (5.31)$$

Питому кількість енергії, що поглинає 1 кг води, можна оцінити як:

$$q_{\text{погл}} = q_{\text{наг}}^{\text{рід}} + \Delta H_{\text{вип}} + q_{\text{наг}}^{\text{пар}}, \text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1},$$

де $\Delta H_{\text{вип}}$ – теплота пароутворення;

$q_{\text{наг}}^{\text{рід}}$ – кількість енергії, що поглинає 1 кг води при нагріванні від початкової температури до температури кипіння;

$q_{\text{наг}}^{\text{пар}}$ – кількість енергії, що поглинає 1 кг пари води при нагріванні від температури кипіння до температури зони горіння.

У цьому випадку передбачається, що вся вода, яку

подають на гасіння, попадає 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 подавання і розпилення води, інтенсивне стікання води у разі похилого або вертикального положення палаючої поверхні, а також через те, що краплі води випаровуються раніше, ніж нагріються до температури кипіння.

Якщо припустити, що в зону полум'я попадає не більше 80 % води, нагрівається до температури 80 °С близько 90 % з тієї, що залишилася, переходить у пару не більше за 75 %, а в зоні горіння залишається і нагрівається до температури зони горіння близько 75 % пари, тоді питому кількість теплоти, яку поглинає 1 кг води, можна оцінити як:

$$q_{\text{погл}} = 0,7c_p^{\text{рід}}(80 - t_0) + 0,55\Delta H_{\text{вип}} + 0,4c_p^{\text{пар}}(t_{\text{гор}} - 80),$$

кДж·кг⁻¹, (5.32)

де $c_p^{\text{рід}}$ – питома масова теплоємність води у рідкому стані, 4,2 кДж·кг⁻¹·К⁻¹;

$c_p^{\text{пар}}$ – питома масова теплоємність пари води в діапазоні температур до $t_{\text{гор}}$, 1,96 кДж·кг⁻¹ К⁻¹.

Враховуючи, що густина води дорівнює 1 кг·л⁻¹, теоретичну загальну витрату вогнегасного засобу для припинення горіння можна визначити зі співвідношення:

$$G_{\text{теор}} = \frac{Q_{\text{відв}}}{q_{\text{погл}}}, \text{ л} \cdot \text{кг}^{-1} \text{ або л} \cdot \text{м}^{-2}. \quad (5.33)$$

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

Під час гасіння методом охолодження зони горіння загальну витрату вогнегасного засобу можна представити, з урахуванням рівнянь (5.33) і (5.229), у вигляді:

$$G_{\text{теор}} = \frac{0,1Q'_n}{q_{\text{погл}}}, \text{ л} \cdot \text{кг}^{-1}. \quad (5.234)$$

З урахуванням масової швидкості вигорання горючої речовини теоретично необхідну інтенсивність подавання охолоджуючого вогнегасного засобу на гасіння можна розрахувати як:

$$I_{\text{теор}} = \eta v_m K_n G_{\text{теор}}, \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (5.245)$$

де v_m – масова швидкість вигорання речовини, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;

K_n – коефіцієнт поверхні, який враховує можливість вигорання горючої речовини з вертикальних та похилих поверхонь;

η – коефіцієнт повноти згорання горючої речовини;

$G_{\text{теор}}$ – теоретична витрата води на гасіння, $\text{л} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Під час гасіння легкозаймистих рідин припинити горіння тільки за рахунок охолодження поверхневого шару рідини до температури менше, ніж температура спалаху, неможливо. Основну роль у цьому випадку відіграє процес охолодження зони горіння та розведення зони горіння паром, що утворюється під час випаровування води. Експериментальні дослідження показали, що успішно гасити розпиленою водою вдається лише рідини із температурою спалаху, вищою за 100°C . Розрахунок

критичної інтенсивності подавання розпиленої води на гасіння горючих рідин згідно [37] проводять за формулою:

$$I_{кр} = 220 \cdot v_m^2 \cdot \sqrt[3]{\frac{v_m \cdot D}{v \cdot \rho_{гр}} \left[\frac{\rho_{гр} \cdot T_{гр}}{\rho_v \cdot (T_{ср} - T_0)} - 2 \right]^{-2}}, \quad (5.256)$$

де $T_{кип\ гр}$ – температура кипіння горючої рідини;

$T_{ср}$ – середня температура поверхневого шару

горючої рідини; $T_{ср} = \frac{T_{гр} + T_{сп}}{2}$;

$T_{сп}$ – температура спалаху горючої рідини;

T_0 – температура навколишнього середовища;

$\rho_{гр}$ – густина горючої рідини;

v – кінематична в'язкість горючої рідини, $m^2 \cdot s^{-1}$;

v_m – масова швидкість вигорання горючої рідини, $кг \cdot м^2 \cdot с^{-1}$;

D – середній розмір крапель розпиленої води, м; (для зрошувача ДП-15 $D=3 \cdot 10^{-3}$ м.).

Для визначення часу гасіння, виходячи із заданої інтенсивності подавання розпиленої води, розраховують безрозмірну інтенсивність подавання води за формулою:

$$y = \sqrt{\frac{I_{кр}}{I}}. \quad (5.267)$$

На основі безрозмірної інтенсивності подавання води розраховують безрозмірний час гасіння τ за формулою:

$$\tau = -y - \ln(1 - y). \quad (5.278)$$

Виходячи із величини безрозмірного часу гасіння, розраховуємо розмірний час гасіння $\tau_{\text{гас}}$, за формулою:

$$\tau_{\text{гас}} = 1,12 \cdot 10^{-7} \left(\frac{\rho_{\text{гр}}}{v_{\text{м}}} \right) \cdot \tau, \text{ с.} \quad (5.289)$$

Проте необхідно відмітити, що точно розрахувати кількість тепла, що необхідно відвести від палаючого матеріалу, за формулою (5.22) достатньо важко через невизначеність часу гасіння, частки конвекційної та променистої складової теплопередачі від зони горіння до поверхні горючого матеріалу, залежності температури, товщини та теплофізичних характеристик поверхневого шару матеріалу від часу горіння. Тому для орієнтовних розрахунків параметрів пожежогасіння у роботі [16] запропоновано використовувати так званий *критерій процесу гасіння (коефіцієнт гасіння)* – $K_{\text{гас}}$, який є відношенням оптимальної інтенсивності відведення тепла до інтенсивності тепловиділення і вважається величиною приблизно постійною для горючих речовин та матеріалів у різних агрегатних станах.

$$K_{\text{гас}} = \frac{q_{\text{відв}}}{q_{\text{вид}}}, \quad (5.40)$$

де $q_{\text{відв}}$ – інтенсивність, з якою необхідно відводити тепло від зони горіння або з одиниці поверхні конденсованої горючої речовини $\text{кДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;

$q_{\text{вид}}$ – інтенсивність виділення тепла з одиниці поверхні полум'я або горючої речовини під час горіння.

Згідно з [16] інтенсивність виділення тепла можна виразити так:

$$q_{\text{вид}} = \eta v_m Q'_n, \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (5.41)$$

де η – коефіцієнт повноти згорання;

v_m – масова швидкість вигорання горючої речовини, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$;

Q'_n – нижча теплота згорання горючої речовини, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Підставивши числові значення величин у формулу (5.), можна побачити, що для гасіння пожежі методом охолодження зони горіння $K_{\text{гас}} = 0,1$, а методом охолодження поверхні конденсованого горючого матеріалу – $K_{\text{гас}} = 0,2 \div 0,4$.

Знаючи числові значення критерію гасіння для різних видів горючих речовин, можна, виходячи із формул (5.7), (5.), (5.) та (5.), розрахувати необхідну інтенсивність подавання вогнегасної речовини:

$$I = \frac{K_{\text{гас}} \eta v_m Q'_n}{q_{\text{погл}}}, \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (5.42)$$

Методика розрахунку параметрів припинення горіння охолоджуючими вогнегасними засобами

1. Визначити для горючої речовини за довідником [18] або з таблиці додатків такі параметри: масову швидкість вигорання речовини v_m , температуру горіння $T_{\text{гор.}}$, нижчу масову теплоту згорання Q'_n , коефіцієнт повноти

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами
згорання речовини η та нормативну інтенсивність подавання вогнегасного засобу на гасіння $I_{\text{норм}}$.

2. Розрахувати питому охолоджувальну здатність води $q_{\text{погл}}$ з урахуванням втрат за формулою (5.32).

3. Розрахувати теоретичну загальну витрату води на гасіння методом охолодження зони полум'я за формулою (5.234).

4. Розрахувати теоретичну інтенсивність подавання води на гасіння:

а) зони полум'яного горіння за формулою (5.245);

б) поверхні палаючої конденсованої горючої речовини за відомого коефіцієнта гасіння за формулою (5.42).

5. Розрахувати коефіцієнт використання води за формулою (5.9).

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати теоретичну інтенсивність подавання води розпиленими струменями на гасіння бутилового спирту методом охолодження зони горіння, якщо початкова температура води дорівнює $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Розв'язання

1. Визначаємо для бутилового спирту за довідником [18] та з таблиці додатків масову швидкість вигорання речовини $v_m = 0,0135\text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$; температуру горіння $T_{\text{гор}} = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, нижчу масову теплоту згорання $Q'_n = 36805\text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}$; коефіцієнт повноти згорання речовини $\eta = 0,93$.

2. Розраховуємо питому теоретичну охолоджувальну здатність води з урахуванням втрат за формулою (5.32):

$$q_{\text{погл}} = 0,7 \cdot 4,19(80 - 25) + 0,55 \cdot 2260 + 0,4 \cdot 1,96(1000 - 80) = 2126 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

3. Розраховуємо теоретичну загальну витрату води на гасіння методом охолодження зони полум'я за формулою (5.234):

$$G_{\text{теор}} = \frac{0,1 \cdot 36805}{2126} = 1,73 \text{ л} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

4. Визначаємо теоретичну інтенсивність подавання води за формулою (5.245):

$$I_{\text{теор}} = 0,0135 \cdot 1,73 = 0,023 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Висновок: теоретична інтенсивність подавання води розпиленими струменями на гасіння бутилового спирту дорівнює $0,023 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати коефіцієнт використання води під час гасіння розпиленими струменями пожежі у бібліотеці, якщо початкова температура вогнегасної речовини дорівнює $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Коефіцієнт поверхні $K_{\text{п}}$ вважати рівним 3.

Розв'язання

1. Вважаємо, що основним горючим матеріалом в бібліотеці є книги на стелажах. Визначаємо для книг на стелажах за довідником [18] та з таблиці додатків масову швидкість вигорання $v_{\text{м}} = 0,01 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, температуру

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

горіння $T_{\text{гор}} = 700 \text{ }^\circ\text{C}$; нижчу масову теплоту згорання $Q'_n = 13400 \text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}$; коефіцієнт повноти згорання $\eta = 0,97$; нормативна інтенсивність подавання води розпиленими струменями на гасіння $I_{\text{норм}} = 0,3 \text{ л}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$.

2. Розраховуємо питому теоретичну охолоджуючу здатність води з урахуванням втрат за формулою (5.32):

$$q_{\text{погл}} = 0,7 \cdot 4,19(80 - 20) + 0,55 \cdot 2260 + 0,4 \cdot 1,96(700 - 80) = 1905 \text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}.$$

3. Розраховуємо теоретичну загальну витрату води на гасіння за формулою (5.234):

$$G_{\text{теор}} = \frac{0,1 \cdot 13400}{1905} = 0,7 \text{ л}\cdot\text{кг}^{-1}.$$

4. Розраховуємо теоретичну інтенсивність подавання води за формулою (5.245):

$$I_{\text{теор}} = 0,01 \cdot 0,7 \cdot 3 = 0,021, \text{ л}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}.$$

5. Розраховуємо коефіцієнт використання води за формулою (5.9):

$$K_{\text{вик}} = \frac{0,021}{0,3} = 0,07.$$

Висновок: коефіцієнт використання води на гасіння

пожежі у бібліотеці розпиленими струменями за даних умов дорівнює 7 %.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати інтенсивність подавання води та коефіцієнт її використання на гасіння пожежі на складі пиломатеріалів вологістю 10 %, якщо початкова температура повітря дорівнює 22 °С; коефіцієнт гасіння $K_{\text{гас}}$ вважати рівним 0,3.

Розв'язання

1. Визначаємо для деревини у штабелях за довідником [18] та з таблиці додатків: масова швидкість вигорання $v_m = 0,12 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; температура горіння $T_{\text{гор}} = 900 \text{ °С}$; нижча масова теплота згорання $Q'_H = 16600 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$; коефіцієнт повноти згорання $\eta = 0,97$; нормативна інтенсивність подавання води на гасіння $I_{\text{норм}} = 0,45 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

2. Розраховуємо питому теоретичну охолоджувальну здатність води з урахуванням втрат за формулою (5.32):

$$q_{\text{погл}} = 0,7 \cdot 4,19(80 - 22) + 0,55 \cdot 2260 + 0,4 \cdot 1,96(900 - 80) = 2056 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

3. Розраховуємо інтенсивність подавання води на гасіння з урахуванням коефіцієнта гасіння за формулою (5.42):

$$I = \frac{0,3 \cdot 0,97 \cdot 0,12 \cdot 16600}{2056} = 0,28 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

4. Розраховуємо коефіцієнт використання води за формулою (5.9):

$$K_{\text{вик}} = \frac{0,28}{0,45} = 0,62$$

Висновок: інтенсивність подавання води на гасіння пожежі складу пиломатеріалів з урахуванням коефіцієнта гасіння дорівнює $0,28 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, а коефіцієнт її використання – 62 %.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати критичну інтенсивність подавання розпилених струменів води на гасіння дибутилфталату а також час гасіння за фактичної інтенсивності подавання води $0,38 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ за стандартних умов. Масова швидкість вигорання дибутилфталату дорівнює $0,03 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Середній розмір крапель води, що утворюються в системі гасіння – $3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$.

Розв'язання

1. Визначаємо для дибутилфталату за довідником [7] такі параметри:

температура кипіння $T_{\text{гр}} = 613 \text{ К}$; температура спалаху $T_{\text{сп}} = 421 \text{ К}$; густина $\rho_{\text{гр}} = 1047 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$; кінематична в'язкість $\nu = 2,39 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

2. Розрахуємо критичну інтенсивність подавання води на гасіння дибутилфталату за формулою(5.256):

$$T_{\text{ср}} = \frac{613 + 421}{2} = 517 \text{ К};$$

$$I_{\text{êð}} = 220 \cdot 0,03^2 \cdot 3 \sqrt{\frac{0,03 \cdot 3 \cdot 10^{-4}}{2,39 \cdot 10^{-5} \cdot 1047} \left[\frac{1047 \cdot 613}{1000 \cdot (517 - 293)} - 2 \right]^{-2}} = 0,0188 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}.$$

3. Розраховуємо безрозмірну інтенсивність подавання води за формулою(5.267):

$$y = \sqrt{\frac{0,0188}{0,038}} = 0,703.$$

4. Розраховуємо безрозмірний час гасіння за формулою(5.27):

$$\tau = -0,703 - \ln(1 - 0,703) = 0,512.$$

5. Розраховуємо розмірний час гасіння за фактичної інтенсивності подавання води $0,38 \text{ л} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ за формулою (5.288):

$$\tau_{\text{ããñ}} = 1,12 \cdot 10^{-7} \left(\frac{1047}{0,03} \right) \cdot 0,512 = 69,8 \text{ ñ}.$$

Висновок: критична інтенсивність подавання води на гасіння дибутилфталату становить $0,0118 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Час гасіння за інтенсивності подавання води $0,38 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ становить 69,8 с.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Для матеріалів, поданих у таблиці, розрахувати:
 - а) теоретичну інтенсивність подавання води на гасіння пожежі тонкорозпиленими струменями;
 - б) коефіцієнт використання та коефіцієнт втрат води за фактичної інтенсивність подавання води на гасіння.

№	Матеріал, що горить	Коефіцієнт поверхні горіння $K_{\text{п}}$	Початкова температура води, $^{\circ}\text{C}$	Фактична інтенсивність подавання води на гасіння, $\text{л м}^{-2} \text{с}^{-1}$
1	деревина у виробах	2,5	10	0,5
2	деревина у виробах	3	35	0,4
3	деревина у виробах	3,5	15	0,6
4	гумотехнічні вироби	2,5	20	0,35
5	гумотехнічні вироби	3,0	-20	0,4
6	гумотехнічні вироби	2,0	30	0,4
7	поліетилен у виробах	1,7	40	0,2
8	поліетилен у виробах	1,5	-5	0,25
9	поліетилен у виробах	1,3	5	0,3
10	поліпропілен у виробах	1,9	10	0,15
11	поліпропілен у виробах	1,5	-15	0,20
12	поліпропілен у виробах	1,2	15	0,25
13	костриця з льону	3,0	20	0,4
14	костриця з льону	3,5	0	0,35
15	костриця з льону	2,0	30	0,3
16	бавовна	3,5	40	0,35
17	бавовна	4,5	35	0,30
18	бавовна	2,5	5	0,45
19	папір	3,5	10	0,35
20	папір	2,5	15	0,45
21	папір	4,0	-20	0,4

22	торф вологістю 10 %	3,0	20	0,25
23	торф вологістю 10 %	2,5	10	0,35
24	торф вологістю 20 %	2,0	30	0,3
25	каучук синтетичний	2,0	40	0,35
26	каучук синтетичний	2,5	25	0,3
27	каучук натуральний	1,5	5	0,4
28	каучук натуральний	2,0	-10	0,35
29	книги на стелажах	4,0	22	0,4
30	книги на стелажах	3,0	33	0,45

2*. Розрахувати час гасіння пожежі додекану на площі 20 м^2 якщо фактична інтенсивність подавання розпиленої води дорівнює $0,25 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, масова швидкість вигорання додекану дорівнює $0,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, температура навколишнього середовища $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

3*. Розрахувати критичну інтенсивність подавання води для гасіння пожежі диметилфталату та загальну витрату за фактичної інтенсивності подавання розпиленої води $0,4 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, якщо горіння відбувається на площі 10 м^2 , масова швидкість вигорання диметилфталату дорівнює $0,04 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, температура навколишнього середовища $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

4. Для матеріалів, представлених у таблиці, розрахувати такі параметри гасіння пожежі компактным струменем водою: загальну та питому витрати води, інтенсивність подавання, коефіцієнт використання води.

№	Матеріал, що горить	Коефіцієнт поверхні, $K_{\text{п}}$	Площа пожежі, м^2	Загальний об'єм води, витрачений на гасіння, м^3	Час гасіння пожежі, хв	Початкова температура води, $^{\circ}\text{C}$
1	деревина у виробах	2,0	10	2,0	5	5
2	деревина у виробах	3,0	15	2,4	7	10
3	гумотехнічні вироби	2,8	20	1,2	12	15
4	гумотехнічні вироби	2,0	30	2,0	28	25
5	поліетилен у виробах	1,8	40	3,5	10	35
6	поліетилен у виробах	1,2	50	2,5	5	10
7	карболітові вироби	1,7	100	11,0	15	20
8	карболітові вироби	2,0	50	3,0	10	15
9	поліпропілен у виробах	1,5	150	12,0	7	25
10	поліпропілен у виробах	1,3	20	1,5	10	20
11	органічне скло	2,0	10	1,5	15	30
12	органічне скло	1,8	30	2,5	20	5
13	костриця з льону	2,5	15	5,5	28	40
14	костриця з льону	3,0	40	7,0	8	10
15	бавовна	3,0	20	5,1	10	35
16	бавовна	2,0	30	5,35	5	15
17	каучук натуральний	1,5	40	9,0	5	5
18	каучук натуральний	2,3	10	6,1	10	35
19	папір	2,8	50	9,7	7	10
20	папір	3,5	60	8,0	16	25
21	полістирол	2,0	100	13,0	22	15
22	полістирол	1,2	25	1,9	9	20
23	торф вологістю 10 %	2,7	150	14,0	28	25
24	торф вологістю 10 %	3,2	300	25	35	18

Глава 2. Параметри гасіння пожежі охолоджуючими вогнегасними засобами

25	каучук синтетичний	1,4	15	5,2	5	10
26	каучук синтетичний	1,3	10	2,2	8	30
27	фенопласт	2,0	20	2,6	17	11
28	фенопласт	3,0	20	2,5	15	20
29	книги на стелажах	3,3	30	3,6	22	22
30	книги на стелажах	3,5	40	6,0	20	12

5. Для матеріалів, представлених у таблиці, розрахувати загальний об'єм води, витрачений на гасіння пожежі, за умов, наведених у таблиці. Інтенсивність подавання води на гасіння пожежі розрахувати з урахуванням коефіцієнта гасіння.

№	Матеріал, що горить	Коефіцієнт гасіння, $K_{гас}$	Площа пожежі, m^2	Час гасіння пожежі, хв	Початкова температура води, $^{\circ}C$
1	бавовна	0,3	200	10	5
2	бавовна	0,26	130	5	10
3	гумотехнічні вироби	0,32	200	22	5
4	гумотехнічні вироби	0,28	130	8	10
5	карболітові вироби	0,3	40	18	12
6	карболітові вироби	0,35	100	5	35
7	поліпропілен у виробках	0,26	120	22	14
8	поліпропілен у виробках	0,38	150	7	10
9	органічне скло	0,27	10	10	11
10	кошиця з льону	0,29	150	28	22
11	кошиця з льону	0,3	200	35	20
12	поліетилен у виробках	0,33	240	10	15
13	поліетилен у виробках	0,26	50	5	25
14	папір	0,25	150	7	25
15	папір	0,3	80	18	18
16	полістирол	0,27	100	22	35
17	торф вологістю 10 %	0,32	150	28	10

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

18	торф вологістю 10 %	0,25	300	50	8
19	каучук синтетичний	0,29	35	5	25
20	каучук синтетичний	0,32	40	20	12
21	деревина у виробках	0,3	100	5	35
22	деревина у виробках	0,25	150	7	15
23	фенопласт	0,29	20	12	14
24	фенопласт	0,31	20	12	30
25	книги на стелажах	0,3	40	18	20
26	книги на стелажах	0,35	120	22	40
27	книги на стелажах	0,25	20	15	15
28	каучук натуральний	0,33	40	10	20
29	каучук натуральний	0,28	40	5	15
30	каучук натуральний	0,33	25	20	10

ГЛАВА 3. ПАРАМЕТРИ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ ІЗОЛЮЮЧИМИ ВОГНЕГАСНИМИ ЗАСОБАМИ

Одним зі способів припинення горіння є зниження інтенсивності тепловиділення за рахунок зменшення 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) і при гасінні пожеж класу D використовують **вогнегасні порошки спеціального призначення**. Порошки спеціального призначення подають на поверхню гетерогенного горіння, де порошок плавиться і покриває поверхню горючої речовини плівкою, яка не пропускає окисник у зону гетерогенного горіння або леткі продукти розкладання – у зону полум'яного горіння.

Принципово повного припинення надходження компонентів у зону горіння не потрібно – достатньо знизити швидкість надходження одного з компонентів до рівня, за якого інтенсивність тепловиділення стане меншою за інтенсивність тепловіддачі у навколишнє середовище. Іншими словами, необхідно, щоб концентрація продуктів газифікації горючої речовини (унаслідок випаровування, сублимації або розкладання) в зоні горіння знизилася нижче нижньої концентраційної межі поширення полум'я. Найчастіше це досягається поглинанням горючих газів у шарі ізолюючої речовини – вогнегасної піни.

Піна – це колоїдна система плівково-чарункової структури, що містить газ як дисперсну фазу, а як дисперсійне середовище – рідину (пухирці газу, оточені

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами рідинними плівками).

Вогнегасна здатність піни зумовлена, передусім, її здатністю перешкоджати проходженню в зону полум'я горючої пари. Плівки рідини між бульбашками піни сильно гальмують надходження горючої пари від поверхні конденсованої речовини в зону горіння за рахунок того, що коефіцієнт дифузії пари через рідинні плівки піни є значно меншим, ніж у повітрі.

Стійкі піни утворюються при додаванні в систему “вода-газ” речовин, які мають низьке поверхнєве натягнення і, найголовніше, здатні різко змінювати його залежно від концентрації. Такі речовини називають *поверхнево-активними (ПАР)* – речовини, які здатні при розчиненні у воді накопичуватися на поверхні розділу фаз та змінювати (зменшувати) поверхнєве натягнення розчину залежно від концентрації.

Складні розчини, які містять, крім ПАР, стабілізатори, згущувачі й інші спеціальні добавки, називають *піноутворювачами (ПУ)*.

Піноутворювач – речовина, яка під час змішування з водою у відповідних співвідношеннях утворює робочий розчин, що здатний генерувати піну в разі використання відповідного обладнання, а також змочувальний розчин (як охолоджуючий вогнегасний засіб).

Робочий розчин піноутворювача (робочий розчин) – розчин піноутворювача певної концентрації у воді, що забезпечує отримання піни відповідної кратності і вогнегасної здатності в разі використання відповідного обладнання в умовах спеціальних випробувань.

Залежно від поверхнево-активної основи піноутворювачі поділяють на протеїнові (білкові),

Глава 3. Параметри гасіння пожежі ізолюючими вогнегасними засобами

фторпротеїнові, синтетичні (вуглеводневі), фторсинтетичні плівкоутворювальні (AFFF) та фторпротеїнові плівкоутворювальні (FFFP).

Залежно від сфери застосування піноутворювачі для гасіння пожеж поділяються на піноутворювачі загального та спеціального (цільового) призначення.

Піноутворювачі загального призначення для гасіння пожеж – піноутворювачі, що здатні утворювати піну низької, середньої та високої кратності з робочих розчинів, а також змочувальні розчини для гасіння пожеж класів А і В (підкласи А1, А2, В1).

Піноутворювачі спеціального призначення для гасіння пожеж – піноутворювачі, що здатні утворювати робочі і змочувальні розчини, придатні для гасіння пожеж класів А і В (підкласи А1, А2, В1, В2), або такі, що придатні до застосування з морською водою як розчинником.

Плівкоутворювальний піноутворювач спеціального призначення для гасіння пожеж – піноутворювач, виготовлений на основі фторованих та інших поверхнево-активних речовин (ПАР) і здатний утворювати плівку з водного розчину піноутворювача на поверхні горючих рідин, яка характеризується здатністю до самовідновлення після механічного руйнування, а також зниженням швидкості дифузії парів горючої рідини.

За здатністю розкладатися під дією мікрофлори водоймищ і ґрунтів піноутворювачі поділяються на біологічно “м’які” (біологічна здатність до розкладання є вищою за 80%) та біологічно “жорсткі” (біологічна здатність до розкладання є меншою за 80%).

Вогнегасні властивості піни визначаються її кратністю, дисперсністю, стійкістю та ізолювальною здатністю.

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

Кратність піни – відношення об'єму піни до об'єму робочого розчину піноутворювача, з якого її отримано:

$$K_{\text{пін}} = \frac{V_{\text{пін}}}{V_{\text{розч}}}. \quad (5.43)$$

де $V_{\text{пін}}$ – об'єм піни;

$V_{\text{розч}}$ – об'єм робочого розчину піноутворювача, з якого отримано піну.

Розрізняють піни низької кратності ($K_{\text{пін}} < 20$), середньої кратності ($K_{\text{пін}} = 21 \div 200$) або високократні ($K_{\text{пін}} > 200$). Залежно від способу отримання, значення кратності піни, утвореної з того ж самого розчину, може відрізнятися на декілька порядків.

Піна за однакової кратності може мати різну структуру, яку, у свою чергу, можна охарактеризувати дисперсністю і товщиною рідинних оболонки.

Дисперсність піни – величина, що є зворотно пропорційною середньому діаметру пухирців газу. Визначає якість піни: чим більшою є дисперсність, тим більшою є стійкість і вогнегасна ефективність піни. Міра дисперсності піни залежить від умов її отримання.

Стійкість піни – здатність піни до збереження своєї структури протягом проміжку часу:

$$S_{\text{пін}} = \frac{V_{\text{пін}} \Delta \tau}{V_{\text{руйн}}}, \text{ с}, \quad (5.294)$$

де $V_{\text{пін}}$ – початковий об'єм піни;

$V_{\text{руйн}}$ – об'єм піни, що руйнується за встановлений

проміжок часу Δt .

Стійкість характеризує опір піни руйнуванню (величина, обернена до інтенсивності руйнування) і може визначатися *часом напіврозпаду піни*, тобто часом, протягом якого з піни виділиться половина рідини.

Стійкість піни залежить від її кратності, виду піноутворювача, його концентрації в розчині і структури піни. Так, стійкість піни є максимальною за кратності 80÷150, а підвищення кратності піни більше за 500 призводить до зменшення її стійкості, через те що рідинні плівки стають настільки тонкими, що міцність піни різко зменшується, піна легко руйнується, здувається вітром і висхідними потоками продуктів згоряння. Фторовані піноутворювачі утворюють піну, яка майже не руйнується на поверхні вуглеводнів і погано руйнується на поверхні водорозчинних рідин.

Ізолююча здатність піни – здатність піни перешкоджати випаровуванню горючої рідини. Чисельно ізолюючу здатність виражають часом, протягом якого пара горючої рідини (зазвичай бензолу, нагрітого до 70 °С) проходить через певний шар піни й утворює над цим шаром пароповітряну суміш, що займається від джерела запалювання.

Вогнегасна дія повітряно-механічної піни полягає в ізоляції поверхні пального від факела полум'я, в охолодженні рідини, що горить, зменшенні унаслідок цього швидкості випаровування пального і, як наслідок, кількості горючих парів, що надходять до зони горіння. Під час подавання піни одночасно відбувається її руйнування від факела полум'я та нагрітої поверхні пального. Шар піни, що накопичується, захищає частину

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

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 водна плівка, що утворюється з робочого розчину піноутворювача під час руйнування піни, яка розтікається по поверхні нафтопродукту. Одночасно розчин піноутворювача, що виділяється з піни, охолоджує нагрітий поверхневий шар пального. Крім цього, у процесі гасіння в об'ємі горючої рідини відбувається конвекційний тепломасообмін, унаслідок якого конвекційні потоки, які спрямовані від місця виходу піни до стінок резервуара, зрівнюють температуру рідини по всьому об'єму (за винятком "карманів", в яких тепломасообмін відбувається незалежно від основної маси рідини).

На вогнегасні властивості піни впливають природа горючого матеріалу і піноутворювача, температура і хімічний склад води, що використовується для приготування робочих розчинів піноутворювача, висота шару пального і тривалість горіння до початку подавання вогнегасних речовин в осередок горіння (особливо під час гасіння пожеж у резервуарах з нафтою і важкими нафтопродуктами), умови протікання пожежі, вид обладнання, яке застосовується для отримання піни та її подавання на гасіння тощо.

Піна низької кратності застосовується для гасіння пожеж поверхневим способом, тобто шляхом її подавання на поверхню рідини чи матеріалу, що горить. Піна середньої кратності застосовується для гасіння пожеж як поверхневим, так і об'ємним способом, тобто

Глава 3. Параметри гасіння пожежі ізолюючими вогнегасними засобами

шляхом заповнення піною усього об'єму закритих приміщень (наприклад, підвалів, горищ, кабельних тунелів), в яких сталася пожежа. Піна високої кратності застосовується для гасіння пожеж об'ємним способом.

Піноутворювачі загального призначення зазвичай застосовують для отримання пін середньої кратності, оскільки піни низької кратності, що утворюються з їх робочих розчинів, менш ефективні під час гасіння горючих (легкозаймистих) рідин. Це пояснюється тим, що гасіння пінами, що утворюються з робочих розчинів піноутворювачів загального призначення, настає після того, як на поверхні рідини накопичиться шар піни, товщина якого є достатньою для зниження концентрації горючих парів над поверхнею до значень, за яких горіння стає неможливим.

Плівкоутворювальні піноутворювачі спеціального призначення, як правило, є найбільш ефективними у разі їх застосування з обладнанням, призначеним для генерування піни низької кратності. При цьому гасіння пінами низької кратності настає не тільки за рахунок ізоляції пари рідини від зони горіння унаслідок утворення тонкої плівки робочого розчину плівкоутворювальних піноутворювачів на поверхні палаючої рідини, але і за рахунок додаткового охолодження палаючої поверхні водним розчином, що виділяється під час руйнування піни. У разі подавання на поверхню рідини піни середньої кратності, отриманої з робочого розчину плівкоутворювального піноутворювача, утворення захисної плівки також можливе, але її стійкість є меншою, ніж у випадку утворення плівки з піни низької кратності. Крім високої вогнегасної ефективності, піна

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

низької кратності має ще одну суттєву перевагу – її можна, якщо у цьому є потреба, подавати на декілька десятків метрів, у той час як стандартні генератори піни середньої кратності здатні подавати піну не далі, ніж на 5-6 м. Можливість подавання піни на великі відстані найбільш важлива у тих випадках, коли важко дістатися до осередку пожежі або перебування у безпосередній близькості до нього є небезпечним.

Піну заборонено застосовувати для гасіння електрообладнання, яке знаходиться під напругою (пожежа класу E), через добру електропровідність водного розчину, а також для гасіння речовин та матеріалів, які вступають у хімічну взаємодію з водою, що входить до складу піни, наприклад, лужних та лужноземельних металів, карбідів, нітридів металів тощо (пожежа класу D). Піна також не ефективна під час гасіння газоподібних речовин (пожеж класу C).

Піни найбільш часто застосовуються застосування при гасінні пожеж нафтопродуктів. Під час гасіння нафти і нафтопродуктів піною середньої кратності рекомендується брати таку нормативну інтенсивність подавання робочих розчинів піноутворювачів загального призначення:

- $0,08 \text{ л}^3 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, якщо температура спалаху рідини не перевищує $28 \text{ }^\circ\text{C}$;
- $0,05 \text{ л}^3 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, якщо температура спалаху рідини перевищує $28 \text{ }^\circ\text{C}$.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати об'єм піноутворювача ПО-6ТС, необхідний для гасіння резервуара РВС-5000 із дизельним паливом, якщо площа дзеркала резервуара становить 408 м². Робочий розчин піноутворювача має 6 % концентрацію, інтенсивність подавання розчину піноутворювача дорівнює 0,05 л·м⁻²·с⁻¹; нормативний час гасіння – 15 хв. Вважати, що втрати робочого розчину на стабілізацію піни не перевищують 10 %. Коефіцієнт запасу піноутворювача – 3.

Розв'язання

1. Розраховуємо об'єм робочого розчину піноутворювача, витраченого за нормативний час гасіння із урахуванням втрати робочого розчину на стабілізацію піни:

$$V_{\text{розч}} = 0,05 \cdot 408 \cdot 15 \cdot 60 \cdot 1,1 = 20196 \text{ л.}$$

2. Розраховуємо об'єм піноутворювача, враховуючи його концентрацію в робочому розчині:

$$V_{\text{ПУ}} = 20196 \cdot 0,06 = 1211,8 \text{ л.}$$

3. Розраховуємо об'єм піноутворювача, необхідний для гасіння резервуара РВС-5000 із дизельним паливом, із урахуванням коефіцієнта запасу:

$$V_{\text{ПУ}} = 1211,8 \cdot 3 = 3635,3 \text{ л.}$$

Висновок: для гасіння пожежі резервуара РВС-5000 із дизельним паливом і площею дзеркала рідини 408 м² протягом 15 хв. потрібно 3635,3 л піноутворювача ПО-6ТС.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати кратність та стійкість піни, якщо протягом 75 с об'єм піни зменшився з 5 л до 4,85 л, а при повному руйнуванні всього об'єму піни виділилося 0,083 л робочого розчину піноутворювача.

Розв'язання

1. Розраховуємо кратність піни за формулою (5.43):

$$K_{\text{пін}} = \frac{5}{0,083} = 60.$$

2. Розраховуємо стійкість піни за формулою (5.294):

$$S_{\text{пін}} = \frac{5 \cdot 75}{5 - 4,85} = 2500 \text{ с.}$$

Висновок: піна належить до пін середньої кратності, оскільки $K_{\text{пін}} < 200$; стійкість піни дорівнює 2500 с.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати фактичну інтенсивність подавання 5 % розчину піноутворювача та коефіцієнт використання піни при гасінні бензину на площі 300 м², якщо за час гасіння 3,5 хв використано 150 л піноутворювача. Нормативна інтенсивність подавання робочих розчинів піноутворювачів загального призначення на гасіння рідини з температурою спалаху менше 28 °С дорівнює 0,08 л³·м⁻²·с⁻¹.

Розв'язання

1. Розраховуємо об'єм робочого розчину піноутворювача, який було використано на гасіння:

$$V_{\text{розч}} = \frac{150 \cdot 100}{5} = 3000 \text{ л.}$$

2. Розраховуємо інтенсивність подавання робочого розчину піноутворювача за формулою (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 подавання 5%-ого розчину піноутворювача на гасіння бензину дорівнює $0,14 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, коефіцієнт використання – 57 %.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Розрахувати кратність та стійкість піни, виходячи із параметрів, наведених у таблиці.

№	Час руйнування піни, с	Об'єм робочого розчину піноутворювача, л	Початковий об'єм піни, л	Кінцевий об'єм піни, л
1	60	0,855	6	5,25
2	65	1,2	8,5	7,4
3	90	0,08	5,0	4,75
4	80	0,1	6,0	5,75
5	100	0,018	5,0	4,5
6	70	0,02	8,0	7,25
7	95	0,008	5,0	4,55
8	80	0,1	15,0	14,5
9	110	0,15	25,0	23,0
10	60	0,05	5,0	4,75
11	70	0,018	8,0	7,5
12	60	0,2	7,5	6,9
13	120	0,04	5,0	4,75
14	70	2,5	35	32
15	65	0,55	50	47
16	180	0,015	5,0	4,2
17	200	0,02	5,0	4,0
18	360	0,025	5,0	3,75
19	300	0,035	6,0	4,75
20	270	0,025	8,0	7,5
21	420	0,0125	5,0	4,05
22	70	0,24	45	44,5
23	280	0,12	25	24,5
24	160	0,008	3,0	2,75
25	90	0,15	15	14,5
26	480	0,015	4,0	3,25
27	270	0,045	14	13,25
28	600	0,15	44	38,5
29	90	0,1	18	17,25
30	120	0,07	20	19,75

Глава 3. Параметри гасіння пожежі ізолюючими вогнегасними засобами

2. Розрахувати фактичну інтенсивність подавання розчину піноутворювача та необхідну кількість піноутворювача для гасіння пожежі розливу горючої рідини. Параметри пожежі та гасіння наведені в таблиці.

№	Рідина, що горить	Площа пожежі, м ²	Об'єм розчину на гасіння, м ³	Кратність піни	Час гасіння, хв
1	бензин	300	12	15	20
2	бензин	200	10	25	20
3	бензин	100	15	100	15
4	бензин	200	20	150	15
5	бензин	300	20	300	10
6	диз. паливо	50	5	15	10
7	диз. паливо	150	12	25	20
8	гас	30	10	100	20
9	гас	300	15	150	15
10	гас	200	20	300	15
11	гас	100	20	15	10
12	нафта	200	5	25	10
13	нафта	300	12	100	20
14	нафта	50	10	150	5
15	нафта	150	15	300	15
16	циклогексан	30	20	15	5
17	циклогексан	300	20	25	10
18	циклогексан	200	5	100	10
19	лігроїн	100	12	150	20
20	лігроїн	200	10	300	20
21	лігроїн	300	15	40	15
22	лігроїн	50	20	70	15
23	мазут	150	20	100	10
24	мазут	30	5	150	5
25	мазут	400	10	300	20
26	мазут	80	20	40	20
27	бензол	100	8	120	15
28	бензол	50	6	140	12
29	бензол	80	15	100	15
30	бензол	120	18	150	10

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

3. За даними дослідів, що наведені в таблиці (площа пожежі, час гасіння та об'єм робочого розчину піноутворювача, що був використаний на гасіння), розрахувати питому витрату, фактичну інтенсивність подавання піноутворювача та коефіцієнт використання піни при гасінні пожежі бензину. Побудувати графіки залежності часу гасіння пожежі та витрати розчину піноутворювача від фактичної інтенсивності подавання повітряно-механічної піни. За допомогою графіків визначити критичну та оптимальну інтенсивність подавання та мінімальну витрату піни.

№	Площа пожежі, м ²	Час гасіння, с	Об'єм розчину піноутворювача, л
	Дослід 1		
1	0,025	64	0,12
2	0,025	30	0,10
3	0,025	21	0,10
4	0,025	27	0,10
5	0,025	120	0,20
6	0,025	20	0,18
	Дослід 2		
1	0,052	80	0,345
2	0,052	62	0,280
3	0,052	30	0,175
4	0,052	26	0,210
5	0,052	20	0,230
6	0,052	17	0,270
	Дослід 3		
1	0,036	68	0,210
2	0,036	60	0,195
3	0,036	33	0,155
4	0,036	25	0,140
5	0,036	20	0,160
6	0,036	21	0,200

Глава 3. Параметри гасіння пожежі ізолюючими вогнегасними засобами

4. Визначити кратність піни за наведених у таблиці параметрів її подавання для гасіння пожежі резервуара.

№ з/п	Інтенсивність подавання піни, л·м ² ·с ⁻¹ .	Діаметр резервуара, м	Час гасіння, хв.	Товщина шару піни, м.	Коефіцієнт втрат
1	0,05	17,9	20	0,3	4
2	0,08	14,6	15	0,25	3,0
3	0,09	12,3	8	0,2	3,5
4	0,1	12	7	0,25	5,0
5	0,06	4,7	11	0,15	2,5
6	0,05	4,1	6	0,18	2,0
7	0,09	7,1	15	0,20	3,2
8	0,1	6,6	5	0,25	3,0
9	0,08	9,5	9	0,3	3,5
10	0,1	9	12	0,35	3,0
11	0,06	4,7	4	0,2	2,5
12	0,08	10	14	0,3	3,5
13	0,05	4,0	5	0,25	2,0
14	0,05	5,6	6	0,2	2,5
15	0,09	5,4	7	0,25	2,0
16	0,1	4,0	4	0,2	2,0
17	0,12	9,3	11	0,15	4,0
18	0,07	7,1	9	0,30	3,5
19	0,09	9	10	0,25	4,5
20	0,06	12,3	18	0,30	5,0
21	0,1	9,5	15	0,35	4,5
22	0,1	14,6	20	0,25	4,0
23	0,09	15,2	22	0,3	5,0
24	0,06	8,9	9	0,15	3,5
25	0,08	6,6	7	0,20	3,0
26	0,09	4,0	4	0,25	2,5
27	0,05	5,7	5	0,25	2,5
28	0,08	7,1	8	0,3	3,0
29	0,06	6,6	6	0,35	3,5
30	0,05	9,3	12	0,3	4,0

Додатки

ДОДАТКИ

Таблиця 1. Молярна ентальпія продуктів горіння за постійного тиску

Температура, К	Ентальпія, кДж·моль ⁻¹							
	Повітря	CO ₂	H ₂ O	N ₂	HF	HCl	HBr	SO ₂
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	104,40	120,08
1400	44,00	65,19	53,51	43,61	41,63	70,12	111,20	131,35
1600	51,05	76,87	62,97	50,58	48,08	76,94	118,10	142,77
1800	58,20	88,70	72,82	57,65	54,70	83,90	125,20	154,31
2000	65,44	100,71	83,02	64,81	61,45	90,99	132,40	165,95
2200	72,76	112,82	93,41	71,97	68,27	98,08	139,60	177,55
2400	80,14	125,04	104,14	79,26	75,26	105,34	147,00	189,27
2600	86,58	137,32	115,08	86,57	82,32	112,67	154,40	201,21
2800	95,06	149,69	126,22	93,91	89,48	120,09	161,70	213,16
3000	102,60	162,10	137,56	101,30	96,74	127,64	169,40	225,15
3200	110,17	174,55	149,05	108,71	104,04	135,06	177,00	237,24
3400	117,77	187,06	160,69	116,14	111,40	142,62	184,70	249,36
3600	125,41	199,61	172,47	123,61	118,84	150,24	192,40	261,59
3800	133,08	212,19	184,37	131,08	126,33	157,90	200,00	273,89
4000	140,77	224,81	196,42	138,58	133,85	165,60	207,90	286,20

Додатки

Таблиця 2. Об'ємна ентальпія продуктів горіння за постійного тиску

Температура, К	Ентальпія, кДж·м ⁻³							
	Повітря	CO ₂	H ₂ O	N ₂	HF	HCl	HBr	SO ₂
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1220.44	3029.89	2858.55
298.15	386.44	417.23	442.22	386.88	383.76	1605.98	3415.89	1990.63
400	519.41	596.16	596.16	519.41	515.84	1738.51	3548.87	3518.97
600	786.26	992.86	910.75	783.58	776.44	2000.45	3811.69	3933.51
800	1064.70	1434.18	1246.32	1058.01	1038.82	2267.74	4083.89	4865.68
1000	1354.75	1906.29	1603.75	1344.49	1305.22	2545.29	4366.8	5109.04
1200	1655.07	2399.38	1984.83	1641.23	1577.8	2832.66	4660.87	5358.32
1400	1963.41	2908.97	2387.77	1946.01	1857.65	3128.96	4963.41	5861.22
1600	2278.00	3450.17	2809.91	2257.03	2145.47	3433.29	5273.99	6370.82
1800	2597.06	3958.06	3249.44	2572.51	2440.88	3743.86	5589.92	6885.77
2000	2920.13	4493.98	3704.60	2892.01	2742.08	4060.24	5911.65	7405.18
2200	3246.77	5034.36	4168.23	3211.51	3046.43	4376.62	6231.15	7922.80
2400	3576.08	5579.65	4647.03	3536.81	3358.32	4700.58	6559.57	8445.78
2600	3863.45	6127.62	5135.21	3863.01	3673.36	5027.67	6892.01	8978.58
2800	4241.86	6679.61	5632.31	4190.54	3992.86	5358.77	7217.32	9511.83
3000	4578.31	7233.38	6138.33	4520.30	4316.82	5695.67	7563.14	10046.85
3200	4916.11	7788.93	6651.05	4850.96	4642.57	6026.77	7901.83	10586.35
3400	5255.24	8347.17	7170.46	5182.51	4970.99	6364.12	8244.09	11127.18
3600	5596.16	8907.18	7696.12	5515.84	5302.99	6704.15	8587.24	11672.91
3800	5938.42	9468.54	8227.13	5849.17	5637.22	7045.96	8933.51	12221.78
4000	6281.57	10031.68	8764.84	6183.85	5972.78	7389.56	9281.12	12771.08

Додатки

Таблиця 3. Молярна внутрішня енергія продуктів горіння за постійного об'єму

Температура, К	Внутрішня енергія продуктів горіння, кДж·моль ⁻¹ ,							
	Повітря	CO ₂	H ₂ O	N ₂	HF	HCl	HBr	SO ₂
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	100,20	95,44	127,02	169,30	243,02
4000	108,26	192,31	163,91	106,07	101,34	133,09	175,40	253,70

Додатки

Таблиця 4. Теплоємність та теплота утворення простих речовин і продуктів горіння

Речовина	Теплоємність молярна, $c_p = a + bt$, Дж·моль ⁻¹ ·К ⁻¹		Теплоємність об'ємна, $c_p = a + bt$, Дж·м ⁻³ ·К ⁻¹		Теплота утворення, ΔH_{fi}^0 кДж·моль ⁻¹
	a	$b \cdot 10^{-3}$	a	b	
Повітря	29,830	2,030	1331,718	0,090625	0,00
N ₂	29,143	2,135	1301,031	0,095312	0,00
O ₂	32,471	1,695	1449,586	0,075669	0,00
CO	29,632	2,050	1322,876	0,091517	-110,50
HF	28,574	1,465	1275,606	0,065401	-268,61
HCl	27,901	2,300	1245,602	0,102678	-92,30
HBr	27,891	2,930	1245,409	0,130803	-35,98
HJ	29,689	5,650	1325,406	0,25223	25,94
NO	30,728	1,925	1371,780	0,085937	90,37
CO ₂	46,835	4,520	2090,861	0,201785	-393,78
H ₂ O (газ)	33,193	5,355	1481,839	0,239062	-241,84
HCN	42,739	5,650	1907,991	0,252232	130,54
SO ₂	46,292	6,275	2066,597	0,280133	-296,90
H ₂ O (рідина)					-285,84
H ₂ S	33,962	7,700	1516,139	0,343753	-20,15
SO ₃	69,332	6,715	3095,179	0,299782	-395,20
NH ₃	37,397	12,740	1669,503	0,568754	-46,19

Додатки

Таблиця 5. Параметри процесу горіння деяких матеріалів (за н.у.)

№	Речовина	Об'єм повітря $V_{\text{пов}}^0$, м ³ /кг	Об'єм продуктів згорання $V_{\text{пр}}^0$, м ³ /кг	Коефіцієнт повноти згорання η	Масова швидкість вигорання $V_{\text{пр}} \cdot 10^{-3}$, кг/(м ² с); (* - з поверхні поплум'я)	Лійна швидкість вигорання $V_{\text{л}} \cdot 10^{-6}$, м/с	Нормальна швидкість поширення горіння $V_{\text{н}}$, м/с	Теплота згорання $Q'_{\text{г}}$, кДж/кг	Температура горіння, К	Температура само-спалахування, °С	Мінімальна енергія запалювання $E_{\text{зап}}^0$, мДж
1	аміак NH ₃	4,70	5,68	0,97	-	-	0,23	18618	1777	650	680
2	ацетилен C ₂ H ₂	10,3	10,7	0,85	-	-	1,57	50038	2322	335	-
3	бутан C ₄ H ₁₀	11,9	12,9	0,85	100*	-	0,45	45810	-	405	0,25
4	водень H ₂	26,6	32,3	0,85	-	-	2,7	120800	2400	510	0,017
5	оксид карбону CO	1,9	2,3	0,97	-	-	-	10107	-	605	-
6	етан C ₂ H ₆	12,4	13,6	0,85	-	-	-	52533	-	515	0,48
7	епоксіетан C ₂ H ₄ O	6,06	6,83	0,93	-	-	0,9	27727	-	430	0,06
8	етилен C ₂ H ₄	11,4	12,22	0,85	-	-	0,74	47071	-	435	0,12
9	сірководень H ₂ S	4,71	5,03	0,97	-	-	0,41	15394	-	246	0,07
10	метан CH ₄	13,3	14,7	0,85	80*	-	0,39	50125	1300	537	0,28
11	акрилова кислота C ₃ H ₄ O ₂	4,44	5,08	0,97	37,0	-	-	17763	-	440	-
12	амілацетат C ₇ H ₁₄ O ₂	7,80	8,56	0,93	-	-	0,4	29879	-	290	-

Продовження таблиці 5

Додатки

№	Речовина	Об'єм повітря $V_{\text{пов}}^0$, м ³ /кг	Об'єм продуктів згорання $V_{\text{пр}}^0$, м ³ /кг	Коефіцієнт повноти згорання η	Масова швидкість вигорання $V_{\text{пр}} \cdot 10^3$, кг/(м ² с)	Лінійна швидкість вигорання $V_{\text{пр}} \cdot 10^6$, м/с	Нормальна швид- кість поширення горіння $V_{\text{р}}$, м/с	Теплота згорання $Q_{\text{р}}^0$, кДж/кг	Температура горіння, К	Температура само- спалахування, °С	Мінімальна енергія запалювання $E_{\text{мін}}$, мДж
13	аміловий спирт C ₅ H ₁₂ O	9,10	10,0	0,93	17,5	21,6	-	38385	-	300	-
14	анлін C ₆ H ₇ N	8,90	9,34	0,93	-	-	-	32385	-	617	-
15	ацетон C ₃ H ₆ O	7,35	8,14	0,93	44	55,5	0,44	28890	-	535	0,41
16	бензол C ₆ H ₆	10,3	10,7	0,85	72	83	0,48	38520	2300	560	0,22
17	бутанон-2 C ₄ H ₈ O	8,14	8,92	0,93	66	-	0,58	34297	-	514	0,28
18	бутилацетат C ₆ H ₁₂ O ₂	7,35	8,14	0,93	52	-	0,4	28280	-	330	-
19	бутиловий спирт C ₄ H ₁₀ O	8,64	9,52	0,93	45,5	18	-	36805	-	340	0,28
20	гексан C ₆ H ₁₄	11,8	12,7	0,85	103	-	0,39	45105	-	233	0,25
21	гексиловий спирт C ₆ H ₁₄ O	8,0	8,92	0,93	43	-	-	39653	-	285	-
22	гліцерин C ₃ H ₈ O ₃	4,06	4,90	0,97	-	-	-	16102	-	400	-
23	діізопропіловий ефір C ₆ H ₁₄ O	9,42	10,3	0,93	87,3	95-115	-	36552	-	443	1,1
24	діетиловий ефір C ₄ H ₁₀ O	8,65	9,55	0,93	104	82	0,49	34147	-	180	0,2
25	етилацетат C ₄ H ₈ O ₂	6,06	6,83	0,93	55	22	-	23613	2213	446	0,28
26	етилбензол C ₈ H ₁₀	10,56	11,07	0,85	88	-	-	41386	1592	431	0,2 (100°С)

Додатки

Продовження таблиці 5

№	Речовина	Об'єм повітря $V_{\text{пов}}^0, \text{ м}^3/\text{кг}$	Об'єм продуктів згорання $V_{\text{пр}}^0, \text{ м}^3/\text{кг}$	Коефіцієнт повноти згорання η	Масова швидкість вигорання $V_{\text{пр}} \cdot 10^3, \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$	Лінійна швидкість вигорання $V_{\text{лр}} \cdot 10^6, \text{ м}/\text{с}$	Нормальна швидкість поширення горіння $V_{\text{нр}}, \text{ м}/\text{с}$	Теплота згорання $Q_{\text{пр}}, \text{ кДж}/\text{кг}$	Температура горіння, К	Температура само- спалахування, °С	Мінімальна енергія запалювання $E_{\text{зап}} \text{ мДж}$
27	етиленгліколь $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$	4,16	5,06	0,97	-			19319		412	-
28	етиловий спирт $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	6,95	7,91	0,93	33	33-42	0,56	27200	1800	400	0,25
29	ізопентан C_5H_{12}	11,9	12,8	0,86	105	167	0,37	45220		432	0,28
30	ізопропілбензол (кумол) C_9H_{12}	10,68	11,24	0,85	60	60-73		46663	1620	424	0,18
31	ізопропіловий спирт $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$	8,0	8,92	0,93	31,3	42-45	0,42	30145		430	0,65
32	ізопропілформіат $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	6,06	6,83	0,93	73			23465		440	
33	камфен $\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	10,98	11,66	0,85	-	67-77				275	
34	ксилол C_8H_{10}	10,56	11,07	0,85	29	33	0,4	41217	1557	490	0,53
35	метиловий спирт CH_4O	4,99	6,06	0,97	26	20	0,57	23839		440	0,14
36	метилформіат $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	9,52	11,52	0,97	60			19788	1691	456	0,4

Додатки

Продовження таблиці 5

№	Речовина	Об'єм повітря $V_{\text{пов}}^0$, м ³ /кг	Об'єм продуктів згорання V_0 , м ³ /кг	Коефіцієнт повноти згорання η	Масова швидкість вигорання $V_{\text{пр}} \cdot 10^{-3}$, кг/(м ² с)	Лінійна швидкість вигорання $V_{\text{л}} \cdot 10^{-6}$, м/с	Нормальна швидкість поширення горіння V_p , м/с	Теплота згорання $Q'_{\text{г}}$, кДж/кг	Температура горіння, К	Температура само-спалахування, °С	Мінімальна енергія запалювання $E_{\text{мін}}$, мДж
37	пентан C ₅ H ₁₂	11,9	12,8	0,86	90		0,39	45350		286	0,22
38	пінен C ₁₀ H ₁₆	10,98	11,66	0,85	50	57-73	0,63				0,26
39	сірковуглець CS ₂	4,2	4,2	0,97	36,8	28	0,59	184134	2400	102	0,01
40	стирол C ₈ H ₈	11,9	10,7	0,85			0,57	42623	1590	490	0,99
41	толуол C ₇ H ₈	10,5	11,9	0,85	63,0	60	0,39	40936	1635	535	0,26
42	хлорбензол C ₆ H ₅ Cl	6,63	7,03	0,93	45	28-47		27315	1530	637	
43	циклогексанол C ₆ H ₁₂ O	9,06	9,85	0,93	40	42-45		35114		300	0,77 (75 °С)
44	циклогексанон C ₆ H ₁₀ O	8,7	9,37	0,93	32	43-52	0,7 (100°С)	34074		420	1,3 (50 °С)
45	капролактам C ₆ H ₁₁ ON	7,76	8,54	0,91	26	24		31849		400	

Додатки

Продовження таблиці 5

№	Речовина	Витрата повітря, $V_{\text{пв}}^0$, м ³ /кг	Об'єм продуктів згорання, $V_{\text{пр}}^0$, м ³ /кг	Коефіцієнт повноти згорання, η	Масова швидк. вигорання $V_{\text{пр}}^0$, кг/(м ² с)	Лінійна швидкість вигорання $V_{\text{л}} \cdot 10^{-6}$, м/с	Теплота згорання: * - $Q_{\text{пр}}^0$, кДж/моль; ** - $Q_{\text{н}}^0$, кДж/кг	Температура горіння, К	Температура само спалахування, °С	Мінімальна енергія запалювання, $E_{\text{пал}} \cdot 10^{-3}$ мДж
46.	бензин	11,6	12,4	0,85	62,0	55-83	46928	1200	375	0,4
47.	бітум	9,45	10,4	0,93				-	390	-
48.	гас	11,4	12,3	0,85	48	60-67	42990	-	240	-
49.	дизельне паливо	11,5	12,0	0,85	35	55	43500	-	210-310	-
50.	нафта	11,8	11,9	0,85	22-28	25-33	43500-46000	1400	> 222	
51.	мазут	11,3	11,9	0,85	15,5	17	38100-41900	1000	250	
52.	паливо Т1	11,4	12,3	0,85	18,0		43040		220	0,18 (100 °С)
53.	скипидар	11,0	11,6	0,85					> 222	0,4 (50 °С)
54.	бавовна та вироби з неї	3,95	4,64	0,97	5	200-250	15700			25 (А3)
55.	волокно штапельне	3,95	4,64	0,97	7		13800			
56.	вугілля антрацит						31425		500	
57.	вугілля буре						8380-25140		410	
58.	гумотехнічні вироби	10,2	10,8	0,85	15		33500		> 350	50

Додатки

№	Речовина	Витрата повітря, $V_{\text{пр}}^0$, м ³ /кг	Об'єм продуктів згорання, $V_{\text{пр}}^0$, м ³ /кг	Коефіцієнт повноти згорання, η	Масова швидк. вигорання $V_{\text{пр}} \cdot 10^{-3}$, кг/(м ² с)	Лійна швидкість вигорання $V_{\text{л}} \cdot 10^{-6}$, м/с	Теплота згорання: * - $Q_{\text{пр}}$, кДж/моль; ** - $Q_{\text{л}}$, кДж/кг	Температура горіння, К	Температура само- спалахування, °С	Мінімальна енер- гія запалювання, $E_{\text{зап}} \cdot 10^{-3}$ мДж
59.	деревина вологістю 10 %	4,20	4,86	0,97	19		13800	1200	> 375	60
60.	- / - / - 20 %	3,74	4,42	0,97						
61.	- / - / - 30 %	3,54	3,99	0,97						
62.	деревина (мебл в житлових будинках, $R_{\text{пож}} 50$ кг/м ²)				14	16,6				
63.	деревина (штабель пиломатеріалів $R_{\text{пож}} 2000$ кг/м ²)				117		16600			
64.	калій				20	19,3				
65.	карболітові вироби				6		26900			
66.	каучук натуральний	10,0	10,8	0,85	18	14-17	42300		375	
67.	каучук синтетичний	10,2	10,82	0,85	12	7-10	40200		> 305	30
68.	кіноплівка нітроцелюлозна	3,62	4,32	0,97	5		150642	1500	> 120	
69.	кіноплівка триацетатна	4,34	4,97	0,97	9		18800			

Додатки

№	Речовина	Витрата повітря, $V_{\text{пр}}^0, \text{ м}^3/\text{кг}$	Об'єм продуктів згорання, $V_{\text{пр}}^0, \text{ м}^3/\text{кг}$	Коефіцієнт повноти згорання, η	Масова швидк. вигорання $V_{\text{пр}} \cdot 10^{-3}, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	Лінійна швидкість вигорання $V_{\text{л}} \cdot 10^{-6}, \text{ м}/\text{с}$	Теплота згорання: * - $Q_{\text{пр}}, \text{ кДж}/\text{моль}$; ** - $Q_{\text{л}}, \text{ кДж}/\text{кг}$	Температура горіння, К	Температура само- спалахування, °С	Мінімальна енер- гія запалювання, $E_{\text{зап}} \cdot 10^{-3}, \text{ мДж}$
70.	книги на стелажах	3,95	4,64	0,97	6 - 10		13400			
71.	натрій				12-15	12-15	10880	900	330	
72.	органічне скло				14		27737			
73.	папір	3,95	4,64	0,97	11		13400			
74.	полістирол	10,3	10,7	0,85	14		39000	1500	> 439	3,4
75.	поліпропілен у виробах	11,4	12,2	0,87	15		45600	1550	> 325	3,4
76.	поліетилен у виробах	11,4	12,2	0,85	10		47100	1950	> 349	6-30
77.	пінополіуретан	6,00	6,55	0,93	15	173-190	24300			20
78.	текстоліт				7-16-125		20900		> 491	
79.	торф вологістю 10 %	5,01	5,66	0,93	10,6		16613	1100	405	
80.	- / - / - 20 %	4,54	5,14	0,97			11300			
81.	- / - / - 30 %	3,96	4,62	0,97	4-5	17-33				
82.	фенопласти				6				> 325	

Додатки

Таблиця 6. Значення показників пожежної небезпеки деяких сумішей і технічних продуктів

№	Продукт (склад суміші), % мас.	Сумарна формула	Молярна маса, кг·кмоль ⁻¹	Температура спалаху, °С	Температура самоспалахування, °С	Константи Антуана			Темп. інтервал констант Антуана, °С	НКМПТ, % (об)	Теплота згорання, кДж·кг ⁻¹
						A	B	C _a			
1	бензин авіаційний Б-70	C _{7,267} H _{14,796}	102,2	-34	300	7,5442	2629,65	384,2	40 ÷ 100	0,79	44094
2	бензин А-72 (зимовий)	C _{6,991} H _{13,108}	97,2	-36	-	4,195	682,88	222,07	-60 ÷ 85	1,08	44239
3	бензин АИ-93 (літній)	C _{7,024} H _{13,71}	98,2	-36	-	4,1231	664,98	221,7	-60 ÷ 95	1,06	43641
4	бензин АИ-93 (зимовий)	C _{6,911} H _{12,168}	95,3	-37	-	4,2651	695,02	223,22	-60 ÷ 90	1,1	43641
5	дизельне паливо (зимове)	C _{12,343} H _{23,889}	172,3	> +35	+225	5,0782	1255,73	199,52	40 ÷ 210	0,61	43590
6	дизельне паливо (літнє)	C _{14,511} H _{29,120}	203,6	> +40	+210	5,0011	1314,04	192,47	60 ÷ 240	0,52	43419
7	гас освітлювальний КО-20	C _{13,595} H _{28,860}	191,7	> +40	+227	4,8218	1211,73	194,68	40 ÷ 240	0,55	43692
8	гас освітлювальний КО-22	C _{10,914} H _{21,832}	153,1	> +40	+245	5,596	1394,72	204,26	40 ÷ 190	0,64	43692
9	гас освітлювальний КО-25	C _{11,054} H _{21,752}	154,7	> +40	+236	5,125	1223,85	203,34	40 ÷ 190	0,66	43692
10	ксилол	C ₈ H ₁₀	106,2	+29	+490	6,1797	1478,16	220,54	0 ÷ 50	1,1	43154
11	уайт-спірит	C _{10,5} H _{21,0}	147,3	> +33	+250	7,1362	2218,3	273,15	20 ÷ 80	0,7	43996

Додатки

Продовження таблиці 6

№	Продукт (склад суміші), % мас.	Сумарна формула	Молярна маса, кг·кмоль ⁻¹	Температура спалаху, °С	Температура само- спалахування, °С	Константи Ангуана			Темп. інтервал констант Ангуана, °С	НКМШ, % (об)	Теплота згорання, кДж·кг ⁻¹
						A	B	C _a			
12	масло трансформаторне	C _{21,74} H _{42,28} S _{0,04}	303,9	>135	+270	6,8841	2524,17	174,01	164 ÷ 343	0,29	43111
13	масло АМТ-300	C _{22,25} H _{33,48} S _{0,34} N _{0,07}	312,9	>170	+290	6,1244	2240,0	167,85	170 ÷ 376	0,2	42257
14	масло АМТ-300Т	C _{19,04} H _{24,58} S _{0,196} N _{0,04}	260,3	> 189	+334	5,6202	2023,77	164,09	171 ÷ 396	0,2	41778
15	розчинник Р-4	C _{5,452} H _{7,606} O _{0,535}	81,7	-7	+550	6,2969	1373,67	242,83	-15 ÷ 100	1,65	40936
16	розчинник Р-4А	C _{6,231} H _{7,798} O _{0,223}	86,3	-4	-	6,2785	1415,2	244,75	-15 ÷ 100	1,38	43154
17	розчинник Р-5	C _{5,309} H _{8,655} O _{0,897}	86,8	-9	-	6,3034	1378,85	245,04	-15 ÷ 100	1,57	43154
18	розчинник Р-12	C _{6,837} H _{9,217} O _{0,515}	99,6	+10	-	6,173	1403,08	221,48	0 ÷ 100	1,26	43154
19	розчинник М	C _{2,761} H _{7,147} O _{1,187}	59,36	+6	+397	8,057	2083,57	267,74	0 ÷ 50	2,79	36743
20	розчинник РМЛ	C _{2,645} H _{6,810} O _{1,038}	55,24	+10	+374	8,6965	2487,73	290,92	0 ÷ 50	2,85	40936
21	розчинник РМЛ-218	C _{4,791} H _{8,318} O _{0,974}	81,51	+4	+399	7,2024	1761,04	251,55	0 ÷ 50	1,72	43154
22	розчинник РМЛ-315	C _{5,962} H _{9,779} O _{0,845}	94,99	+16	+367	6,8365	1699,69	241,0	0 ÷ 50	1,25	43154

Додатки

Таблиця 7. Об'ємні теплоти згоряння та мінімальні енергії запалювання газів і рідин

Речовина		Теплота згоряння, кДж·м ⁻³		Мінімальна енергія запалю- вання, мДж	Теплота утворення, ΔH_f^0 , кДж·моль ⁻¹	T _{сс} , °C
Назва	Формула	вища, Q'' _в	нижча, Q'' _н			
метан	CH ₄	39820	35880	0,28	-74,8	537
етан	C ₂ H ₆	70310	64360	0,24	-84,68	515
пропан	C ₃ H ₈	101210	93180	0,22	-103,8	470
н-бутан	C ₄ H ₁₀	133800	123570	0,25	-126,0	405
пентан	C ₅ H ₁₂	169270*	150630*	0,22	-146,4	286
н-гексан	C ₆ H ₁₄	187400*	187400*	0,25	-167,2	233
н-гептан	C ₇ H ₁₆	216880*	200550*	0,25	-187,7	223
циклогексан	C ₆ H ₁₂	153780*	164780*	0,22	-123,13	259
ізооктан	C ₈ H ₁₈	230998*	247498*	1,35	-217	411
водень	H ₂	12750	10790	0,017	0	510
сульфід гідрогену	H ₂ S	25350	23700	0,068	-21	246
сульфід карбону	CS ₂	40147*	-	0,009	88,7	102
окис карбону	CO	12640*	12640*	-	-110,5	605
етилен	C ₂ H ₄	55148*	58814*	0,12	52,3	435
етилцеллозольв	C ₄ H ₁₀ O ₂	99138*	108305*	0,15	-405,0	235
бензин АИ-92				0,3		435
уайт-спірит	C _{10,5} H ₂₁	-	-	0,33		250
п-ксилол	C ₈ H ₁₀	180627*	189793*	84,5	-24,4	528

* - пара за нормальних умов

Додатки

Таблиця 8. Теплота утворення та константи Антуана деяких рідин

Речовина	Формула	ΔH_f° кДж·моль ⁻¹	Константи Антуана		
			A	B	C _a
акрилова кислота	C ₃ H ₄ O ₂	-336	7,0931	1913	236,0
акролеїн	C ₃ H ₄ O	-58,5	6,190	1156,947	230,60
алловий спирт	C ₃ H ₆ O	-131,8	7,6594	1944,765	247,60
амілбензол	C ₁₁ H ₁₆	-34,4	6,6832	2069,486	210,43
амілметилкетон	C ₇ H ₁₄ O	-291	9,2537	3336,004	310,07
аміловий спирт	C ₅ H ₁₂ O	-302,5	6,307	1287,625	161,33
амілциклогексан	C ₁₁ H ₂₂	-233,8	6,33628	1808,242	213,89
анілін	C ₆ H ₇ N	109	6,04162	1457,02	176,19
ацетон	C ₃ H ₆ O	-217,57	6,3755	1281,721	237,09
ацетонітрил	C ₂ H ₃ N	-25,62	7,27	1838	273,00
бензилбензоат	C ₁₄ H ₁₂ O ₂	-372,84	9,2	4057	273,00
бензиловий спирт	C ₇ H ₈ O	-220,86	8,7223	2664,68	279,64
бензол	C ₆ H ₆	82,9	5,6139	902,275	178,10
бутаналь	C ₄ H ₈ O	-205	7,0839	1768,4	273,00
бутандіол-2,3	C ₄ H ₁₀ O ₂	-445,5	8,67	3024	273,00
бутанова кислота	C ₄ H ₈ O ₂	-486,3	7,4394	2158,56	233,66
бутанон	C ₄ H ₈ O	-238,3	6,1494	1292,79	232,34
ізобутилацетат	C ₆ H ₁₂ O ₂	-535,5	6,24133	1332,3	205,57
бутилбензол	C ₁₀ H ₁₄	-13,7	6,5495	1882,49	230,94
бутилметилкетон	C ₆ H ₁₂ O	-272	6,6317	1613,425	221,67

Додатки

Продовження таблиці 8

Речовина	Формула	ΔH_f° кДж·моль ⁻¹	Константи Антуана		
			A	B	C _a
бутанол	C ₄ H ₁₀ O	-274,6	8,7223	2664,68	279,64
бутилфенол	C ₁₀ H ₁₄ O	-285,12	6,4777	1928,57	207,18
бутилформіат	C ₅ H ₁₀ O ₂	-437,6	6,8194	1711,66	249,58
валеріанова кислота	C ₅ H ₁₀ O ₂	-490,4	8,0456	2661,49	256,17
валеріановий альдегід	C ₅ H ₁₀ O	-227,8	6,4554	1460,27	225,18
валеролактон	C ₅ H ₈ O ₂	-421,14	7,331	2540,4	273,00
гексадекан	C ₁₆ H ₃₄	-373,3	5,9124	1656,405	136,87
гексадієн	C ₆ H ₁₀	-94,1	6,132	1184,99	227,70
гексан	C ₆ H ₁₄	167,2	5,9951	1166,27	223,66
гексилметилкетон	C ₈ H ₁₆ O	-311,7	6,9090	1980,4	230,92
гексилловий спирт	C ₆ H ₁₄ O	-319,8	6,1789	1293,83	152,63
гептан	C ₇ H ₁₆	-187,7	6,0764	1295,405	219,82
декан	C ₁₀ H ₂₂	-249,6	6,5202	1809,975	227,70
діацетонівий спирт	C ₆ H ₁₂ O ₂	-425	7,216	2188	253,00
дибутиловий ефір	C ₈ H ₁₈ O	-333,9	6,4403	1648,4	230,00
діізопропілкетон	C ₇ H ₁₄ O	-291	7,1	2021,4	273,00
діоксан	C ₄ H ₈ O ₂	-434,16	6,989	1866,7	273,00
дипропіловий ефір	C ₆ H ₁₄ O	-293,4	6,240	1397,34	240,20
діетиламін	C ₄ H ₁₁ N	-137,34	7,22	1709	273,00
діетилєнґліколь	C ₄ H ₁₀ O ₃	-642,84	7,2767	2727,3	273,00

Додатки

Продовження таблиці 8

Речовина	Формула	ΔH_f° кДж·моль ⁻¹	Константи Антуана		
			A	B	C _a
діетилізопропілметан	C ₈ H ₁₈	-211,2	5,9885	1318,12	215,30
діетилкетон	C ₅ H ₁₀ O	-252	6,3555	1477,021	237,52
діетиловий ефір	C ₄ H ₁₀ O	-252,2	6,1228	1098,945	232,37
додекан	C ₁₂ H ₂₆	-290,9	7,2957	2463,739	253,88
ізопропенілбензол	C ₉ H ₁₀	-112,9	6,3696	1680,13	219,6
крезол	C ₇ H ₈ O	-158	6,6329	1856,356	199,07
ксилідин	C ₈ H ₁₁ N	-85,26	6,7578	2035,4	216,00
кумол	C ₉ H ₁₂	-21,5	6,0675	1461,643	207,56
мезитилен	C ₉ H ₁₂	-15,9	6,3584	1691,49	224,20
метиламінол	C ₆ H ₁₄ O	-344,2	7,5919	2174,869	257,78
метилацетат	C ₃ H ₆ O ₂	-409,1	6,1901	1157,63	219,73
метилбутират	C ₅ H ₁₀ O ₂	-485	6,2263	1338	214,34
метилгексан-2	C ₇ H ₁₆	-194,9	5,9981	1236,026	219,55
метанол	CH ₄ O	-201,3	7,352	1660,45	245,80
метилпентальдегід	C ₆ H ₁₂ O	-249,1	6,465	1519,1	223,65
метилпропіонат	C ₄ H ₈ O ₂	-438,8	6,74	1667	273,00
метилпропілкетон	C ₅ H ₁₀ O	-258,6	6,9891	1870,4	273,20
метилформіат	C ₂ H ₄ O ₂	-349,8	6,4589	1206,148	239,02
метилциклогексан	C ₇ H ₁₄	-154,7	5,9518	1272,864	221,63
метилциклопентан	C ₆ H ₁₂	-106,6	5,9877	1186,059	226,04

Додатки

Продовження таблиці 8

Речовина	Формула	ΔH_f° кДж·моль ⁻¹	Константи Антуана		
			A	B	C _a
метоксиетилацетат	C ₅ H ₁₀ O ₃	-573,6	6,2500	1447,037	196,10
мурашина кислота	CH ₂ O ₂	-210,6	4,9927	765,889	154,55
м-ксилол	C ₈ H ₁₀	17,25	6,588	1906,8	234,9
нонан	C ₉ H ₂₀	-229	6,1777	1510,695	211,50
ноніловий спирт	C ₉ H ₂₀ O	-387	5,8006	1276,626	123,10
октан	C ₈ H ₁₈	-208	6,0939	1379,556	211,89
октаналь	C ₈ H ₁₆ O	-643,96	6,7024	1815,764	218,61
октанова кислота	C ₈ H ₁₆ O ₂	-565,3	5,2690	1014,81	72,77
октиловий спирт	C ₈ H ₁₈ O	-357	5,7209	1170	120,00
октилциклогексан	C ₁₄ H ₂₈	-295,6	6,6848	2213,668	209,50
пентан	C ₅ H ₁₂	-146,4	5,9720	1062,555	231,81
пентанол-2	C ₅ H ₁₂ O	-314,13	6,3504	1254,854	169,60
піридин	C ₅ H ₅ N	140,6	6,007	1281,3	205,00
прол	C ₄ H ₅ N	63	6,4196	1501,563	210,40
пропаналь	C ₃ H ₆ O	-221,7	6,0657	1163,288	231,17
пропіламін	C ₃ H ₉ N	-101,5	6,3854	1243,947	235,88
пропілбензол	C ₉ H ₁₂	-7,9	6,2971	1627,827	220,49
пропілбутират	C ₇ H ₁₄ O ₂	-556,8	6,6514	1756,37	234,96
пропіленгліколь	C ₃ H ₈ O ₂	-499,9	8,640	3039	273,00
пропанол	C ₃ H ₈ O	-257,7	7,4420	1751,981	225,13

Додатки

Продовження таблиці 8

Речовина	Формула	ΔH_f° кДж·моль ⁻¹	Константи Антуана		
			A	B	C _a
пропілформіат	C ₄ H ₈ O ₂	-417	5,9724	1126,539	203,46
пропілциклогексан	C ₉ H ₁₈	-193,3	6,0135	1461,715	207,99
пропілциклопентан	C ₈ H ₁₆	-148	6,0796	1438,79	222,23
пропілетилкетон	C ₆ H ₁₂ O	-272	6,4469	1538,995	222,58
пропіонова кислота	C ₃ H ₆ O ₂	-466	7,839	2410	273,00
пропіоновий ангідрид	C ₆ H ₁₀ O ₃	-289	4,944	810,31	108,74
стирол	C ₈ H ₈	155,6	7,0654	2123,057	272,99
тетрагідрофуран	C ₄ H ₈ O	-214	6,1200	1202,29	226,25
тетраметилбензол	C ₁₀ H ₁₄	-41,9	6,2418	1693,156	195,23
тетраметилгептан	C ₁₁ H ₂₄	-276,2	6,2872	1715,271	216,61
тетраметилпентан	C ₉ H ₂₀	-273,2	5,9536	1397,483	213,70
толуол	C ₇ H ₈	50,17	6,050	1328,171	217,71
тридекан	C ₁₃ H ₂₈	-311,5	7,0938	2468,91	250,31
триметилбензол	C ₉ H ₁₂	-15,9	6,4429	1791,164	227,84
триметилгексан	C ₉ H ₂₀	-254	5,9602	1324,049	210,74
оцтова кислота	C ₂ H ₄ O ₂	-437,3	7,1033	1906,53	255,97
оцтовий ангідрид	C ₄ H ₆ O ₃	-328	6,274	1444,718	199,82
ундеканол	C ₁₁ H ₂₄ O	-422,5	5,6520	1250	100,00
фенілетилловий ефір	C ₈ H ₁₀ O	-84	6,5277	1808,8	230,00
хлорбензол	C ₆ H ₅ Cl	51,4	6,3861	1607,316	235,351

Додатки

Закінчення таблиці 8

Речовина	Формула	ΔH_f° кДж·моль ⁻¹	Константи Антуана		
			A	B	C _a
цимол	C ₁₀ H ₁₄	28,8	6,6498	1893,381	232,66
етилацетат	C ₄ H ₈ O ₂	-442,9	6,2267	1244,95	217,88
етилбензол	C ₈ H ₁₀	29,9	6,3587	1590,66	229,58
етиленгліколь	C ₂ H ₆ O ₂	-453,8	8,1375	2753,183	252,00
етилтолуол	C ₉ H ₁₂	-1,6	6,4147	1732,11	228,10
етилформіат	C ₃ H ₆ O ₂	-371,2	6,1339	1123,943	218,25
етилциклогексан	C ₈ H ₁₆	-171,7	5,9953	1384,036	215,13

Додатки

Таблиця 9. Залежність тиску насиченої пари від температури

Речовина	Формула	Температура °С, за тиску, кПа					
		0,133	1,333	5,333	13,33	53,33	101,3
акрилова кислота	$C_3H_4O_2$	3,5	39,0	66,2	86,1	122,0	141,0
акролеїн	C_3H_4O	-64,5	-36,7	-15,0	2,5	34,5	52,5
алловий спирт	C_3H_6O	-20,0	10,5	33,4	50,0	80,2	96,6
амілбензол	$C_{11}H_{16}$	40,7	80,6	140,0	149,9	199,6	205,4
амілметилкетон	$C_7H_{14}O$	19,3	55,5	81,2	100,0	133,2	150,2
аміловий спирт	$C_5H_{12}O$	13,6	44,9	68,0	85,8	119,8	137,8
амілциклогексан	$C_{11}H_{22}$	34,9	75,3	82,4	131,1	140,2	202,8
анілін	C_6H_7N	31,0	68,2	96,9	119,4	160,9	184,0
ацетон	C_3H_6O	-59,4	-31,1	-9,4	7,7	39,5	56,5
ацетонітрил	C_2H_3N	-47,0	-16,3	7,0	25,8	61,0	80,0
бензилбензоат	$C_{14}H_{12}O_2$	135,6	188,0	227,6	258,0	313,5	343,0
бензиловий спирт	C_7H_8O	50,5	89,2	106,5	141,2	183,0	205,1
бензол	C_6H_6	-45,0	-11,6	7,5	26,1	60,6	80,1
бутаналь	C_4H_8O	-50,8	-18,9	5,2	23,8	57,1	75,2
бутандіол-2,3	$C_4H_{10}O_2$	22,2	85,3	117,4	141,2	183,8	206,5
бутанова кислота	$C_4H_8O_2$	25,5	61,5	88,0	108,0	144,0	163,5
бутанон	C_4H_8O	-48,3	-17,7	6,0	25,0	60,0	79,6
ізобутилацетат	$C_6H_{12}O_2$	-21,2	12,8	39,2	59,7	97,5	118,0
бутилбензол	$C_{10}H_{14}$	24,6	62,4	91,9	115,3	158,8	183,3

Додатки

Продовження таблиці 9

Речовина	Формула	Температура °С, за тиску, кПа					
		0,133	1,333	5,333	13,33	53,33	101,3
бутилметилкетон	$C_6H_{12}O$	7,7	38,8	62,0	79,8	111,0	127,5
бутанол	$C_4H_{10}O$	-1,2	30,2	53,4	70,1	100,8	117,5
бутилфенол	$C_{10}H_{14}O$	64,6	106,5	125,0	163,5	195,7	235,0
бутилформіат	$C_5H_{10}O_2$	-26,4	6,1	31,6	51,0	86,2	106,0
валеріанова кислота	$C_5H_{10}O_2$	42,2	79,8	107,8	128,3	165,0	184,4
валеріановий альдегід	$C_5H_{10}O$	-12,0	17,9	39,8	56,8	86,8	103,3
валеролактон	$C_5H_8O_2$	37,5	79,8	101,9	136,5	182,3	207,5
гексадекан	$C_{16}H_{34}$	105,0	149,0	182,8	209,5	259,0	286,8
гексадієн	C_6H_{10}	-47,1	-17,7	4,2	23,4	67,2	76,0
гексан	C_6H_{14}	-54,0	-25,0	-2,3	15,8	49,6	68,7
гексилметилкетон	$C_8H_{16}O$	23,6	60,9	89,8	111,7	151,0	172,9
гексилловий спирт	$C_6H_{14}O$	24,4	58,2	83,7	102,8	138,0	157,0
гептан	C_7H_{14}	-33,0	-2,0	22,4	41,8	78,0	98,4
декан	$C_{10}H_{22}$	21,0	57,7	86,0	108,6	150,5	174,1
діацетоновий спирт	$C_6H_{12}O_2$	22,0	58,0	86,7	108,2	147,5	167,9
дибутиловий ефір	$C_8H_{18}O$	-43,8	-11,7	13,3	33,0	69,4	89,8
діізопропілкетон	$C_7H_{14}O$	5,2	36,7	59,6	77,0	108,0	123,7
діоксан	$C_4H_8O_2$	-35,8	-1,2	25,2	45,1	81,8	101,1
дипропіловий ефір	$C_6H_{14}O$	-43,3	-11,8	13,2	33,0	69,5	89,5

Додатки

Продовження таблиці 9

Речовина	Формула	Температура °С, за тиску, кПа					
		0,133	1,333	5,333	13,33	53,33	101,3
діетиламін	$C_4H_{11}N$	-38,9	-33,0	-11,3	6,0	38,0	55,5
діетиленгліколь	$C_4H_{10}O_3$	91,8	133,8	164,3	187,5	226,5	244,8
діетилізопропілметан	C_8H_{18}	23,3	26,0	35,2	55,7	94,0	115,6
діетилкетон	$C_5H_{10}O$	-12,7	17,2	39,4	56,2	86,3	102,7
діетиловий ефір	$C_4H_{10}O$	-74,3	-48,0	-27,7	-11,5	18,9	34,6
додекан	$C_{12}H_{26}$	52,0	91,6	122,0	146,1	191,0	216,3
ізопропенілбензол	C_9H_{10}	11,6	48,5	70,6	99,6	143,9	165,4
крезол	C_7H_8O	46,9	85,7	103,0	137,7	179,0	201,9
ксилідин	$C_8H_{11}N$	50,7	90,9	109,1	145,5	188,0	214,0
кумол	C_9H_{12}	2,8	38,3	66,1	88,1	129,2	152,4
мезитилен	C_9H_{12}	12,3	48,8	77,2	99,7	141,4	164,7
метиламінол	$C_6H_{14}O$	15,4	49,6	74,7	94,2	129,8	147,9
метилацетат	$C_3H_6O_2$	-57,2	-29,3	-7,9	9,4	40,0	57,8
метилбутират	$C_5H_{10}O_2$	-26,8	5,0	29,6	48,0	83,1	102,3
метилгексан-2	C_7H_{16}	-39,7	-9,1	14,9	34,1	69,8	90,1
метанол	CH_4O	-44,0	-16,2	5,0	21,2	49,9	64,7
метилпентальдегід	$C_6H_{12}O$	-16,7	16,0	41,1	60,8	97,0	117,0
метилпропіонат	$C_4H_8O_2$	-42,0	-11,8	11,0	29,0	61,8	79,8
метилпропілкетон	$C_5H_{10}O$	-12,0	17,9	39,8	56,8	86,8	103,3

Додатки

Продовження таблиці 9

Речовина	Формула	Температура °С, за тиску, кПа					
		0,133	1,333	5,333	13,33	53,33	101,3
метилформіат	$C_2H_4O_2$	-74,2	-48,6	-28,7	-12,9	16,0	32,0
метилциклогексан	C_7H_{14}	-35,2	3,2	22,0	42,1	79,6	100,9
метилциклопентан	C_6H_{12}	-53,2	-23,7	-0,6	17,9	52,3	71,8
метоксиетилацетат	$C_5H_{10}O_3$	7,0	40,1	65,9	86,2	123,8	144,8
мурашина кислота	CH_2O_2	-20,0	2,1	24,0	43,8	80,3	100,6
м-ксилол	C_8H_{10}	-7,2	28,2	55,3	76,8	116,7	139,1
нонан	C_9H_{20}	4,0	39,1	66,3	87,9	128,1	150,8
ноніловий спирт	$C_9H_{20}O$	59,5	99,7	129,0	151,3	192,1	213,5
октан	C_8H_{18}	-14,0	19,2	45,1	65,7	104,0	125,7
октаналь	$C_8H_{16}O$	73,4	101,2	120,0	133,9	156,5	168,5
октанова кислота	$C_8H_{16}O_2$	92,3	124,0	150,6	172,2	218,9	237,5
октиловий спирт	$C_8H_{18}O$	54,0	88,3	115,2	135,2	173,8	195,2
октилциклогексан	$C_{14}H_{28}$	77,0	122,0	142,8	184,3	220,5	264,0
пентан	C_5H_{12}	-76,0	-50,1	-29,3	-12,6	18,5	36,1
пентанол-2	$C_5H_{12}O$	1,5	32,2	54,1	70,7	102,3	119,7
піридин	C_5H_5N	-18,9	13,2	38,0	57,8	95,6	115,2
пірол	C_4H_5N	-19,5	15,0	41,8	63,6	104,2	129,7
пропаналь	C_3H_6O	-63,6	-35,4	-13,3	4,3	36,9	55,4

Додатки

Продовження таблиці 9

Речовина	Формула	Температура °С, за тиску, кПа					
		0,133	1,333	5,333	13,33	53,33	101,3
пропіламін	C_3H_9N	-64,4	-37,2	-16,0	0,5	31,5	48,5
пропілбензол	C_9H_{12}	7,4	43,4	71,6	94,0	135,7	159,2
пропілбутират	$C_7H_{14}O_2$	-1,6	34,0	61,5	82,6	121,7	142,7
пропіленгліколь	$C_3H_8O_2$	45,5	83,2	111,2	132,0	168,0	188,2
пропанол	C_3H_8O	-15,0	14,7	36,4	52,8	82,0	97,8
пропілформіат	$C_4H_8O_2$	-43,0	-12,6	10,8	29,5	62,6	81,3
пропілциклогексан	C_9H_{18}	4,2	40,2	68,5	91,0	133,0	156,7
пропілциклопентан	C_8H_{16}	-12,6	21,3	47,9	69,1	108,6	130,9
пропілетилкетон	$C_6H_{12}O$	-12,4	20,9	46,5	66,6	103,5	124,0
пропіонова кислота	$C_3H_6O_2$	4,6	39,7	65,8	85,1	122,0	141,1
пропіоновий ангідрид	$C_6H_{10}O_3$	20,6	57,7	85,6	107,2	146,0	167,0
стирол	C_8H_8	-1,6	32,8	60,6	82,5	122,7	145,2
тетрагідрофуран	C_4H_8O	-54,4	-25,7	-3,3	14,4	47,4	66,0
тетраметилбензол	$C_{10}H_{14}$	34,8	74,5	106,2	129,2	173,0	198,1
тетраметилгептан	$C_{11}H_{24}$	37,0	75,1	104,6	127,9	171,4	195,9
тетраметилпентан	C_9H_{20}	-13,0	20,8	48,0	69,6	110,1	133,0
толуол	C_7H_8	-26,1	6,4	31,8	51,9	89,5	110,6
тридекан	$C_{13}H_{28}$	67,0	107,1	138,4	163,3	209,5	235,4
триметилбензол	C_9H_{12}	19,3	56,8	86,0	109,1	152,0	176,1

Додатки

Закінчення таблиці 9

Речовина	Формула	Температура °С, за тиску, кПа					
		0,133	1,333	5,333	13,33	53,33	101,3
триметилгексан	C_9H_{20}	-17,0	16,2	42,3	63,1	102,0	124,1
оцтова кислота	$C_2H_4O_2$	-17,2	17,1	42,4	62,2	98,1	117,9
оцтовий ангідрид	$C_4H_6O_3$	2,4	31,2	60,6	80,7	117,9	138,6
ундеканол	$C_{11}H_{24}O$	71,1	112,8	143,7	167,2	209,8	232,0
фенілетиловий ефір	$C_8H_{10}O$	18,1	56,4	86,6	108,4	149,8	172,0
цимол	$C_{10}H_{14}$	17,3	56,8	87,1	110,9	154,3	178,3
етилацетат	$C_4H_8O_2$	-43,4	-13,5	9,1	27,0	59,3	77,1
етилбензол	C_8H_{10}	-9,2	25,9	52,8	74,1	113,8	136,2
етиленгліколь	$C_2H_6O_2$	53,0	92,1	120,0	141,8	178,5	197,8
етилтолуол	C_9H_{12}	11,9	48,5	77,0	99,6	141,6	165,1
етилформіат	$C_3H_6O_2$	-60,5	-33,0	-11,5	5,4	37,1	54,3
етилциклогексан	C_8H_{16}	-13,7	20,6	47,6	69,0	109,1	131,8

Додатки

Таблиця 10. Лінійна швидкість поширення полум'я під час пожежі на різних об'єктах

№	Вид об'єкта	Лінійна швидкість, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot 10^{-2}$
1	Адміністративні будівлі	1,7-2,5
2	Бібліотеки, книгосховища, архіви	0,83-1,7
3	Деревообробні підприємства: лісопилльні цехи (будівлі I, II, III ступеня вогнестійкості) те ж, будівлі IV і V ступеня вогнестійкості сушарки заготівельні цехи виробництво фанери приміщення інших цехів	1,7-5,0 3,3-8,3 3,3-4,2 1,7-2,5 1,3-2,5 1,3-1,7
4	Житлові будинки	0,83-1,3
5	Коридори, галереї	6,7-8,3
6	Кабельні споруди (горіння кабелів)	1,3-1,8
7	Лісові масиви (шв. вітру $7-10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, вологість 40 %) сосна сфагнова ялина сосна - волога підстилка сосновий бор – суха підстилка	до 2,3 $\geq 7,0$ $\geq 23,7$ $\geq 30,0$
8	Рослинність, лісова підстилка, підріст, деревостій під час верхових пожеж за швидкості вітру $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$: 8-9 10-12 Те ж саме, по кромці на флангах і в тилу за швидкості вітру, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$: 8-9 10-12	≥ 70 ≥ 138 6,7-11,7 13,3-23,3
9	Музеї і виставки	1,7-2,5
10	Об'єкти транспорту: гаражі, трамвайні і тролейбусні депо ремонтні зали ангарів	0,83 1,7

Додатки

Продовження таблиці 10

№	Вид об'єкта	Лінійна швидкість, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot 10^{-2}$
11	Морські і річкові судна: горюча надбудова під час внутрішньої пожежі те ж саме, під час зовнішньої пожежі внутрішні пожежі за наявності синтетичного оздоблення і відкритих прорізів	2-4,5 3,3-10,0 1,7-3,3
12	Пінополіуретан	1,2-1,5
13	Підприємства текстильної промисловості: приміщення текстильного виробництва те саме, з наявністю на конструкціях шару пилу волокнисті матеріали у розпушеному стані	0,83-1,7 1,7-3,3 12-13
14	Горючі покрівлі цехів великої площі	2,8-5,3
15	Горючі конструкції дахів і горищ	2,5-3,3
16	Склади: торф у штабелях льоноволокна текстильних виробів паперу в рулонах гумотехнічних виробів у приміщеннях гумотехнічних виробів (штабелі на відкритих площадках) каучуку лісопиломатеріалів: круглого лісу у штабелях пиломатеріалів в штабелях вологістю, %: до 16 16-18 18-20 20-30 більше за 30 кучі балансової деревини вологістю, %: до 40 більше 40	1,3-1,7 5,0-9,3 0,5-0,67 0,33-0,5 0,67-1,7 1,7-2 1,0-1,7 0,67-1,7 11,2 3,8 2,6 2 1,7 1,0-1,7 0,25-0,33

Додатки

Закінчення таблиці 10

№	Вид об'єкта	Лінійна швидкість, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot 10^2$
17	Сушильні відділення шкірзаводів	2,5-3,7
18	Сільські населені пункти: житлова зона щільної забудови будівлями V ступеня вогнестійкості, за сухої погоди і сильного вітру солом'яні дахи будівель підстилка приміщень тваринництва	33-42 3,3-6,7 2,5-6,7
19	Театри і будинки культури (сцени)	1,7-5,0
20	Торговельні підприємства, склади і бази товаро-матеріальних цінностей	0,83-2
21	Типографії	0,83-1,3
22	Фрезерний торф на місці видобування за швидкості вітру, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$: 18-20	10-14 13,3-17 30-33
23	Холодильники	0,83-1,2
24	Школи, лікарняні заклади: будівлі I - II ступеня вогнестійкості будівлі II - IV ступеня вогнестійкості	1,0-1,7 3,3-5,0
25	Степові пожежі: високий, густий трав'яний покрив, зернові культури за сухої погоди і сильного вітру Степові пожежі, низька, рідка рослинність, тиха погода	600-800 25-30

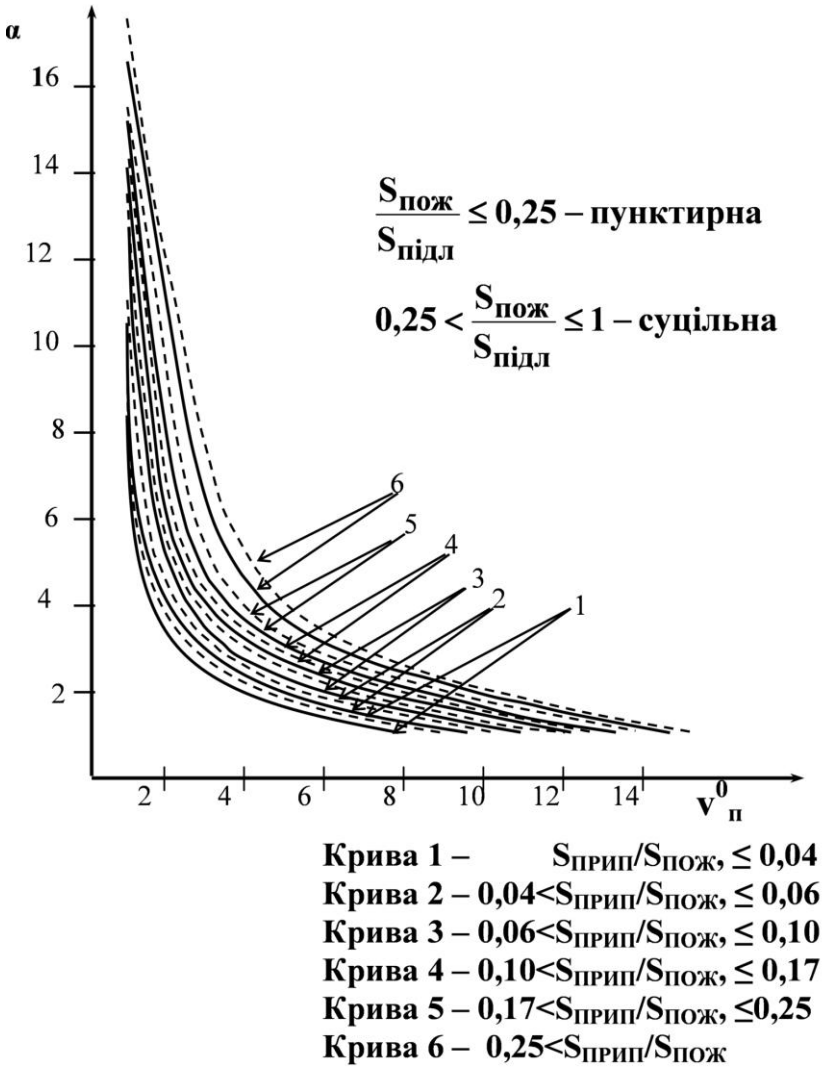
Додатки

Таблиця 11. Нормативна інтенсивність подавання води на гасіння пожежі деяких речовин і матеріалів

№	Матеріал, що горить	Нормативна інтенсивність подавання води, $\text{л} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$
1	Деревина балансова вологістю 40 – 50 %	0,20
2	Деревина балансова вологістю <40 %	0,50
3	Пиломатеріали у штабелях вологістю 8-14 %	0,45
4	- / - 20-30 %	0,30
5	> 30 %	0,20
6	круглий в штабелях вологістю 30 – 50 %	0,35
7	тріска деревини вологістю 30 – 50 %	0,10
8	Гума і гумотехнічні вироби	0,30
9	Пластмаси термопластичні	0,14
10	Пластмаси реактопласти	0,10
11	Пластмаси у виробках	0,20
12	Льонокостра	0,20
13	Льонотреста	0,25
14	Бавовна, відкриті склади	0,20
15	Бавовна, закриті склади	0,30
16	Папір	0,30
17	Торф фрезерний вологістю 15 – 30 %	0,10
18	Торф фрезерний у штабелях	0,20
19	Отрутохімікати	0,20
20	Ацетон	0,40
21	Нафтопродукти $t_{сп} < 28^{\circ}\text{C}$	0,40
22	$t_{сп} 28 – 60^{\circ}\text{C}$	0,30
23	$> 60^{\circ}\text{C}$	0,20
24	Нафта і конденсат навколо свердловини	0,20
25	Спирти	0,40

Додатки

Номограма 122. Визначення коефіцієнта надлишку повітря

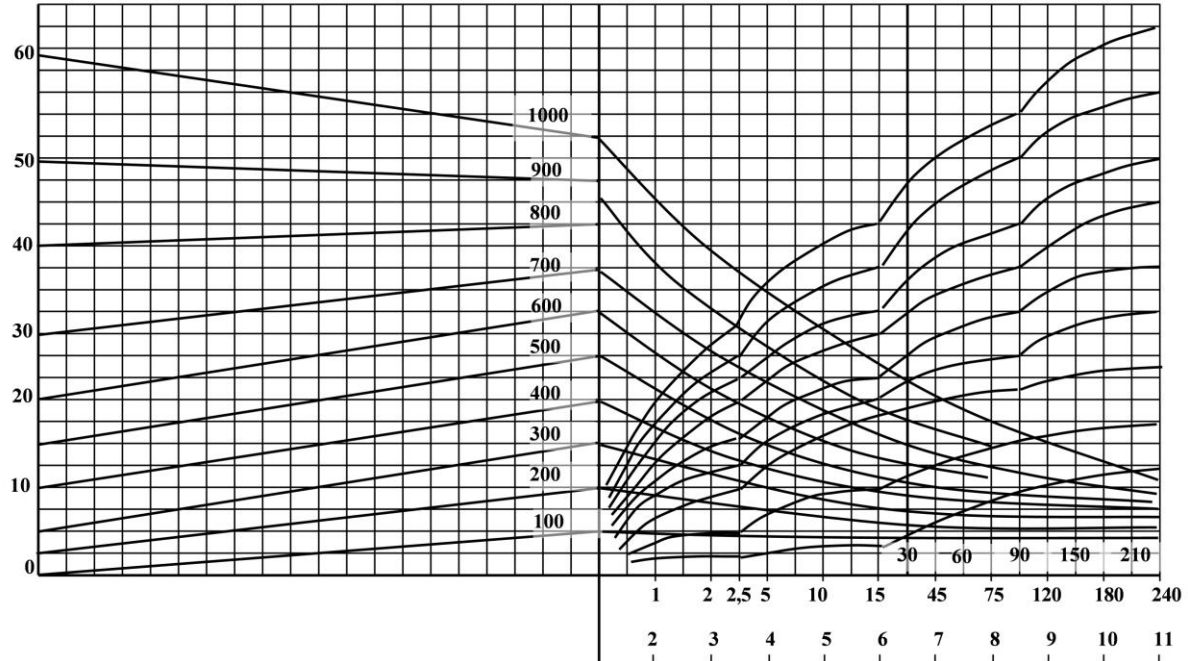


Додатки

Номограма 133. Визначення температури пожежі

$q, \text{кВт}\cdot\text{м}^{-2}$

$t, ^\circ\text{C}$



Терміни та визначення

В'язкість піни – здатність піни розтікатися по поверхні речовини.

Верхня концентраційна межа поширення полум'я (ВКМПП) – найбільша концентрація горючої речовини в суміші з повітрям, за якої ще можливе виникнення та поширення горіння.

Викид – миттєвий перехід у пару води, яка знаходиться у придонному шарі нафтопродукту, і пов'язане із цим виштовхування із резервуара палаючої рідини на значну відстань.

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, об. частка.

Вогнегасні речовини – такі речовини, які можуть безпосередньо впливати на процес горіння і створювати умови для його припинення, або попереджати процес виникнення горіння.

Газообмін – це конвекційний рух газових потоків, що виникає під дією сил, зумовлених градієнтом тиску.

Динамічна рівновага – стан системи, за якого кількість рідини, що випаровується, дорівнює кількості сконденсованої пари. Відбувається насичення газової

Терміни та визначення

фази, а пара, що утворюється при динамічній рівновазі в системі, називається **насиченою парою**. Якщо рідина знаходиться в незакритому об'ємі, то частина пари весь час дифундує в навколишній простір. При цьому кількість речовини, що випарувалася, буде більшою, ніж кількість сконденсованої речовини. Динамічна рівновага не встановлюється, пара є **ненасиченою**, а випаровування буде тривати, доки вся рідина не випарується.

Дисперсність піни – величина, обернена до середнього діаметра пухирців піни.

Горючі рідини (ГР) - рідини з температурою спалаху в закритому тиглі більше за 61 °С. Горючі рідини спалахують від джерела запалювання тільки за підвищеної температури. Рідини із температурою спалаху в закритому тиглі 61 °С і нижче відносять до класу *легкозаймистих рідин (ЛЗР)*. Легкозаймісті рідини з температурою спалаху 28 °С і нижче відносять до *особливо небезпечних рідин*.

Загальна витрата – кількість вогнегасної речовини, що було витрачено під час гасіння пожежі на одиницю розрахункового параметра пожежі.

Загальна кількість вогнегасної речовини – кількість вогнегасного засобу, що подається за час гасіння пожежі на загальну площу пожежі або в об'єм приміщення.

Загальні явища на пожежі – явища, що є постійними й обов'язковими для кожної пожежі.

Засіб пожежогасіння – речовини або пристрої, які використовуються для припинення горіння на пожежі.

Терміни та визначення

Зона горіння – це частина простору, в якій відбуваються процеси термічної підготовки горючих речовин (розкладання, плавлення, випаровування) і безпосередньо процес горіння. Зона горіння обмежена поверхнею речовин, що горять, і фронтом полум'я дифузійного факела.

Зона задимлення – частина простору, що прилягає до зони горіння, в якій не можливе перебування людей без захисту органів дихання. Зовнішню межу зони задимлення визначають за видимістю, концентрацією отруйних речовин (небезпечна для життя і здоров'я людини) або за концентрацією кисню у повітрі (менше 16 %).

Зона теплового впливу – це частина простору, що прилягає до зони горіння і в межах якої відбуваються процеси теплообміну між поверхнею зони горіння і навколишніми конструкціями та речовинами. Зовнішня межа зони теплового впливу пролягає там, де тепловий вплив викликає помітні зміни у стані матеріалів і конструкцій, або створюються умови, які перешкоджають роботі особового складу з гасіння пожежі.

Ізолююча здатність – здатність піни перешкоджати випаровуванню горючої рідини. Чисельно ізолююча здатність виражається часом, протягом якого пара рідини проходить через певний шар піни й утворює над цим шаром пароповітряну суміш, що запалюється від джерела запалювання.

Інтенсивність газообміну – кількість повітря, що припливає за одиницю часу до одиниці площі пожежі.

Терміни та визначення

Інтенсивність задимлення – зміна об'єму диму за одиницю часу в одиниці об'єму приміщення.

Інтенсивність подавання – кількість вогнегасного засобу, що подається в одиницю часу на одиницю розрахункового параметра пожежі (фронту, площі пожежі або об'єму приміщення, в якому відбувається пожежа).

Кратність піни – відношення об'єму піни до об'єму рідини, з якої її отримано.

Критичний час розвитку пожежі – для перебування людей у приміщенні визначається досягненням критичної температури 70 °С (*критичний час розвитку пожежі за температурою*) або зниженням концентрації кисню в повітрі приміщення до критичного значення 14 % (*критичний час розвитку пожежі за концентрацією кисню*).

Лінійна швидкість вигорання – висота шару рідини, що вигоряє за одиницю часу.

Лінійна швидкість поширення пожежі – відстань, яку проходить фронт пожежі за одиницю часу.

Масова швидкість вигорання – кількість речовини, що вигоряє за одиницю часу з одиниці площі пожежі.

Насичена пара – пара, що утворюється при динамічній рівновазі в системі, за якої кількість рідини, що випаровується, дорівнює кількості сконденсованої пари.

Нейтральною зоною називають уявну площину у приміщенні, рівнобіжну підлозі, у точках якої тиск продуктів горіння дорівнює тиску зовнішнього повітря.

Терміни та визначення

Нижня концентраційна межа поширення полум'я (НКМПП) – найменша концентрація горючої речовини в суміші з повітрям, за якої *вже* можливе виникнення та поширення горіння.

Небезпечні фактори пожежі – первинні та другорядні явища пожежі, що спричиняють травмування, отруєння або загибель людей, а також знищення або пошкодження матеріальних цінностей.

Період вільного розвитку пожежі триває з моменту виникнення пожежі до моменту введення перших сил та засобів для її гасіння. За цей час 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. За цей час площа пожежі ще зростає, але з меншою швидкістю за рахунок впливу вогнегасних речовин.

Питома витрата – кількість вогнегасного засобу, що витрачається в одиницю часу на гасіння розрахункового параметра пожежі.

Піна – це грубодисперсна колоїдна система, що містить в якості дисперсної фази газ, а в якості дисперсійного середовища – рідку фазу (пухирці газу, оточені плівками рідини).

Площа пожежі – площа проекції зони горіння на горизонтальну або вертикальну площину.

Терміни та визначення

Пожежа – це позарегламентний процес знищування або пошкодження вогнем майна, під час якого виникають чинники, небезпечні для живих істот і довкілля.

Пожежна навантага – питома кількість теплоти, що може виділитися у приміщенні під час пожежі з одиниці площі підлоги приміщення або певної ділянки.

Спінювання – перехід у пару значної кількості дрібних краплин води, що знаходяться у вигляді емульсії у нафтопродукті, й пов'язана з цим поява на поверхні рідини піни, що горить, яка може переливатися через борт резервуара, поширюючи горіння на сусідні ділянки.

Спосіб пожежогасіння – тактичний прийом, що використовується для припинення горіння.

Стійкість піни – здатність піни зберігати свої первинні властивості; характеризується часом напіврозпаду піни, протягом якого з піни виділиться половина маси рідини.

Температура займання – 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.

Температура погасання – температура, нижче якої 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

Терміни та визначення

температуру горіння речовини.

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 в концентрації, що відповідає нижній або верхній концентраційній межі поширення полум'я.

Теплота пожежі – кількість тепла, що під час пожежі виділяється в зоні горіння за одиницю часу.

Тривалість пожежі – час із моменту виникнення пожежі до повного припинення горіння.

Флегматизація – запобігання утворенню горючого середовища в газовому просторі за допомогою газів-розріджувачів.

Флегматизуюча концентрація – найменша концентрація негорючого газу в суміші горючої речовини й окисника, за якої суміш стає нездатною до горіння за будь-якого співвідношення горючої речовини й окисника.

Фронт пожежі – частка периметра, на якій поширення пожежі відбувається найбільш інтенсивно.

Час гасіння – час від початку подавання вогнегасної речовини до припинення горіння.

Предметний покажчик
Предметний покажчик

В

вибух

- надлишковий тиск, 225
- радіус зони ураження, 226
- тротиловий еквівалент, 225

викид, 240

випаровування

- інтенсивність, 60
- теплота, 92

вогнева сфера, 227

вогнегасна

- речовина
- ефективність, 339*

вогнегасна речовина, 338

Г

газообмін, 185

гомотермічний шар, 239

Д

динамічна рівновага, 60

З

зона загазованості

- для резервуарів, 222
- на відкритому просторі, 224
- у приміщенні, 245

І

інтенсивність

- випаровування
- на відкритому просторі, 223*
- у приміщенні, 243*
- подавання вогнегасного засобу, 388

К

коефіцієнт поверхні горіння, 165

концентраційні межі поширення полум'я

- аерозолі, 44
- безпечні, 7
- паро-газоповітряної суміші, 6
- суміші газів, 29

концентрація

- безпечна кисню, 348
- вогнегасна, 350
- мінімальна вибухонебезпечна кисню, 347
- насиченої пари, 64
- флегматизуюча, 31, 346

Н

нейтральна зона, 187

П

пара

- насичена, 60
- ненасичена, 60
- тиск, 65

піна

- ізолююча здатність, 401
- піна вогнегасна, 398**
- дисперсність, 401
- кратність, 400
- стійкість, 401

піноутворювач, 399
поверхнево-активні

речовини, 399

пожежа, 156

зона

горіння, 157

задимлення, 158

теплого впливу, 157

небезпечні фактори, 156

параметри

інтенсивність

газообміну, 163

задимлення, 163

лінійна швидкість

вигорання, 238

лінійна швидкість

поширення, 162

масова швидкість

вигорання, 162

площа пожежі, 162

пожежна навантага, 161

температура пожежі, 163

теплота пожежі, 164

тривалість пожежі, 162

фронт пожежі, 162

періоди розвитку, 158

радіус розвитку, 166

явища: загальні, 156

окремі, 156

пожежогасіння

засоби, 338

параметри, 339

для вогнегасної речовини

загальна витрата 340

загальна кількість 339

інтенсивність подачі 340

критична, 341

нормативна, 343

оптимальна, 342

теоретична, 343

*коефіцієнт використання
343*

питома витрата 340

час гасіння, 339

прийоми, 337

способи, 336

Р

рівняння

Антуана, 66

Блінова, 120

Еллея, 117

Клапейрона-Клаузіуса, 65

Шоневальда, 45

рівняння Ле-Шательє, 26

рідини

горючі, 64

легкозаймисті, 64

особливо небезпечні, 64

розльот іскор, 170

С

спінювання, 239

Т

температура

займання, 63

погасання, 334, 337

пожежі в огороженні, 163

спалаху, 63, 116

температурні межі

поширення полум'я, 60

безпечні, 61, 82

суміші рідин, 91

Ф

флегматизація, 345

Література

ЛІТЕРАТУРА

1. Процессы горения / Абдурагимов И.М., Андросов А.С., Исаева Л.К., Крылов Е.В. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1984. – 268 с.

2. Демидов П.Г., Шандыба В.А., Щеглов П.П. Горение и свойства горючих веществ. – М.: Химия, 1981. – 311 с.

3. Демидов П.Г., Саушев В.С. Горение и свойства горючих веществ. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1975. – 280 с.

4. Исаев С.И. Курс химической термодинамики. – М.: Высшая школа, 1986. – 232 с.

5. Монахов В.Т. Методы исследования пожарной опасности веществ. – М.: Химия, 1979. – 424 с.

6. Соколик А.С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 429 с.

7. Справочник “Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения”/ Под редакцией А.Н. Баратова и А.Я. Корольченко, ч. I и II. – М.: Химия, 1990. – 650 с.

8. Баратов А.Н., Иванов Е.Н., Корольченко А.Я и др. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность. Справочник. – М.: Химия, 1987. – 272 с.

9. Справочник химика / Под ред. Б.П. Никольского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1963. Т.1. – 1002 с.

10. Розловский А.Н. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. – М.: Химия, 1980. – 376 с.

11. Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. – Харків: АПБУ, 2002. – 352 с.
12. Блинов В.И., Худяков Г.Н. Диффузионное горение жидкостей. – М.: РИСО АН СССР, 1961. – 210 с.
13. Таубкин С.И., Таубкин И.С. Пожаро- и взрывоопасность пылевидных материалов и технологических процессов их переработки. – М.: Химия, 1976. – 212 с.
14. Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность промышленной пыли. – М.: Химия, 1986. – 242 с.
15. Абдурагимов И.М., Говоров В.Ю., Макаров В.Е. Физико–химические основы развития и тушения пожара. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1980. – 255 с.
16. Абдурагимов И.М. Критерий тушения пожаров охлаждающими огнетушащими средствами.// Журн. Всесоюзного хим. об-ва им. Д.И. Менделеева. – 1982. – Т.27. – №1. – с. 11-17.
17. Повзик Я.С., Ключ П.П., Матвейкин А.М., Пожарная тактика. - М.: Стройиздат, 1990. – 283 с.
18. Иванников В.П., Ключ П.П. Справочник руководителя тушения пожара. – М.: Стройиздат, 1987. – 288 с.
19. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров: Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1990. – 265 с.
20. Термогазодинамика пожаров в помещениях / Астапенко В.М., Кошмаров Ю.А., Молчадский И.С. и др. – М.: Стройиздат, 1988. – 295 с.
21. Романенко И.М., Кошмаров Ю.А, Башкирцев М.П. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле. – М.:

Література

ВИПТШ МВД СССР, 1977. – 415 с.

22. Ройтман М.Я. Основы противопожарного нормирования в строительстве. – М.: Стройиздат, 1969. – 480 с.

23. Зернов С.И. Расчетные оценки при решении задач пожарно–технической экспертизы: Учебное пособие. – М.: ЭКЦ МВД России, 1992. – 88 с.

24. Баратов А.Н., Иванов Е.Н. Пожаротушение на предприятиях химической и нефтеперерабатывающей промышленности. – М.: Наука, 1979. – 120 с.

25. Иванов Е.Н. Противопожарная защита открытых технологических установок. – М.: Химия, 1986. – 190 с.

26. Таубкин С.И. Пожар и взрыв, особенности их экспертизы. – М., 1999. – 245 с.

27. Франк–Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1967. – 220 с.

28. Юбилейный сборник трудов Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны. – М.: ВНИИПО МВД России, 1997. – 287 с.

29. Шрайбер Г., Порст П. Огнетушащие средства: Пер. с нем. – М.: Стройиздат, 1975. – 260 с.

30. Общесоюзные нормы технологического проектирования. Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности. – М.: МВД СССР, 1988.

31. ГОСТ 12.1.044–89. ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. –

М.: Изд-во стандартов, 1989. – 67 с.

32. ГОСТ 12.1.004–91. Пожарная безопасность. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 110 с.

33. ДНАОП 0.00-1.32-01 Правила устройства электроустановок. Электрооборудование специальных установок

34. НАПБ Б.03.002-2007. Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.

35. Взрывные явления: оценка и последствия / Бейкер У., Кокс П., Уэстрайн П. и др: В 2 книгах. – М.: Мир, 1986. –Книга 2. – 382 с.

36. ДСТУ 2272:2006 ССБП. Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять

37. Горшков В.И. Тушение пламени горючих жидкостей. – М.: Пожнаука, 2007. – 268 с.

Навчальне видання

Тарахно Олена Віталіївна
Трегубов Дмитро Георгійович,
Жернокльов Костянтин Владиславович,
Шепелева Алла Іванівна
Коврегін Володимир Володимирович

ТЕОРІЯ РОЗВИТКУ ТА ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ

Практикум

Частина II

Підписано до друку 10.12.10 . Формат 60x84/16.
Папір 80 г/м². Друк ризограф. Ум.друк. арк. 19,5
Тираж 300 прим. Вид. № 110/10. Зам.№ 914 (472/10) Обл.вид арк. 22,1
Відділення редакційно-видавничої діяльності
Університету цивільного захисту України
61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94

КП "Міська друкарня", 61002, харків, вул. Артема, 44

Свідоцтво Державного комітету інформаційної політики, телебачення та радіомовлення
України про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців,

виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції,
№ 3613 СЕРІЯ ДК ВІД 29.10.2009