



**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ**

**ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ,  
ВИБУХУ ТА ПОЖЕЖОГАСІННЯ**

**Практикум**

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

**Харків 2024**

Авторський колектив:

Д.Г. Трегубов, кандидат технічних наук, доцент – розділ 2;  
О.В. Тарахно, доктор технічних наук, професор – розділ 4, 5;  
Н.В. Мінська, доктор технічних наук, доцент – розділ 3;  
Ю.К. Гапон, кандидат технічних наук – розділ 1

**Рецензенти:** кандидат технічних наук, доцент Нуянзін В.М., начальник кафедри фізико-хімічних основ розвитку та гасіння пожеж факультету оперативного-рятувальних сил Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України;  
доктор технічних наук, професор Кустов М. В., начальник наукового відділу з проблем цивільного захисту та техногенно-екологічної безпеки Національного університету цивільного захисту України.

Рекомендовано до друку і використання в освітньому процесі  
методичною радою НУЦЗ України  
(протокол від 18.04.2024 № 7)

**Трегубов Д. Г.**

**Т 69** Теорія процесів горіння, вибуху та пожежогасіння: практикум / Д. Г. Трегубов, О. В. Тарахно, Н. В. Мінська, Ю. К. Гапон. – Х.: НУЦЗ України, 2024. – 422 с.

У виданні стисло викладені основні положення теорії процесів виникнення, розвитку та припинення горіння речовин. Надано методичні поради, алгоритми і приклади розв'язання типових задач. Наведено умови задач для індивідуальних робіт та довідковий матеріал. Розглянуто загальну характеристику процесу горіння, закономірності і параметри процесу виникнення горіння, 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 призначено для практичного опанування дисциплінами «Теорія розвитку та припинення горіння» і «Теорія горіння та вибуху» у в галузях знань 26 «Цивільна безпека» та 16 «Хімічна та біоінженерія» здобувачами вищої освіти, що навчаються за освітньо-професійними програмами: «Пожежна безпека», «Пожежогасіння та аварійно-рятувальні роботи», «Цивільний захист», «Інженерне забезпечення саперних, піротехнічних та вибухових робіт», «Охорона праці», «Радіаційний та хімічний захист».

УДК 614.841

© Трегубов Д. Г., Тарахно О.В.,  
Мінська Н. В., Гапон Ю. К., 2024  
© НУЦЗ України, 2024

# ЗМІСТ

Вступ.....	6
РОЗДІЛ 1. Загальна характеристика процесів горіння та вибуху.....	7
Глава 1. Матеріальний баланс процесу горіння.....	14
§ 1. Визначення кольору дифузійного полум'я за складом горючої речовини.....	14
§ 2. Складання рівняння реакції горіння індивідуальної речовини.....	17
§ 3. Розрахунок матеріального балансу процесу горіння.....	21
§ 3.1 Розрахунок матеріального балансу процесу горіння індивідуальної речовини.....	26
§ 3.2 Розрахунок матеріального балансу процесу горіння складних речовин та матеріалів.....	29
§ 3.2.1. Горіння суміші газів.....	29
§ 3.2.2. Горіння складних конденсованих матеріалів.....	31
§ 4. Історична довідка про вибухи у вигляді надзвичайних ситуацій.....	34
Завдання для самоконтролю.....	40
Глава 2. Енергетичний баланс процесу горіння.....	46
§ 1. Розрахунок теплоти згоряння індивідуальних речовин та складних матеріалів.....	49
§ 1.1. Розрахунок стандартної теплоти утворення індивідуальних речовин.....	50
§ 1.2. Розрахунок теплоти згоряння індивідуальних речовин.....	51
§ 1.3. Розрахунок теплоти згоряння складних речовин та матеріалів.....	53
§ 1.4. Розрахунок пожежної навантаги.....	56
§ 2. Розрахунок температури горіння речовин.....	57
§ 2.1. Розрахунок адіабатичної температури горіння з використанням ентальпії продуктів горіння.....	59
§ 2.2. Визначення температури горіння з використанням теплоємності продуктів горіння.....	65
§ 2.3. Розрахунок температури дифузійного горіння в обмеженому просторі.....	68
§ 3. Розрахунок температури вибуху паро- і газоповітряних сумішей.....	70
§ 3.1. Розрахунок максимальної температури та тиску вибуху індивідуальної речовини.....	70
§ 3.2. Розрахунок температури вибуху індивідуальної речовини за умов надлишку повітря.....	73
Завдання для самоконтролю.....	76
РОЗДІЛ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння.....	80
Глава 1. Самоспалахування горючих сумішей.....	82
§ 1. Температура самоспалахування.....	82
§ 2. Розрахунок температури самоспалахування.....	84
Завдання для самоконтролю.....	99
Глава 2. Самозаймання речовин і матеріалів.....	102
§ 1. Хімічне самозаймання.....	103
§ 2. Теплове самозаймання.....	117
Завдання для самоконтролю.....	123
Глава 3. Вимушене запалювання.....	129

§ 1. Визначення спроможності електричних розрядів до підпалювання .....	129
§ 2. Визначення спроможності розжарених тіл до підпалювання .....	134
§ 3. Визначення можливості підпалювання горючих речовин променистим потоком тепла від полум'я .....	145
Завдання для самоконтролю .....	151
РОЗДІЛ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів .....	154
Глава 1. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я .....	154
§ 1. Розрахунок нижньої концентраційної межі поширення полум'я горючої речовини за її теплою згоряння .....	157
§ 2. Розрахунок нижньої концентраційної межі поширення полум'я за хімічним складом горючої речовини .....	158
§ 3. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я горючої речовини за апроксимаційною формулою .....	162
§ 4. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я горючої речовини за її хімічною будовою .....	164
§ 5. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я суміші речовин .....	165
§ 5.1. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я суміші горючих речовин .....	166
§ 5.2. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я суміші горючих газів з негорючими .....	167
§ 6. Розрахунок концентраційних меж поширення полум'я за підвищених температур середовища .....	174
§ 7. Розрахунок нижньої концентраційної межі поширення полум'я пилу (аерозоллю) .....	175
Завдання для самоконтролю .....	180
Глава 2. Параметри пожежовибухонебезпечності рідин .....	185
§ 1. Розрахунок тиску насиченої пари .....	187
§ 2. Розрахунок температурних меж поширення полум'я .....	194
§ 2.1. Розрахунок температурних меж поширення полум'я індивідуальної горючої рідини .....	195
§ 2.2. Розрахунок температурних меж поширення полум'я суміші рідин .....	202
§ 3. Розрахунок температури спалаху індивідуальних рідин та їх сумішей .....	214
§ 3.1. Розрахунок температури спалаху і температури займання індивідуальної горючої рідини .....	214
§ 3.2. Розрахунок температури спалаху суміші рідин .....	222
Завдання для самоконтролю .....	229
РОЗДІЛ 4. Параметри розвитку пожежі .....	236
Глава 1. Параметри розвитку пожежі класу А .....	241
§ 1. Особливості розвитку пожежі класу А на відкритому просторі .....	242
§ 2. Особливості розвитку пожежі класу А в огороженні .....	247
Завдання для самоконтролю .....	267
Глава 2. Параметри розвитку пожежі класу В .....	271
§ 1. Горіння пароповітряної суміші на відкритому просторі .....	271
§ 2. Вигорання горючих рідин під час пожежі. Явища спінювання і викиду .....	280
§ 3. Горіння пароповітряної суміші у приміщенні .....	283

Завдання для самоконтролю .....	294
Глава 3. Параметри розвитку пожежі класу С .....	300
§ 1. Пожежі газових фонтанів .....	300
§ 2. Горіння газоповітряного середовища на відкритому просторі .....	304
§ 3. Утворення вибухонебезпечного середовища під час аварійного виходу у приміщення.....	309
Завдання для самоконтролю .....	328
РОЗДІЛ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами .....	336
Глава 1. Параметри гасіння пожежі негорючими газами .....	342
Завдання для самоконтролю .....	359
Глава 2. Параметри гасіння пожежі охолоджуючими вогнегасними засобами .....	366
Завдання для самоконтролю .....	373
Глава 3. Параметри гасіння пожежі ізолюючими вогнегасними засобами.....	376
Завдання для самоконтролю .....	382
Додатки.....	386
Терміни та визначення.....	411
Предметний показчик .....	418
Література.....	420

## ВСТУП

Горіння – основний процес, що супроводжує пожежі та вибухи. Знання основних закономірностей виникнення, розвитку та припинення процесів горіння дозволяє фахівцям служби цивільного захисту ефективно вирішувати задачі профілактики надзвичайних ситуацій техногенного походження та гасіння пожеж.

Основою освітніх компонент «Теорія розвитку та припинення горіння», «Теорія горіння та вибуху» та «Теорія процесів горіння, вибуху та пожежога-сіння» є вивчення закономірностей процесів виникнення та розвитку горіння, умов, за яких горіння може спричинити вибух, методик розрахункового та експериментального визначення основних параметрів пожежовибухонебезпеки речовин та матеріалів, основних положень теорії припинення горіння, фізико-хімічних основ розвитку пожежі та механізму дії різноманітних вогнегасних засобів.

Теоретичний матеріал базується на основі таких освітніх компонент як фізика, хімія, термодинаміка та теплопередача, а також – органічна хімія та безпеки радіаційного, хімічного та біологічного походження. Наведений навчальний матеріал узагальнює та використовує теоретичні дослідження та практичний досвід органів цивільного захисту щодо протипожежних заходів та гасіння пожеж.

Наведені у навчальному практикумі методики дозволяють визначати параметри пожежої небезпеки речовин та матеріалів, прогнозувати наслідки розвитку надзвичайних ситуацій техногенного походження. Результати такого прогнозування необхідні практичним робітникам підрозділів цивільного захисту для забезпечення безпеки та захисту населення і територій, матеріальних і культурних цінностей та довкілля від негативних наслідків надзвичайних ситуацій.

Навчальний практикум “Теорія процесів горіння, вибуху та пожежога-сіння” призначений для здобувачів вищої освіти денної та заочної форми навчання, що навчаються за освітньо-професійними програмами: «Пожежна безпека», «Пожежога-сіння та аварійно-рятувальні роботи», «Цивільний захист», «Екологічна безпека», «Охорона праці», «Радіаційний та хімічний захист». У навчальному практикумі викладено основні теоретичні положення, методики та приклади розрахунків, приклади розв'язання задач, вправи для самостійної роботи та основні довідкові матеріали, необхідні для вивчення вищенаведених освітніх компонент.

## РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ ТА ВИБУХУ

**Горіння** – складний фізико-хімічний процес, основою якого є швидка окислювально-відновна реакція, що супроводжується інтенсивним виділенням енергії у вигляді тепла та світлового випромінювання [1–3].

На відміну від звичайних окислювально-відновних процесів, горіння характеризується великою швидкістю протікання хімічної реакції.

Процеси горіння класифікують за кількома ознаками.

### **1. За агрегатним станом компонентів горючої суміші в зоні горіння.**

**Гомогенне** горіння спостерігається за умови, що компоненти горючої суміші знаходяться в зоні горіння в однаковому агрегатному стані (горіння газів, пари рідин, газоподібних продуктів розкладання твердих горючих матеріалів у середовищі кисню або повітря).

**Гетерогенне** горіння спостерігається за умови, що компоненти горючої суміші знаходяться в зоні горіння в різних агрегатних станах; горіння відбувається на поверхні конденсованої фази (горіння вуглецевого залишку, коксу, нелетких металів).

### **2. За способом утворення горючої суміші.**

Процес горіння проходить у дві стадії: дифузія компонентів суміші до зони горіння та хімічна реакція у зоні горіння. Швидкість перетворення вихідних речовин у кінцеві продукти залежить від швидкості змішування реагентів шляхом молекулярної й турбулентної дифузії і від швидкості хімічної реакції. Загальна швидкість процесу визначається швидкістю більш повільної стадії.

**Дифузійне** горіння відбувається за умови дифузії компонентів горючої суміші у зону горіння, тому швидкість процесу визначається швидкістю дифузії як найповільнішої стадії. За умови гетерогенного горіння в зону реакції дифундує кисень.

**Кінетичне** горіння відбувається за умови попереднього утворення гомогенної горючої суміші, що виключає стадію змішування компонентів суміші безпосередньо в зоні реакції, отже, загальна швидкість процесу горіння буде визначатись тільки швидкістю (кінетикою) хімічної реакції.

### **3. За механізмом поширення горіння.**

**Дефлаграційним** називають горіння, яке поширюється шляхом поширеного займання холодної горючої суміші за рахунок передачі тепла від зони горіння у підготовчу зону теплопровідністю і частково випромінюванням.

**Детонаційним** називають горіння, яке поширюється за рахунок швидкого адіабатичного стиснення горючої суміші ударною хвилею, утвореною продуктами згорання.

### **4. За газодинамічним режимом горіння.**

**Ламінарне** горіння відбувається за умови, що компоненти горючої суміші



надходять до зони реакції повільно, за законами молекулярної або слабкої конвекційної дифузії. Напрямок руху окремих частин потоку співпадає.

*Турбулентне* горіння відбувається за умови, що компоненти горючої суміші надходять до зони реакції інтенсивно, з інтенсивним завихренням, перемішуванням продуктів горіння з вихідною сумішшю. Напрямок руху окремих частин потоку не співпадає.

Параметром, що характеризує газодинамічний режим горіння, є числове значення критерію Рейнольдса. Якщо  $Re < 2300$ , то полум'я можна вважати ламінарним, якщо  $2300 < Re < 10\,000$  – полум'я є перехідним, а якщо  $Re > 10\,000$  – горіння відносять до турбулентного.

Як і будь-який інший хімічний процес, горіння підкоряється таким основним законам природи як закони збереження маси й енергії. Розглянемо докладніше, як ці закони виконуються для процесу горіння.

Поняття «вибух» почало широко застосовуватися з часів відкриття чорного пороху, який використовували для підривних робіт і в артилерії. У сучасному народному господарстві будь-якої країни вибухові процеси відіграють важливу роль, їх широко використовують при видобуванні корисних копалин і гірських порід, під час проведення будівельних робіт, обробці металів, у військовій справі.

У науковій і довідковій літературі для вибуху дають різні визначення:

- *вибух – це надзвичайно швидке хімічне (вибухове) перетворення, що супроводжується виділенням енергії й утворенням стиснутих газів, які здатні виконувати механічну роботу;*

- *вибух... являє собою процес досить швидкого фізичного чи хімічного перетворення системи, що супроводжується переходом її потенційної енергії в механічну роботу; робота, що виконується при вибуху, викликана швидким розширенням газів чи парів, незалежно від того, існували вони до чи утворились під час вибуху;*

- *вибух – це виділення енергії (ядерної, хімічної, електричної, енергії тиску) за такий проміжок часу і в такому об'ємі, яких достатньо для виникнення хвилі тиску кінцевої амплітуди, що поширюється від джерела вибуху та супроводжується звуковим ефектом; виділення цієї енергії не є вибухом, якщо воно локалізоване в часі і просторі і не призводить до утворення хвилі тиску, що сприймається на слух; вибухам властиві руйнування, але не обов'язково, щоб вони мали місце;*

- *вибух – це швидке виділення енергії в обмеженому об'ємі, що пов'язане з раптовою зміною стану речовини і супроводжується звичайно розкидуванням і руйнуванням навколишнього середовища (в тому числі призводить до виникнення стрибка тиску чи ударної хвилі, яка віддаляється від місця утворення зі швидкістю, що визначається як різницею тисків, так і властивостями середовища, де проходить її поширення);*

- під вибухом розуміють явище, що пов'язане з раптовою зміною стану речовини, що супроводжується різким звуковим ефектом і швидким виділенням енергії, що призводить до розігрівання, руху і стиснення продуктів вибуху і навколишнього середовища. Виникнення підвищеного тиску в області вибуху викликає утворення в навколишньому середовищі ударної хвилі з сильною руйнівною дією.

Отже, у найбільш широкому розумінні слова, **вибух** – це фізичне чи хімічне перетворення речовини, що супроводжується досить швидким переходом її енергії в енергію стиснення і руху вихідної речовини чи продуктів її перетворення і навколишнього середовища.

Таким чином явище вибуху включає дві основні стадії:

– перетворення вихідної потенційної енергії того чи іншого виду в енергію нагрітих стиснутих газів;

– розширення стиснутих газів, енергія яких переходить у механічну роботу (енергію руху, стиснення, розігрівання середовища). Частина енергії залишається у вигляді внутрішньої (теплової) енергії газів, що розширилися.

У результаті вибуху речовина, що заповнює об'єм, в якому відбувається вивільнення енергії, перетворюється у сильно нагрітий газ (плазму) з дуже високим тиском (до декількох сотень тисяч атмосфер). Вибух у твердому середовищі супроводжується руйнуванням і дробленням (бризантна дія), у водному середовищі – утворенням гідравлічної хвилі, а у повітряному – повітряної ударної хвилі, які впливають на об'єкти (фугасна дія).

*Вибухова хвиля* – це рух середовища, породжений вибухом, при якому відбувається різке підвищення тиску, густини й температури середовища.

Фронт (передня границя) вибухової хвилі поширюється по середовищу з великою швидкістю, внаслідок чого область, що охоплена рухом, швидко розширюється. У міру збільшення відстані від місця вибуху механічний вплив вибухової хвилі слабшає.

Під час вибуху можуть створюватися небезпечні фактори:

- повітряна ударна хвиля (може виникати під час вибуху газоповітряних сумішей, резервуарів із перегрітою рідиною, резервуарів під тиском);
- теплове випромінювання;
- осколки, що розлітаються;
- дія токсичних речовин, які застосовувалися у технологічному процесі або утворилися в ході аварійної ситуації.

Для більш зручного вивчення вибухів їх доцільно класифікувати.

Залежно від виду енергоносіїв і умов енерговиділення вибухи можуть бути *хімічними* (детонація конденсованих вибухових речовин (ВР), швидке згоряння вибухонебезпечної хмари газу, пари або пилу), *фізичними* (швидке протікання ядерних реакцій, раптове руйнування посудин зі стисненими га-

зами або з перегрітими рідинами, контакт перегрітих твердих речовин (розплаву) з холодними рідинами) і *комбінованими* або *фізико-хімічними* (вибухи типу BLEVE – Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion – вибух пари, що розширюється, рідини, яка скипає).

Джерелом *хімічного вибуху* є швидкі реакції горіння, що самостійно прискорюються, або реакції термічного розкладання нестабільних сполук, здатних під дією початкового імпульсу до вибухового перетворення без участі кисню повітря (наприклад, ацетилен, етен, перекис водню, аміачна селітра, гіпохлорит кальцію та деякі інші речовини, схильні до розкладання за відсутності кисню), які супроводжуються виділенням значної кількості тепла та газоподібних продуктів реакції. Енергоносіями хімічних вибухів можуть бути конденсовані вибухові речовини, тверді, рідкі, газоподібні горючі речовини, а також аерозолі горючих речовин (рідких і твердих) в окисному середовищі, у тому числі і в повітрі.

Вибухи газопароповітряних і пилоповітряних сумішей (або аерозолів рідин) утворюють клас *об'ємних вибухів*. Необхідною умовою виникнення таких вибухів є наявність вибухонебезпечної суміші, що утворилася ще до її займання. Вибухи газопароповітряних сумішей можуть виникати як у приміщеннях, так і в необмеженому просторі (атмосфері), а вибухи аерозолі пилу виникають в обмеженому просторі (у приміщеннях, всередині обладнання, штольнях шахт). Вибухи пилоповітряних систем (аерозолів) являють собою одну з основних небезпек хімічного виробництва. Небезпека вибухів пилу існує на зернових елеваторах, комбикормових заводах, в процесі виробництва борошна, цукру, пластмас, лікарських препаратів, сірки, а також на установках подрібнення палива (вугілля), в текстильному виробництві.

Вибухи газопароповітряних сумішей у необмеженому просторі можуть виникати після руйнування газопроводів, розливу зрідженого горючого газу, його випаровування з переходом у подальше горіння. Відома також велика кількість аварій з вибухами резервуарів, в яких зберігалися великі об'єми нестабільних сполук. Вибухи газопароповітряних сумішей у приміщеннях (будівлях) виникають унаслідок виходу газу чи пари легкозаймистих та нагрітих горючих рідин із елементів обладнання. Такі вибухи виникати також у ємностях для зберігання і транспортування вибухо- та пожежонебезпечних речовин (резервуарах, газгольдерах, цистернах, вантажних відсіках танкерів). Особливу увагу приділяють вибухам гібридних сумішей (суміш горючих газів і пилу з повітрям), які часто виникають на шахтах і супроводжуються трагічними наслідками.

*Вибух фізичний* виникає внаслідок раптової зміни фізичного стану речовини (фазовий перехід), що супроводжується швидким виділенням енергії й утворенням стиснених газів, здатних виконувати механічну роботу. Такі вибухи не супроводжуються хімічними перетвореннями з виділенням тепла та

утворенням продуктів реакцій. Фізичні вибухи можуть виникати внаслідок вивільнення внутрішньоядерної енергії (ядерний вибух), електромагнітної (іскровий розряд), енергії стиснених газів (при перевищенні тиском газу в посудині межі її міцності).

Джерелом енергії ядерних вибухів є швидкоплинні ланцюгові ядерні реакції синтезу легких ядер (дейтерію і тритію) або ділення важких ядер ізотопів урану і плутонію.

Типовим фізичним вибухом є розрив посудини, заповненої негорючими газами, парою або перегрітою рідиною, які знаходяться під великим тиском. Джерелами енергії стиснених газів (пари) у замкнутих об'ємах апаратури (устаткування) можуть бути як зовнішні (енергія, використовувана для стиснення газів, нагнітання рідин, теплоносії, що забезпечують нагрівання рідини й газів у замкнутому просторі), так і внутрішні процеси (екзотермічні фізико-хімічні процеси і процеси тепломасообміну в замкнутому об'ємі), що призводять до інтенсивного випаровування рідин або газоутворення, зростання температури й тиску без внутрішніх вибухових явищ.

Залежно від тиску  $P$  і температури  $T$  речовини можуть перебувати у різних агрегатних станах; за ознакою розташування в різних зонах діаграми стану їх поділяють на категорії: 1) речовини, в яких критична температура є меншою, ніж температура середовища  $T_{кр} < T_{серед}$  (зріджені гази  $He, H_2, N_2, O_2, CH_4, CF_4, C_2H_4$ ); 2) речовини із  $T_{кип} < T_{серед} < T_{кр}$  (*перегріті рідини* – зріджений нафтовий газ,  $C_3H_8, C_4H_{10}, NH_3, CO_2, CCl_2$ ); для зрідження таких речовин їх достатньо стиснути. Зберігаються такі речовини під тиском за температури навколишнього середовища; 3) речовини з  $P_{кр} > P_{атм}$  та  $T_{кип} > T_{серед}$ , тобто речовини які знаходяться за атмосферного тиску у рідкому або твердому стані; 4) речовини, що знаходяться за підвищених тисків і температур, які перевищують їх  $T_{кип}$  при  $P_{атм}$ , наприклад, перегріта водяна пара у котлах;

У разі руйнуванні ємностей із речовинами 1-ї і 2-ї категорії відбувається їх викид в атмосферу, скипання зі швидким випаровуванням і утворенням хмари газопароповітряних сумішей. Якщо за певних умов такий фазовий перехід відбувається в обмеженому просторі, випаровування протікає вибуховим чином. Частку речовини, що «миттєво» випаровується визначають за фо-

рмулою: 
$$\chi_T = \frac{H_T - H_{T_{кип}}}{\Delta H_{вип}} = \frac{c_p(T - T_{кип})}{\Delta H_{вип}}$$
, де  $\chi_T$  – частка рідини, що миттєво випаровується за температури  $T$ ;  $H_T$  – питома ентальпія рідини за температури  $T$ ;  $H_{T_{кип}}$  – питома ентальпія рідини за  $T_{кип}$  й тиску  $P_{атм}$ ;  $\Delta H_{вип}$  – питома теплота випаровування в точці кипіння за  $P_{атм}$ ;  $c_p$  – питома теплоємність рідкої фази;  $T$  – температура рідкої фази (відповідає температурі насиченої пари за тиску спрацьовування запобіжного клапана);  $T_{кип}$  – температура кипіння речовини

за атмосферного тиску. Уразі  $\chi_T < 0,35$  фізичний вибух не відбувається. За умови  $\chi_T \geq 0,35$  імовірність виникнення цього явища є великою.

У випадку розлиття рідин 3-ї категорії відбувається їх випаровування, швидкість якого залежить від леткості, температури зовнішнього середовища і швидкості вітру. Як правило, фізичного вибуху для таких речовин не спостерігається.

Рідини, які відносяться до четвертої категорії, при розлитті поведуться як рідини 2-ї категорії.

Фізичні вибухи виникають також внаслідок вибухового випаровування при контакті розжарених тіл із холодною рідиною або при змішуванні гарячої й холодної рідин, коли температура однієї з них значно перевищує температуру кипіння іншої.

Прикладом *комбінованого* або *фізико-хімічного вибуху* може бути вибух пари, яка розширюється, рідини, що скипає – *BLEVE* (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion). Такий випадок можливий за умови, якщо ємність, яка містить легкозаймисту низькокиплячу рідину або горючий зріджений газ під тиском (бутан, пропан, зріджений природний газ), піддається зовнішньому нагріванню. Більша частина продукту в резервуарі перебуває в рідкій формі, а менша частина – в газовій формі, яка знаходиться над рідкою фазою й займає об'єм посудини, що залишився. При потраплянні такого замкнутого резервуара в осередок пожежі може відбуватися нагрівання вмісту резервуара до температури, що істотно перевищує нормальну температуру кипіння речовини (за атмосферного тиску)  $T \gg T_{\text{кип}}$ , з відповідним підвищенням тиску. За рахунок нагрівання стінок посудини, які не змочені, зменшується межа міцності матеріалу резервуара, у результаті чого газова фаза вивільняється з ємності через запобіжний клапан або пошкодження у стінках резервуара, створюючи хвилю тиску зовні посудини; тиск усередині посудини різко падає.

Рідка фаза, яка була стиснута і значно перегріта у попередній момент часу, внаслідок падіння тиску активно й неконтрольовано об'ємно скипає. Кількість газу, що вивільняється, переповнює посудину, газ не встигає вийти через отвір, який утворився, відбувається повне руйнування посудини внаслідок *фізичного вибуху* з виникненням другої хвилі тиску, більш потужної, ніж перша, що супроводжується розкиданням металевих осколків, розльотом частин конструкції, розпорошенням рідкої фази, що залишилася в резервуарі.

Пара і аерозоль, що вивільнилися з посудини, розширюються і змішуються з повітрям. Якщо речовина займиста, то її пароповітряна хмара або аерозоль у повітрі можуть негайно запалитися – виникає *хімічний вибух*. Фронт полум'я швидко поширюється від точки запалювання, утворюючи вогняну кулю. Її температура є надзвичайно високою й це викликає значну теплову радіацію.

Отже, за певних умов відбувається розрив резервуара внаслідок фізичного вибуху і наступний за цим хімічний вибух горючої суміші, яка утворюється при виході пари у навколишнє середовище. Відзначають наявність наступних етапів: перегрівання рідини до  $T \gg T_{\text{кип}}$ , збільшення тиску пари та первинний вихід пари з ємності через запобіжний клапан або пошкодження резервуара; миттєве скипання перегрітої рідини внаслідок зменшення тиску пари всередині резервуара, різке збільшення частки парової фази; руйнування ємності, вихід пари, що розширюється, у навколишнє середовище з подальшим займанням пароповітряної хмари

Технологічна система є вибухонебезпечною, якщо вона має запас потенційної енергії, яка вивільняється з настільки великою швидкістю, що може генерувати повітряну ударну хвилю, здатну викликати руйнування конструкцій або ураження людей. Кількість потенційної енергії визначається відповідними фізико-хімічними закономірностями вивільнення цієї енергії. Енергію вибуху газопароповітряних сумішей визначають за теплою згоряння горючих речовин, конденсованих вибухових речовин – за теплою, що виділяється під час детонації або їх розкладання; при фізичних вибухах систем зі стиснутими газами або перегрітими рідинами – за енергією адіабатичного розширення парогазового середовища і перегріву рідини. Надлишковий тиск в ударній хвилі зменшується з відстанню від епіцентру вибуху.

## ГЛАВА 1. МАТЕРІАЛЬНИЙ БАЛАНС ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ

### § 1. Визначення кольору дифузійного полум'я за складом горючої речовини

*Полум'я* – це газовий об'єм, в якому відбуваються всі процеси, що пов'язані з підготовкою горючої суміші до горіння, і сам процес горіння.

У структурі полум'я умовно можна виділити декілька зон: підготовчу, горіння та продуктів горіння [3].

У підготовчій зоні відбувається процес термічного розкладання речовини на складові хімічні елементи (карбон, водень та ін.), радикали та функціональні групи. Якщо в підготовчій зоні є кисень або кисень, що виділяється під час розкладання горючої речовини, то відбувається попереднє окиснення карбону, і в зону горіння вже потрапляють не атоми карбону, а молекули CO.

У зоні горіння відбуваються швидкі реакції згоряння продуктів попереднього окиснення, карбону та водню до кінцевих продуктів (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O).

Спектри випромінювання двоатомних (CO) та трьохатомних газів (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) розташовані за межами світлосприйняття людини, тому їх «внеском» у колір полум'я можна знехтувати. Якщо в зону горіння потрапляє молекулярний вуглець, то він розжарюється, і це зумовлює світіння зони горіння. Якщо молекулярний вуглець не встигає окислитися у зоні горіння, то він потрапляє в зону продуктів горіння у вигляді сажі.

У разі кінетичного горіння в підготовчу зону надходить вже готова суміш у концентраціях, близьких до стехіометричних; у цій же зоні відбувається часткове розкладання горючої речовини і попереднє окиснення киснем, що міститься у складі суміші. В зоні горіння утворюються кінцеві продукти реакції, які практично не випромінюють світла, - полум'я буде безбарвним або блакитним. Якщо в суміші, яка надходить для горіння, не вистачає окисника, то в підготовчій зоні недостатньо кисню для утворення продуктів попереднього окислення, тому в зону горіння потрапляють частинки вуглецю, полум'я набуває жовтого кольору.

У разі дифузійного горіння горюча суміш утворюється в зоні горіння за рахунок дифузії горючої речовини з підготовчої зони, а окисника – із навколишнього середовища. Колір дифузійного полум'я залежить від хімічного складу горючої речовини й температури у зоні горіння.

У процесі горіння у підготовчій зоні відбувається термічне розкладання молекули горючої речовини на складові хімічні елементи, радикали і функціональні групи, після цього у зоні горіння відбувається їх окиснення. Якщо у складі горючої речовини достатньо кисню, то карбон, який виділяється при термічному розкладанні, встигає весь попередньо окислитись у підготовчій зоні до оксиду карбону CO, який у зоні горіння догоряє й утворює продукт

повного згоряння – вуглекислий газ  $\text{CO}_2$ . У цьому випадку полум'я буде безбарвним або слабо блакитним. Так горить мурашина кислота.

Якщо частинки вуглецю потрапляють у зону горіння, то вони, розжарюючись, обумовлюють жовтий колір полум'я. За умови достатнього доступу повітря вуглець у зоні горіння встигає окислитися до оксиду та діоксиду карбону, при цьому сажа не виділяється. Полум'я буде яскравим, але не кіптявим.

При згорянні речовин, які містять у своєму складі багато карбону, або у разі нестачі кисню в окислювальному середовищі, карбон у зоні горіння не встигає окислитися й потрапляє у зону продуктів горіння у вигляді сажі. Полум'я в цьому випадку буде яскравим та кіптявим.

Характер світіння дифузійного полум'я приблизно можна охарактеризувати за відсотковим вмістом кисню та карбону в горючій речовині (відповідні дані наведені у таблиці 1.1).

Таблиця 1.1 – Залежність кольору дифузійного полум'я від складу горючої речовини

Характер світіння полум'я	Вміст елементів у горючій речовині, %	
	кисень	карбон
безбарвне	більше 50	до 50
яскраве, без кіптяви	від 25 до 50	від 50 до 75
яскраве, із кіптявою	менше 25	більше 75

### ***Практичне значення визначення кольору полум'я***

1. За кольором полум'я можна визначити режим горіння для горючої речовини відомого складу.

Якщо за розрахунком колір дифузійного полум'я даної горючої речовини має бути яскравим, а на практиці полум'я виявляється блакитним, можна зробити висновок, що під час горіння відбувається попереднє сумішоутворення горючої речовини з окисником, отже горіння проходить у кінетичному режимі. Якщо полум'я жовте, можна вважати режим горіння дифузійним.

2. За кольором дифузійного полум'я можна визначити орієнтовний склад невідомої горючої речовини.

Якщо полум'я є яскравим та кіптявим, можна вважати, що горить речовина з великим вмістом карбону. Якщо полум'я яскраве, не кіптяве – горить речовина з малим вмістом карбону або речовина, яка у своєму складі містить невелику кількість кисню. Якщо дифузійне полум'я є блакитним, можна зробити висновок, що горить речовина з малим вмістом карбону і великим вмістом кисню.

Якщо горюча речовина містить у своєму складі деякі атоми металів, то колір полум'я набуває характерного забарвлення (дивись табл. 1.2).



Таблиця 1.2 – Забарвлення полум'я сполуками деяких елементів

Хімічний елемент	Колір полум'я	Хімічний елемент	Колір полум'я
Al, Mg	білий	B	зелений
K	фіолетовий	Tl, Te	смарагдово-зелений
Rb, Cs	рожево-фіолетовий	Ba, Mo	жовтувато-зелений
In	синьо-фіолетовий	Na	жовтий
Pb, As, Sb, Se	блідофіолетовий	Ca	темно-червоний
Cu (CuCl <sub>2</sub> )	зелений (блакитний)	Sr, Li	малиновий

3. За яскравістю та кольором світіння розжарених твердих тіл, що потрапили в полум'я, або за кольором зони гетерогенного горіння можна визначити температуру зони реакції відповідно до таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Колір розжарених твердих тіл залежно від їх температури

Колір розжареного твердого тіла	Температура, °C
світло-червоний	550
темно-червоний	700
світло-вишневий	800
вишнево-червоний	900
яскраво-вишневий	1000
жовтогарячий	1100
яскраво-жовтий	1200
білий	1300
яскраво-білий	1400
сліпучий білий	> 1500

### Методика визначення кольору дифузійного полум'я

1. Розрахувати молярну масу горючої речовини  $\mu_{гр}$ .
2. Розрахувати відсоток кисню та карбону у складі горючої речовини:

$$\text{вміст O: } \varphi_{\text{O}} = \frac{n_{\text{O}} \cdot \mu_{\text{O}}}{\mu_{\text{гр}}} 100, \% \quad (1.1)$$

$$\text{вміст C: } \varphi_{\text{C}} = \frac{n_{\text{C}} \cdot \mu_{\text{C}}}{\mu_{\text{гр}}} 100, \% \quad (1.2)$$

де  $n_{\text{O}}$ ,  $n_{\text{C}}$  – число атомів кисню та карбону у молекулі;  $\mu_{\text{O}}$ ,  $\mu_{\text{C}}$ ,  $\mu_{\text{гр}}$  – молярні маси кисню, карбону, горючої речовини, кг·кмоль<sup>-1</sup>.

3. За таблицею 1.1 визначити колір дифузійного полум'я; якщо результати визначення за киснем та карбоном розбігаються, колір полум'я визначають за киснем.

### Приклад розв'язання задачі

Визначити колір дифузійного полум'я пропіонового ангідриду C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>3</sub>.  
Розв'язання

1. Розраховуємо молярну масу горючої речовини:

$$\mu_{гр} = n_{\text{C}} \cdot 12 + n_{\text{H}} \cdot 1 + n_{\text{O}} \cdot 16 = 6 \cdot 12 + 10 \cdot 1 + 3 \cdot 16 = 130 \text{ кг·кмоль}^{-1}.$$

2. Розраховуємо відсоток кисню та карбону у складі горючої речовини за формулами (1.1, 1.2):

$$\text{вміст О:} \quad \varphi_{\text{O}} = \frac{3 \cdot 16 \cdot 100}{130} = 36,9 \% ;$$

$$\text{вміст С:} \quad \varphi_{\text{C}} = \frac{6 \cdot 12 \cdot 100}{130} = 55,4 \% .$$

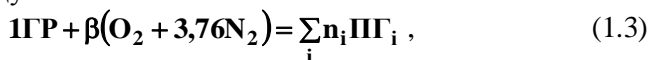
3. Згідно таблиці 1.1 колір дифузійного полум'я: вміст О – від 25 до 50 %, вміст С – від 50 до 75 %, отже дифузійне полум'я буде яскравим, без кіптяви.

## § 2. Складання рівняння реакції горіння індивідуальної речовини

Горіння – основне явище під час пожежі. За своєю сутністю це фізико-хімічний процес, в основі якого лежить швидка реакція окиснення, що протікає при контакті горючої речовини та окисника з утворенням продуктів горіння та виділенням великої кількості енергії. Горіння під час пожежі здійснюється у повітряному середовищі. З горючою речовиною взаємодіє тільки кисень, інші компоненти повітря, що потрапляють до зони горіння, в хімічні реакції не вступають, але беруть участь у процесі тепломасообміну, тому при складанні реакції горіння слід враховувати їх наявність [2, 3].

Відомо, що повітря має приблизно наступний склад: кисню – 21 %, азоту, діоксиду карбону та інших інертних газів у сумі – 79 %. Отже, на один об'єм кисню у повітрі припадає  $79/21 = 3,76$  об'єму азоту або на один моль кисню – 3,76 моль азоту. Інколи, з урахуванням вологості повітря, вважають, що на один моль кисню припадає 3,84 моль азоту. Зазвичай, у рівнянні реакції горіння склад повітря позначають як  $(\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2)$ .

Вважаємо, що повітря в зону реакції надходить у кількості, достатній для повного згорання одного моля горючої речовини (ГР). При цьому утворюються тільки продукти повного згорання (ПГ). Тоді рівняння реакції горіння набуває загального вигляду:



де  $n_i$  – число моль продуктів горіння  $i$ -го типу ( $\text{ПГ}_i$ ), моль;  $\beta$  – *стехіометричний коефіцієнт*, який показує число моль кисню, необхідного для повного згорання одного моля горючої речовини.

Стехіометричний коефіцієнт  $\beta$  можна визначити розрахунком:

$$\beta = n_{\text{C}} + n_{\text{S}} + \frac{n_{\text{H}} - n_{\text{X}}}{4} - \frac{n_{\text{O}}}{2} + \frac{5n_{\text{P}}}{4} , \quad (1.4)$$

де  $n_{\text{C}}$ ,  $n_{\text{H}}$ ,  $n_{\text{O}}$ ,  $n_{\text{P}}$ ,  $n_{\text{S}}$ ,  $n_{\text{X}}$  – число атомів карбону, водню, кисню, фосфору, сульфуру, галогену у складі горючої речовини.

За умови зміни концентрації компонентів суміші змінюється швидкість хімічної реакції. Максимального значення швидкість реакції набуває за еквівалентного співвідношення компонентів, коли реакція відбувається цілком

без надлишку або нестачі речовин, що реагують. Це співвідношення визначається стехіометричними коефіцієнтами у рівнянні реакції.

Концентрацію горючої речовини, що відповідає рівнянню реакції горіння, називають *стехіометричною*. Стехіометрична концентрація може бути визначена як у відсотках (об'ємна  $\varphi_{\text{СТМ}}$ ), так і у грамах речовини, що міститься в одному кубічному метрі горючої суміші (масова  $\varphi'_{\text{СТМ}}$ ).

Розрахунок стехіометричної концентрації здійснюють за реакцією горіння (1.3). Горюча суміш складається з одного моля горючої речовини та  $\beta \cdot (1 + 3,76)$  моль повітря, тому загальна кількість вихідної горючої суміші становить  $(1 + \beta \cdot 4,76)$  моль. Загальне число моль горючої суміші приймаємо за 100 % і знаходимо відсоток горючої речовини у вихідній суміші із пропорції:

$$\frac{(1 + \beta \cdot 4,76) \text{ моль} - 100 \%}{1 \text{ моль} - \varphi_{\text{СТМ}} \%}.$$

Загальна формула для розрахунку стехіометричної концентрації в об'ємних відсотках має вигляд:

$$\varphi_{\text{СТМ}} = \frac{100}{1 + \beta \cdot 4,76}, \%; \quad (1.5)$$

у разі горіння у середовищі кисню розрахунок проводять за формулою:

$$\varphi_{\text{СТМ}} = \frac{100}{1 + \beta}, \%. \quad (1.6)$$

При розрахунку масової стехіометричної концентрації парів або газів враховують співвідношення між масою й об'ємом моля речовини за формулою:

$$\varphi'_{\text{СТМ}} = 10 \varphi_{\text{СТМ}} \frac{\mu_{\text{ГР}}}{V_{\mu}}, \text{ Г} \cdot \text{М}^{-3}, \quad (1.7)$$

або безпосередньо з рівняння реакції горіння у повітрі:

$$\varphi'_{\text{СТМ}} = \frac{1000 \mu_{\text{ГР}}}{(1 + 4,76\beta) V_{\mu}}, \text{ Г} \cdot \text{М}^{-3}; \quad (1.8)$$

за умови горіння у середовищі кисню:

$$\varphi'_{\text{СТМ}} = \frac{1000 \mu_{\text{ГР}}}{(1 + \beta) V_{\mu}}, \text{ Г} \cdot \text{М}^{-3}, \quad (1.9)$$

де  $\mu_{\text{ГР}}$  – молярна маса горючої речовини,  $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ;  $V_{\mu}$  – об'єм одного кіломоля газу за даних умов,  $\text{м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ; розраховують за формулою:

$$V_{\mu} = 22,4 \cdot \frac{101,3 \cdot T}{273 \cdot P}. \quad (1.10)$$

За нормальних умов ( $T = 273 \text{ К}$ ,  $P = 101,3 \text{ кПа}$ )  $V_{\mu} = 22,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ; за стандартних умов ( $T = 298 \text{ К}$ ,  $P = 101,3 \text{ кПа}$ )  $V_{\mu} = 24,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$ .

### **Практичне значення складання рівняння реакції і визначення стехіометричної концентрації**

1. Рівняння реакції горіння речовин є основою для розрахунку матеріального та енергетичного балансу процесу горіння.

2. Складання рівняння реакції використовують при визначенні найважливіших параметрів пожежної небезпеки речовин, а саме теплоти згоряння, концентраційних меж поширення полум'я, стехіометричної концентрації, температури горіння, температури та максимального тиску при вибуху, температурних меж поширення полум'я.

3. Стехіометрична концентрація горючої речовини визначає умови найкращого згоряння речовини. За цих умов параметри горіння набувають найбільш небезпечних значень: температура самоспалахування речовини є найменшою, температура горіння, тиск вибуху, витрата вогнегасних речовин для гасіння пожежі – найбільшими.

### **Методика складання рівняння реакції горіння**

1. Рівняння складають на 1 моль горючої речовини, тому при складанні реакцій горіння можуть застосовуватися і дробові коефіцієнти.

2. Як окисник виступає повітря, склад якого приймають ( $O_2 + 3,76N_2$ ).

3. Горюча речовина й повітря знаходяться у стехіометричному співвідношенні, відповідно до формули (1.3).

4. При складанні рівняння реакції горіння вважають, що утворюються тільки продукти повного згоряння. Якісний склад продуктів горіння визначають, враховуючи елементний склад горючої речовини, відповідно до табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Продукти, які утворюються у процесі горіння залежно від складу горючої речовини

<b>Елемент горючої речовини</b>	<b>Продукт, що утворюється у процесі горіння</b>
карбон С	оксид карбону (IV) $CO_2$
гідроген Н	вода $H_2O$
сульфур S	оксид сульфору (IV) $SO_2$
фосфор Р	оксид фосфору (V) $P_2O_5$
силіцій Si	оксид силіцію (IV) $SiO_2$
метал	оксид металу
нітроген N	молекулярний азот $N_2$
галогени (F, Cl, Br, I)	галоген гідрогену (HF, HCl, HBr, HI)
кислород О	переходить до складу продуктів горіння

Галоген гідрогену утворюється внаслідок взаємодії галогенів з атомами гідрогену, що входять до складу горючої речовини. Якщо атомів галогену більше, ніж гідрогену, то утворюється молекулярний галоген.

Найважливий у горючій речовині кисень також вступає до реакції окиснення подібно до кисню повітря, що зменшує потребу в повітрі для горіння.

5. Для правильного складання рівняння реакції горіння, проставляючи коефіцієнти у правій частині рівняння, потрібно спочатку зрівняти число молей карбону, після цього сульфору, фосфору та силіцію, потім урівнюють число молей галогенів, після цього – водню. Останніми урівнюють число молей кисню та нітрогену у правій та лівій частинах рівняння.

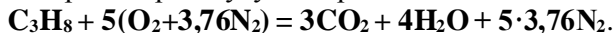
6. Для полегшення розрахунку стехіометричного коефіцієнта  $\beta$  можна скористатися формулою (1.4).

### **Приклад розв'язання задачі**

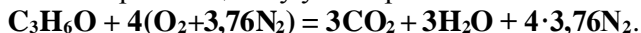
Скласти рівняння реакції горіння у повітрі для органічних сполук різних гомологічних класів.

#### *Розв'язання*

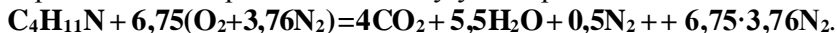
Вуглеводні: горіння пропану у повітрі:



Оксигенвмісні: горіння ацетону у повітрі:



Нітрогенвмісні: горіння діетиламіну у повітрі:



Сульфурвмісні: горіння тіофену у повітрі:



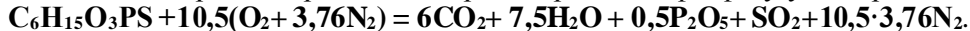
Фосфоровмісні: горіння фосфористого водню у повітрі:



Галогеновмісні: горіння дихлоретану у повітрі:



Елементоорганічні речовини: горіння триетилтіофосфату у повітрі:



### **Методика розрахунку стехіометричної концентрації горючої речовини**

1. Скласти рівняння реакції горіння, визначити значення стехіометричного коефіцієнта реакції горіння  $\beta$ .

2. Розрахувати об'ємну стехіометричну концентрацію за формулою (1.5), якщо реакція відбувається у повітряному середовищі, або за формулою (1.6), якщо реакція відбувається у кисні.

3. Розрахувати молярну масу горючої речовини та молярний об'єм газу за даних умов за формулою (1.10).

4. Розрахувати масову стехіометричну концентрацію за формулою (1.8).

**Приклад розв'язання задачі**

Визначити об'ємну та масову стехіометричну концентрацію етилового спирту  $C_2H_6O$  в суміші з повітрям за стандартних умов.

*Розв'язання*

1. Складасмо рівняння реакції горіння етилового спирту у повітрі, визначаємо стехіометричний коефіцієнт  $\beta$ :



2. Розраховуємо об'ємну стехіометричну концентрацію горючої речовини у суміші з повітрям за формулою (1.5):

$$\varphi_{стм} = \frac{100}{1 + 3 \cdot 4,76} = 6,54 \%$$

3. Розраховуємо молярну масу горючої речовини:

$$\mu_{гр} = n_C \cdot 12 + n_H \cdot 1 + n_O \cdot 16 = 2 \cdot 12 + 6 \cdot 1 + 1 \cdot 16 = 46 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}.$$

4. Визначаємо масову стехіометричну концентрацію етанолу (молярний об'єм газу за стандартних умов дорівнює  $V_{\mu} = 24,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ):

$$\varphi'_{стм} = \frac{1000 \cdot 46}{(1 + 3 \cdot 4,76) \cdot 24,4} = 123,3 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}.$$

Висновок: стехіометрична концентрація етилового спирту в суміші з повітрям за стандартних умов дорівнює 6,54 % або  $123,3 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$ .

**§ 3. Розрахунок матеріального балансу процесу горіння**

*Матеріальний баланс* реакції горіння відображає закон збереження маси речовини: маса речовин, що вступила у реакцію, дорівнює масі речовин, які утворилися під час реакції. Розрахунок матеріального балансу дозволяє визначити витрату повітря на горіння, об'єм і склад продуктів горіння, температуру горіння й температуру вибуху, максимальний тиск вибуху, температуру пожежі, інтенсивність газообміну та інші параметри, що визначають характер розвитку пожежі [2, 3].

При розв'язанні багатьох практичних задач важливо знати об'єм повітря, необхідний для повного згоряння певної маси чи об'єму горючої речовини, об'єм продуктів горіння та їх відсотковий склад.

*Продукти горіння* – це газоподібні, тверді та рідкі речовини, що утворюються при взаємодії окисника з горючою речовиною у процесі горіння.

Склад продуктів горіння залежить від складу горючої речовини та умов протікання реакції горіння. До продуктів горіння переходять і нейтральні домішки, що знаходилися у вихідній суміші, й частина горючої речовини або окисника, які не брали участь у реакції. Загалом продукти згоряння утворюють систему, що зветься димом.

*Дим* – це дисперсна система, що складається з твердих і рідких частинок розміром  $10^{-5} \div 10^{-8}$  м (дисперсної фази), завислих у газовому дисперсійному середовищі. Саме тверді та рідкі продукти горіння зумовлюють непрозорість диму.

Непрозорий дим утворюють і продукти попереднього розкладання, які є найбільш токсичними й небезпечними. За статистикою, 70 % загиблих під час пожежі постраждали через отруєння токсичними продуктами горіння та продуктами термічного розкладання речовин.

За умови повного окиснення горючої речовини утворюються *продукти повного згорання* ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  і т.і.). За умови нестачі кисню у складі горючої суміші утворюються *продукти неповного згорання* ( $\text{C}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4\text{O}$ ). До складу продуктів неповного згорання відносяться продукти термоокислювального розкладання (піролізу), який відбувається внаслідок нагрівання горючих речовин випромінюванням полум'я та гарячими продуктами горіння. При цьому можуть утворюватися спирти, альдегіди, кетони,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HCN}$  та ін.

Більшість продуктів повного згорання є *хімічно інертними* речовинами, тобто за умов пожежі не здатні до подальших хімічних перетворень. Деякі продукти повного згорання є *реакційноздатними*, тобто можуть вступати у подальші реакції. Наприклад,  $\text{HCl}$  може вступати у реакцію обміну, а продукти неповного згорання здатні доокислюватися за високих температур навколишнього середовища.

Під час утворення продукти горіння набувають високу температуру ( $T_{\text{гор}}$ ), тому відбувається їх температурне розширення. Об'єм продуктів горіння за даних умов можна визначити з універсального газового закону:

$$V_{\text{пг}}^{\text{Тгор}} = \frac{V_{\text{пг}}^{\text{Т}_0} T_{\text{гор}} P_0}{T_0 P_{\text{пг}}}, \text{ м}^3. \quad (1.11)$$

*Небезпека диму* зумовлена його високою температурою, токсичністю, зниженим вмістом кисню, непрозорістю, можливістю утворення у закритих приміщеннях продуктами термоокислювального розкладу та неповного згорання вибухонебезпечних сумішей із повітрям. Для зниження небезпеки диму використовують розпорошені струмені води (зниження температури та осадження диму) та видалення диму за допомогою димососів і димових люків.

Для визначення теоретичних показників матеріального балансу складають рівняння реакції горіння речовини (1.3), на основі якого розраховують об'єми повітря, необхідного для повного згорання горючої речовини, і продуктів горіння, що утворюються при цьому.

Розрізняють *питому* та *повну, теоретичну* та *дійсну* кількість (об'єм) продуктів горіння, що утворюються, та кількість повітря, що витрачається на згорання горючої речовини.

*Питома* кількість повітря – кількість повітря, необхідна для згорання одиниці кількості горючої речовини (1 моль,  $1 \text{ м}^3$ , 1 кг).

*Повна* кількість повітря – кількість повітря, необхідна для згорання певної кількості горючої речовини.

*Теоретична* кількість повітря – мінімальна кількість повітря, необхідна для повного згорання горючої речовини.

*Дійсна* кількість повітря – кількість повітря, яка надходить для згорання горючої речовини за даних умов.

За рівнянням реакції визначають *питоме теоретичне число молів повітря*. Це кількість повітря в молях, необхідна для повного згорання 1 моля речовини і яку визначають за рівнянням реакції:

$$n_{\text{пов}}^0 = (1 + 3,76) \cdot \beta = 4,76\beta, \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1} \quad (1.12)$$

де  $\beta$  – стехіометричний коефіцієнт, який показує число молів кисню, необхідного для повного згорання одного моля горючої речовини.

*Питоме теоретичне число молів продуктів горіння* дорівнює сумі молів усіх продуктів згорання у рівнянні реакції горіння (1.3):

$$n_{\text{пр}}^0 = \sum_i n_{\text{пр}i}, \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (1.13)$$

У дійсності, число молів повітря, що надходить у зону горіння, відрізняється від теоретичного. Таку кількість повітря, що фактично надходить для згорання 1 моля горючої речовини, називають *питомим дійсним числом молів повітря* і позначають  $n_{\text{пов}}$ .

Ступінь забезпеченості повітрям процесу горіння описують поняттям *коефіцієнт надлишку повітря* ( $\alpha$ ), який показує, у скільки разів кількість повітря, що дійсно надходить до зони горіння, відрізняється від теоретично необхідної кількості повітря для повного згорання горючої речовини:

$$\alpha = \frac{n_{\text{пов}}}{n_{\text{пов}}^0}, \quad (1.14)$$

де  $n_{\text{пов}}^0$  – питоме теоретичне число молів повітря, необхідне для повного згорання 1 моля горючої речовини;  $n_{\text{пов}}$  – питоме дійсне число молів повітря, що дійсно надходить до зони реакції при згорянні 1 моля горючої речовини.

Отже, питоме дійсне число молів повітря дорівнює:

$$n_{\text{пов}} = n_{\text{пов}}^0 \cdot \alpha, \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (1.15)$$

Різницю між кількістю повітря, що дійсно витрачається на горіння, і теоретично необхідною, називають *надлишком повітря*:

$$\Delta n_{\text{пов}} = n_{\text{пов}} - n_{\text{пов}}^0 = n_{\text{пов}}^0 (\alpha - 1), \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (1.16)$$

Це та частина повітря, яка не витрачається під час горіння і переходить у продукти горіння. Дійсне питоме число молів продуктів горіння буде більшим за теоретичне число молів на величину надлишку повітря:

$$n_{\text{пр}} = n_{\text{пр}}^0 + \Delta n_{\text{пов}} \text{ або } n_{\text{пр}} = n_{\text{пр}}^0 + n_{\text{пов}}^0 (\alpha - 1), \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (1.17)$$

Наявність надлишку повітря зумовлює наявність у продуктах горіння кисню, що не прореагував, і азоту, який перейшов із надлишком повітря. Вміст кожного продукту горіння можна визначити за формулами:



$$\varphi_{\text{пг}_i} = 100 \frac{n_{\text{пг}_i}}{n_{\text{пг}}}, \% ; \quad (1.18)$$

$$\varphi_{\text{O}_2} = 100 \frac{(\alpha - 1)\beta}{n_{\text{пг}}}, \% ; \quad (1.19)$$

$$\varphi_{\text{N}_2} = 100 \frac{\alpha \cdot 3,76\beta}{n_{\text{пг}}}, \% . \quad (1.20)$$

Розрахунок матеріального балансу процесу горіння здійснюється на основі рівняння реакції горіння і полягає у визначенні числа молів повітря, необхідного для повного згоряння 1 моля горючої речовини, і кількості молів продуктів горіння, які утворюються при цьому.

На практиці кількість речовини вимірюють не в молях, а в  $\text{м}^3$ , якщо це газ, або в кг, якщо речовина знаходиться в конденсованому стані (рідина чи твердий матеріал). Отже, при розрахунках матеріального балансу процесу горіння необхідно врахувати агрегатний стан горючої речовини. Треба пам'ятати, що 1 кмоль газу за даних температури  $T$  і тиску  $P$  займає об'єм  $V_{\mu}$ ,  $\text{м}^3$ , який можна розрахувати за формулою (1.10).

Якщо горить газ, то на 1 кмоль горючої речовини, що займає об'єм  $V_{\mu}^{\text{ГР}}$ ,  $\text{м}^3$ , витрачається теоретичний об'єм повітря:  $n_{\text{пов}}^0 V_{\mu}^{\text{пов}}$ ,  $\text{м}^3$ . Тоді питомий (на 1  $\text{м}^3$  горючої речовини) теоретичний об'єм повітря визначає пропорція:

$$V_{\mu}^{\text{ГР}} \text{ м}^3 \text{ ГР} \rightarrow n_{\text{пов}}^0 V_{\mu}^{\text{пов}} = 4,76\beta V_{\mu}^{\text{пов}} \text{ м}^3 \text{ повітря,}$$

$$1 \text{ м}^3 \text{ ГР} \rightarrow v_{\text{пов}}^0 \text{ м}^3 \text{ повітря.}$$

Відповідно питомий теоретичний об'єм повітря, необхідний для повного згоряння одного кубічного метра горючого газу, дорівнює:

$$v_{\text{пов}}^0 = \frac{4,76 \cdot \beta \cdot V_{\mu}^{\text{пов}}}{V_{\mu}^{\text{ГР}}}, \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}. \quad (1.21)$$

Якщо горюча речовина знаходиться за тих саме умов, що і повітря, то  $V_{\mu}^{\text{ГР}} = V_{\mu}^{\text{пов}}$ , тоді для горіння 1  $\text{м}^3$  газу або пари розрахунок питомих теоретичних і дійсних об'ємів співпадає з розрахунком відповідного числа молів:

$$v_{\text{пов}}^0 = 4,76\beta, \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}; \quad (1.22)$$

$$v_{\text{пов}} = \alpha v_{\text{пов}}^0, \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}. \quad (1.23)$$

Якщо горюча речовина та продукти горіння знаходяться за однакових умов, то так само можна розрахувати питомі об'єми продуктів горіння:

$$v_{\text{пг}}^0 = \sum_i n_{\text{пг}_i}^0, \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}; \quad (1.24)$$

$$v_{\text{пг}} = v_{\text{пг}}^0 + (\alpha - 1)v_{\text{пов}}^0, \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}. \quad (1.25)$$

Повні об'єми повітря і продуктів горіння визначають як добуток їх питомого об'єму на об'єм газу, що згорів  $V_{гр}$ :

$$V_{пов} = v_{пов} V_{гр}, \text{ м}^3; \quad (1.26)$$

$$V_{пг} = v_{пг} V_{гр}, \text{ м}^3. \quad (1.27)$$

За умови гомогенного горіння речовин, що знаходяться у рідкому чи твердому агрегатному стані, відбувається попередній перехід цих речовин до газоподібної фази.

Під час горіння 1 кіломоля конденсованої горючої речовини, що важить  $\mu$  кг, витрачається теоретичний об'єм повітря, рівний  $n_{пов}^0 V_{\mu}^{пов}$ ,  $\text{м}^3$ . Тоді питомий теоретичний об'єм повітря, необхідний для згорання одного кілограма горючої речовини, визначають з пропорції:

$$\mu \text{ кг ГР} \rightarrow n_{пов}^0 \cdot V_{\mu}^{пов} = 4,76\beta V_{\mu}^{пов} \text{ м}^3 \text{ повітря,}$$

$$1 \text{ кг ГР} \rightarrow v_{пов}^0 \text{ м}^3 \text{ повітря,}$$

$$v_{пов}^0 = n_{пов}^0 \frac{V_{\mu}^{пов}}{\mu_{гр}}, \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}. \quad (1.28)$$

За аналогією питомий теоретичний об'єм продуктів горіння буде:

$$v_{пг}^0 = \frac{V_{пг}}{\mu_{гр}} \sum_i n_{пг}, \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}, \quad (1.29)$$

а також дійсні об'єми повітря та продуктів згорання за формулами, аналогічними (1.23) та (1.25):

$$V_{пов} = \alpha \cdot v_{пов}^0, \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1},$$

$$V_{пг} = v_{пг}^0 + (\alpha - 1)v_{пов}^0, \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

Для визначення повних об'ємів повітря та продуктів горіння необхідно питомі об'єми помножити на масу речовини, що згоріла:

$$V_{пов} = v_{пов} m_{гр}, \text{ м}^3, \quad (1.30)$$

$$V_{пг} = v_{пг} m_{гр}, \text{ м}^3, \quad (1.31)$$

де  $m_{гр}$  – маса речовини, що згоріла, кг.

### *Практичне значення розрахунку матеріального балансу*

Розрахунок матеріального балансу дозволяє визначити витрату повітря на горіння, об'єм і склад продуктів горіння, температуру горіння і температуру вибуху, максимальний тиск вибуху, температуру пожежі, інтенсивність газообміну та інші параметри розвитку пожежі за різних умов.

### § 3.1 Розрахунок матеріального балансу процесу горіння індивідуальної речовини

#### Методика розрахунку матеріального балансу горіння індивідуальної речовини

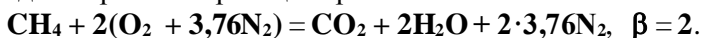
1. Скласти рівняння реакції горіння (1.3), визначити стехіометричний коефіцієнт  $\beta$  (1.4).
2. Розрахувати питоме теоретичне число молів повітря за формулою (1.12).
3. Розрахувати питоме теоретичне число молів продуктів горіння за формулою (1.13).
4. За умови горіння з надлишком повітря розрахувати дійсне питоме число молів повітря та продуктів горіння за формулами (1.15), (1.17).
5. Розрахувати склад продуктів горіння у відсотках за формулами (1.15)–(1.17).
6. Розрахувати питомий теоретичний об'єм повітря та продуктів горіння залежно від агрегатного стану горючої речовини.
  - 6.1. Якщо горюча речовина – газ, провести розрахунок за формулами (1.22) та (1.24).
  - 6.2. Якщо горюча речовина знаходиться у твердому або рідкому стані, провести розрахунок за формулами (1.28) та (1.29).
7. Розрахувати дійсні об'єми повітря та продуктів горіння за формулами (1.23) та (1.25).
8. Розрахувати повні об'єми повітря та продуктів горіння за формулами (1.26) та (1.27) або (1.30) та (1.31).
9. Розрахувати об'єм продуктів горіння за температури горіння  $V_{\text{пр}}^{\text{T}_{\text{гор}}}$  за формулою (1.11).

#### Приклад розв'язання задачі

Розрахувати об'єм повітря, об'єм і склад продуктів горіння при згорянні  $10 \text{ м}^3$  метану  $\text{CH}_4$ , якщо горіння протікає за нормальних умов з коефіцієнтом надлишку повітря  $\alpha = 1,2$ . Температура продуктів горіння дорівнює  $1200 \text{ К}$ .

#### Розв'язання

1. Складаємо рівняння реакції горіння:



2. Визначаємо питоме теоретичне число молів повітря:

$$n_{\text{пов}}^0 = 4,76\beta = 4,76 \cdot 2 = 9,52 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. Розраховуємо питоме теоретичне число молів продуктів горіння:

$$n_{\text{пр}}^0 = n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + \beta \cdot 3,76 = 1 + 2 + 2 \cdot 3,76 = 10,52 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

4. Розраховуємо дійсне питоме число молів повітря та продуктів горіння

за формулами з урахуванням надлишку повітря:

$$n_{\text{пов}} = 1,2 \cdot 9,52 = 11,42 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$n_{\text{пр}} = 10,52 + (1,2 - 1) \cdot 9,52 = 12,42 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

5. Визначаємо відсотковий склад продуктів горіння:

$$\varphi_{\text{CO}_2} = 100 \frac{1}{12,42} = 8,05\%;$$

$$\varphi_{\text{H}_2\text{O}} = 100 \frac{2}{12,42} = 16,1\%;$$

$$\varphi_{\text{O}_2} = \frac{(1,2 - 1) \cdot 2 \cdot 100}{12,42} = 3,21\%;$$

$$\varphi_{\text{N}_2} = \frac{1,2 \cdot 2 \cdot 3,76 \cdot 100}{12,42} = 72,64\%.$$

6. Оскільки горюча речовина – газ, визначаємо питомі теоретичні об'єми повітря та продуктів горіння за формулами (1.22) та (1.24):

$$v^0_{\text{пов}} = 9,52 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3};$$

$$v^0_{\text{пр}} = 10,52 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}.$$

7. Розраховуємо питомі дійсні об'єми повітря та продуктів горіння з урахуванням коефіцієнта надлишку повітря за формулами (1.23) та (1.25):

$$v_{\text{пов}} = 11,42 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3};$$

$$v_{\text{пр}} = 12,42 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}.$$

8. Розраховуємо повні об'єми повітря і продуктів горіння:

$$V_{\text{пов}} = v_{\text{пов}} V_{\text{гр}} = 11,42 \cdot 10 = 114,2 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{пр}} = v_{\text{пр}} V_{\text{гр}} = 12,42 \cdot 10 = 124,2 \text{ м}^3.$$

9. Розраховуємо об'єм продуктів горіння за температури горіння:

$$V_{\text{пр}}^{\text{Тгор}} = \frac{124,2 \cdot 1200 \cdot 101,3}{273 \cdot 101,3} = 545,9 \text{ м}^3.$$

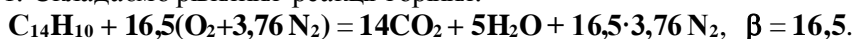
Висновок: для згорання  $10 \text{ м}^3$  метану за нормальних умов необхідно  $114,2 \text{ м}^3$  повітря, об'єм продуктів горіння за температури  $1200 \text{ К}$  буде дорівнювати  $545,9 \text{ м}^3$ . Склад продуктів горіння такий:  $\text{CO}_2$  – 8,05 %;  $\text{H}_2\text{O}$  – 16,1 %;  $\text{O}_2$  – 3,2 %;  $\text{N}_2$  – 72,64 %.

### *Приклад розв'язання задачі*

Розрахувати об'єми повітря, продуктів горіння і відсотковий вміст  $\text{CO}_2$  при згоранні  $2 \text{ кг}$  нафталіну  $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$ , якщо горіння відбувалось за температури навколишнього середовища  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ , тиску повітря  $100,0 \text{ кПа}$ ; коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha = 1,8$ , температура продуктів горіння дорівнює  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### *Розв'язання*

1. Складаємо рівняння реакції горіння:



2. Розраховуємо питоме теоретичне число молів повітря за формулою (1.12):

$$n_{\text{пов}}^0 = 4,76 \cdot 16,5 = 78,54 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. Розраховуємо питоме теоретичне число молів продуктів горіння за формулою (1.13):

$$n_{\text{пр}}^0 = n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + \beta \cdot 3,76 = 14 + 5 + 16,5 \cdot 3,76 = 81,0$$

4. Розраховуємо питоме дійсне число молів повітря та продуктів горіння за формулами (1.15), (1.17) з урахуванням надлишку повітря:

$$n_{\text{пов}} = \alpha \cdot n_{\text{пов}}^0 = 1,8 \cdot 78,54 = 141,4 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$n_{\text{пр}} = n_{\text{пр}}^0 + (\alpha - 1)n_{\text{пов}}^0 = 81,04 + (1,8 - 1)78,54 = 143,9 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

5. Розраховуємо відсотковий вміст  $\text{CO}_2$  у складі продуктів горіння:

$$\varphi_{\text{CO}_2} = 100 \frac{14}{143,9} = 9,7 \%$$

6. Розраховуємо питомі теоретичні об'єми повітря та продуктів горіння. Оскільки горюча речовина знаходиться у твердому стані, розрахунок проводимо за формулами (1.28) і (1.29). Спочатку визначаємо молярну масу нафтаїну та молярний об'єм повітря за даних умов (формула (1.10)):

$$\mu_{\text{гр}} = 14 \cdot 12 + 10 \cdot 1 = 178 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1},$$

$$V_{\mu} = \frac{101,3 \cdot 22,4 \cdot (273 + 10)}{100,0 \cdot 273} = 23,53 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}.$$

$$v_{\text{пов}}^0 = \frac{4,76 \cdot 16,5 \cdot 23,53}{178} = 10,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1};$$

$$v_{\text{пр}}^0 = \frac{(14 + 5 + 16,5 \cdot 3,76) \cdot 23,53}{178} = 10,7 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

7. Розраховуємо питомі дійсні об'єми повітря та продуктів горіння з урахуванням коефіцієнта надлишку повітря аналогічно до формул (1.23) і (1.25):

$$v_{\text{пов}} = 1,8 \cdot 10,4 = 18,7 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1};$$

$$v_{\text{пр}} = 10,7 + (1,8 - 1) \cdot 10,4 = 19,0 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

8. Розраховуємо повні об'єми повітря і продуктів горіння за даних умов:

$$V_{\text{пов}} = 18,7 \cdot 2 = 37,4 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{пр}} = 19,0 \cdot 2 = 38,0 \text{ м}^3.$$

9. Розраховуємо об'єм продуктів горіння за температури горіння:

$$V_{\text{пр}}^{\text{Tгор}} = \frac{38,0 \cdot (273 + 900)}{(273 + 10)} = 157,6 \text{ м}^3.$$

Висновок: для згорання двох кілограмів нафтаїну за даних умов необхідно  $37,4 \text{ м}^3$  повітря, при цьому продукти горіння займають об'єм  $157,6 \text{ м}^3$ , а вміст  $\text{CO}_2$  у продуктах горіння дорівнює  $9,7 \%$ .

### § 3.2 Розрахунок матеріального балансу процесу горіння складних речовин та матеріалів

#### § 3.2.1. Горіння суміші газів

При розрахунку матеріального балансу процесу горіння суміші газів спочатку визначають об'єми повітря і продуктів згорання для кожного горючого компонента цієї суміші. Потім, відповідно до об'ємного вмісту компонентів, визначають об'єм повітря і продуктів згорання суміші газів.

Питомий теоретичний об'єм повітря, необхідний для повного згорання газової суміші відомого складу, розраховують за формулою:

$$v_{\text{пов}}^0 = \frac{\sum_i \beta_i \varphi_i - \varphi_{\text{O}_2}}{21}, \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}, \quad (1.32)$$

де  $\varphi_i$  – відсотковий вміст  $i$ -го горючого компонента в суміші, %;  $\beta_i$  – стехіометричний коефіцієнт у рівнянні реакції горіння  $i$ -го горючого компонента суміші;  $\varphi_{\text{O}_2}$  – відсотковий вміст кисню у вихідній суміші, %.

Для визначення об'єму та складу продуктів горіння, що утворюються при згорянні суміші газів, необхідно визначити об'єми і склад продуктів горіння кожного компонента горючої суміші, згідно з рівняннями реакції горіння. Питомий теоретичний об'єм продуктів згорання, за умови горіння суміші газів, визначають як суму питомих об'ємів продуктів горіння газової суміші:

$$v_{\text{пр}}^0 = \sum_{i=1}^n v_{\text{пр}i}^0 \cdot r_i, \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}, \quad (1.33)$$

де  $r_i = \frac{\varphi_i}{100}$  – об'ємна частка  $i$ -го горючого компонента у суміші;  $v_{\text{пр}i}^0$  – питомий теоретичний об'єм  $i$ -го продукту горіння, що утворюється при згорянні кожного горючого компонента суміші.

Для спрощення розрахунків матеріального балансу складних сумішей горючих газів у таблиці 1.5 подані розраховані значення питомих об'ємів продуктів згорання окремих горючих газів, які чисельно дорівнюють їх стехіометричним коефіцієнтам у рівнянні реакції горіння.

#### **Методика визначення об'єму повітря та продуктів горіння за умови повного згорання суміші газів**

1. Скласти рівняння реакції горіння кожного із горючих компонентів газової суміші і визначити стехіометричний коефіцієнт  $\beta$ .

2. Розрахувати питомий теоретичний об'єм повітря, необхідний для повного згорання газової суміші за формулою (1.32).

3. Розрахувати питомий дійсний об'єм повітря з урахуванням коефіцієнта надлишку повітря за формулою (1.23).
4. Розрахувати повний дійсний об'єм повітря, що витрачається за умови згоряння заданого об'єму газової суміші, за формулою (1.26).
5. Для полегшення подальших розрахунків скласти таблицю для визначення питомих об'ємів продуктів горіння, виходячи з об'ємних часток компонентів вихідної газової суміші, за допомогою табл. 1.5.

Таблиця 1.5 – Питомі об'єми продуктів згоряння деяких газів

Газ		Об'єм продукту згоряння, $\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$			
назва	формула	$\text{CO}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{N}_2$	$\text{SO}_2$
водень	$\text{H}_2$	–	1,0	1,88	–
оксид карбону (II)	$\text{CO}$	1,0	–	1,88	–
сірководень	$\text{H}_2\text{S}$	–	1,0	5,64	1,0
метан	$\text{CH}_4$	1,0	2,0	7,52	–
ацетилен	$\text{C}_2\text{H}_2$	2,0	1,0	9,40	–
етан	$\text{C}_2\text{H}_6$	2,0	3,0	13,16	–
етилен	$\text{C}_2\text{H}_4$	2,0	2,0	11,28	–
пропан	$\text{C}_3\text{H}_8$	3,0	4,0	18,80	–
бутан	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	4,0	5,0	24,40	–
пентан	$\text{C}_5\text{H}_{12}$	5,0	6,0	30,08	–

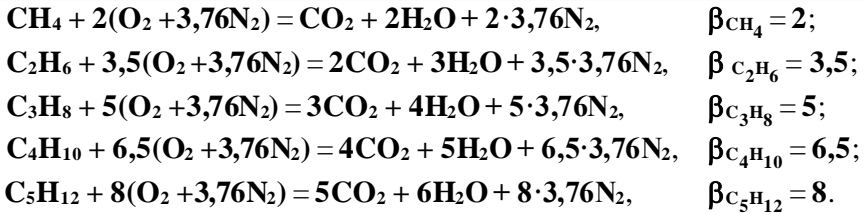
6. Розрахувати питомий теоретичний об'єм продуктів горіння за умови згоряння суміші газів за формулою (1.33).
7. Розрахувати питомий та повний дійсні об'єми продуктів горіння з урахуванням коефіцієнта надлишку повітря за формулою (1.25, 1.27).
8. Розрахувати об'єм продуктів горіння за даних умов за формулою (1.11).

### *Приклад розв'язання задачі*

Визначити об'єм повітря і об'єм продуктів горіння, що утворюються за умови згоряння  $10 \text{ м}^3$  супутнього газу такого складу: метан  $\text{CH}_4$  – 58 %, етан  $\text{C}_2\text{H}_6$  – 7,2 %, пропан  $\text{C}_3\text{H}_8$  – 5,8 %, бутан  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  – 7,0 %, пентан  $\text{C}_5\text{H}_{12}$  – 8,5 %, оксид карбону(IV)  $\text{CO}_2$  – 3 %, азот  $\text{N}_2$  – 10,5 %. Горіння відбувається із коефіцієнтом надлишку повітря  $\alpha = 1,7$ ; температура горіння дорівнює  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### *Розв'язання*

1. Складаємо рівняння реакцій горіння та визначаємо стехіометричні коефіцієнти для кожного горючого компонента газової суміші:



2. Розраховуємо питомий теоретичний об'єм повітря, необхідний для повного згорання суміші:

$$v_{\text{пов}}^0 = \frac{(2 \cdot 58 + 3,5 \cdot 7,2 + 5 \cdot 5,8 + 6,5 \cdot 7 + 8 \cdot 5,8)}{21} = 12,5 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}.$$

3. Розраховуємо питомий дійсний об'єм повітря з урахуванням коефіцієнта надлишку повітря:

$$v_{\text{пов}} = 1,7 \cdot 12,5 = 21,25 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}.$$

4. Розраховуємо повний дійсний об'єм повітря для даної кількості газу:

$$V_{\text{пов}} = 21,25 \cdot 10 = 212,5 \text{ м}^3.$$

5. Визначаємо питомі теоретичні об'єми продуктів горіння, виходячи з об'ємних часток компонентів у газовій суміші та числом їх молей табл.1.5.

Компонент суміші	Об'ємна частка, $r_i$	Об'єм продуктів горіння, $\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$		
		$\text{CO}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{N}_2$
метан $\text{CH}_4$	0,58	0,58·1	0,58·2	0,58·7,52
етан $\text{C}_2\text{H}_6$	0,072	0,072·2	0,072·3	0,072·13,16
пропан $\text{C}_3\text{H}_8$	0,058	0,058·3	0,058·4	0,058·18,8
бутан $\text{C}_4\text{H}_{10}$	0,07	0,07·4	0,07·5	0,07·24,4
пентан $\text{C}_5\text{H}_{12}$	0,085	0,085·5	0,085·6	0,085·30,08
оксид карбону (IV) $\text{CO}_2$	0,03	0,03	–	–
азот $\text{N}_2$	0,105		–	0,105
Всього	1,0	1,6	2,5	10,8

6. Розраховуємо питомий теоретичний об'єм продуктів горіння:

$$v_{\text{пр}}^0 = 1,6 + 2,5 + 10,8 = 14,9 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}.$$

7. Розраховуємо питомий та повний дійсний об'єми продуктів горіння  $10 \text{ м}^3$  супутнього газу за нормальних умов з урахуванням надлишку повітря:

$$v_{\text{пр}} = 14,9 + (1,7 - 1) \cdot 12,5 = 23,65 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3},$$

$$V_{\text{пр}} = 23,65 \cdot 10 = 236,5 \text{ м}^3.$$

8. Розраховуємо об'єм продуктів горіння з урахуванням розширення за температури горіння:

$$V_{\text{пр}} = \frac{236,5 \cdot 101,3 \cdot (1000 + 273)}{273 \cdot 101,3} = 1102,8 \text{ м}^3.$$



Висновок: за умови згорання  $10 \text{ м}^3$  супутнього газу за даних умов потрібно  $212,5 \text{ м}^3$  повітря; при цьому утвориться  $1102,8 \text{ м}^3$  продуктів горіння.

### § 3.2.2. Горіння складних конденсованих матеріалів

Складний конденсований матеріал – це суміш речовин у рідкому або твердому стані, що має хімічний склад, який не можна виразити хімічною формулою. Це такі речовини як деревина, торф, сланці, нафта, нафтопродукти тощо. Склад таких речовин, зазвичай, виражають масовими частками або відсотковим вмістом хімічних елементів.

Теоретичний об'єм повітря, необхідний для повного згорання матеріалу заданого елементного складу, можна виразити формулою:

$$v_{\text{пов}}^0 = \frac{4,76V_{\mu}}{100} \left( \sum_i \frac{\Phi_i \beta_i}{\mu_i} - \frac{\Phi_O}{32} \right), \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}, \quad (1.34)$$

де  $\Phi_i$ ,  $\Phi_O$  – масовий вміст  $i$ -го горючого елемента і кисню у складі матеріалу, %;  $\beta_i$  – стехіометричний коефіцієнт у рівнянні реакції горіння  $i$ -го горючого елемента;  $\mu_i$  – молярна маса  $i$ -го хімічного елемента,  $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ;  $V_{\mu}$  – об'єм кіломоля газу за даних умов,  $\text{м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$ , розраховують за формулою (1.10).

Якщо до складу горючої речовини входять тільки карбон, гідроген, кисень та сульфур, а вихідна горюча система знаходиться за стандартних умов ( $V_{\mu} = 24,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ), то формулу (1.34) можна переписати у вигляді:

$$v_{\text{пов}}^0 = \frac{4,76V_{\mu}}{4 \cdot 100} \left( \frac{\Phi_C}{3} + \Phi_H - \frac{\Phi_O - \Phi_S}{8} \right) = 0,29 \left( \frac{\Phi_C}{3} + \Phi_H - \frac{\Phi_O - \Phi_S}{8} \right), \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}. \quad (1.35)$$

Питомий теоретичний об'єм продуктів горіння складного горючого конденсованого матеріалу визначають як суму питомих об'ємів продуктів горіння кожного хімічного елемента, що входять до його складу:

$$v_{\text{пр}}^0 = \sum_i v_{\text{пр}i}^0 g_i, \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}, \quad (1.36)$$

де  $g_i = \frac{\Phi_i}{100}$  – масова частка  $i$ -го хімічного елемента у складі матеріалу;  $v_{\text{пр}i}^0$  – питомий теоретичний об'єм продуктів горіння, що утворюються при згоранні  $i$ -го горючого хімічного елемента,  $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$ , який визначають за рівнянням реакції горіння кожного горючого хімічного елемента за формулою:

$$v_{\text{пр}i}^0 = \frac{V_{\mu}}{\mu_i} \beta_i, \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}. \quad (1.37)$$

Для спрощення розрахунків матеріального балансу складних матеріалів у табл. 1.6 подані розраховані за нормальних та стандартних умов значення питомих об'ємів продуктів згорання для окремих хімічних елементів.

Таблиця 1.6 – Питомі об'єми продуктів горіння деяких елементів за нормальних

Розділ 1. Загальна характеристика процесу горіння  
та стандартних умов

Елемент горючого матеріалу	Об'єм продукту горіння, м <sup>3</sup> ·кг <sup>-1</sup>			
	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
карбон С	1,87 (2,03)*	–	7,0 (7,65)	–
гідроген Н	–	11,2 (12,2)	21,1 (22,9)	–
сульфур S	–	–	2,63 (2,87)	0,7 (0,76)
нітроген N	–	–	0,8 (0,87)	–
окисген O	–	–	-2,63 (-2,87)	–
волога W	–	1,24 (1,36)	–	–

\* у дужках – об'єми продуктів згоряння за стандартних умов ( $V_{\mu} = 24,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$ )

### *Методика визначення об'єму продуктів горіння складних матеріалів*

1. Розрахувати питомий теоретичний об'єм повітря, необхідний для повного згоряння матеріалу даного елементного складу, за формулою (1.34); елементний склад можна розрахувати за умовною хімічною формулою матеріалу відповідно до (1.2).

2. Розрахувати питомий дійсний об'єм повітря з урахуванням коефіцієнта надлишку повітря за формулою (1.23).

3. Розрахувати повний дійсний об'єм повітря, що витрачається за умови згоряння заданої кількості матеріалу, за формулою (1.30).

4. Для полегшення подальших розрахунків скласти таблицю для визначення питомих об'ємів продуктів горіння, виходячи з елементного складу горючого матеріалу, з використанням коефіцієнтів таблиці 1.6 (за нормальних чи стандартних умов) або коефіцієнтів, розрахованих за формулою (1.36).

5. Розрахувати питомий теоретичний об'єм продуктів горіння матеріалу даного елементного складу за формулою (1.36).

6. Розрахувати повний дійсний об'єм продуктів горіння з урахуванням коефіцієнта надлишку повітря за формулою (1.31).

7. Розрахувати об'єм продуктів горіння за температури горіння за формулою (1.11).

### *Приклад розв'язання задачі*

Розрахувати питомі та повні об'єми повітря та продуктів горіння, а також вміст пари води у продуктах горіння при згорянні 5 кг торфу такого складу: С – 57,9 мас. %; Н – 5,3 мас. %; О – 29,7 мас. %; S – 1,1 мас. %; вологи W = 6 мас. %. Горіння відбувалося за нормальних умов з коефіцієнтом надлишку повітря  $\alpha = 1,5$ . Температура продуктів горіння дорівнювала 950 °С.

#### *Розв'язання*

1. Розраховуємо питомий теоретичний об'єм повітря, необхідний для повного згоряння торфу, за формулою (1.34):

$$v_{\text{пов}}^0 = \frac{4,76 \cdot 22,4}{4 \cdot 100} \cdot \left( \frac{57,9}{3} + 5,3 - \frac{29,7 - 1,1}{8} \right) = 5,6 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

2. Розраховуємо питомий дійсний об'єм повітря з урахуванням надлишку

повітря:

$$v_{\text{пов}} = 1,5 \cdot 5,6 = 8,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

3. Визначаємо повний дійсний об'єм повітря, необхідний для згорання 5 кг торфу:

$$V_{\text{пов}} = 8,4 \cdot 5 = 42 \text{ м}^3.$$

4. Визначаємо питомий теоретичний об'єм продуктів горіння за нормальних умов, враховуючи масові частки елементного складу матеріалу і коефіцієнти табл. 1.6. Для зручності складаємо таблицю.

Елементи речовини	Масова частка	Об'єм продукту згорання, $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$			
		$\text{CO}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{SO}_2$	$\text{N}_2$
карбон С	0,579	$0,579 \cdot 1,87$	–	–	$0,579 \cdot 7,0$
гідроген Н	0,053	–	$0,053 \cdot 11,2$	–	$0,053 \cdot 21,1$
сульфур S	0,011	–	–	$0,011 \cdot 0,7$	$0,011 \cdot 2,63$
кисень О	0,297	–	–	–	$-0,297 \cdot 2,63$
волога W	0,06	–	$0,06 \cdot 1,24$	–	–
Всього	1,0	1,08	0,67	$7,7 \cdot 10^{-3}$	4,42

5. Розраховуємо питомий теоретичний об'єм продуктів горіння:

$$v_{\text{пт}}^0 = 1,08 + 0,67 + 7,7 \cdot 10^{-3} + 4,42 = 6,2 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

6. Розраховуємо питомий та повний дійсний об'єми продуктів горіння з урахуванням надлишку повітря за умови повного згорання 5 кг торфу:

$$v_{\text{пт}} = 6,2 + (1,5 - 1) \cdot 5,6 = 9,0 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1},$$

$$V_{\text{пт}} = 9,0 \cdot 5 = 45 \text{ м}^3.$$

7. Розраховуємо об'єм продуктів горіння за температури горіння:

$$V_{\text{пт}}^{\text{T}_{\text{гор}}} = \frac{45 \cdot 101,3 \cdot (950 + 273)}{273 \cdot 101,3} = 201,6 \text{ м}^3.$$

8. Розраховуємо вміст пари води у продуктах горіння на підставі значення питомого об'єму для цього продукту згорання у п.4 за формулою (1.18):

$$\Phi_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,67 \cdot 100}{9} = 7,4 \text{ \%}.$$

Висновок: при згоранні 5 кг торфу витрачається  $42,0 \text{ м}^3$  повітря та виділиться  $201,6 \text{ м}^3$  продуктів горіння за температури  $950 \text{ }^\circ\text{C}$ ; вміст води у продуктах горіння дорівнює  $7,4 \text{ \%}$ .

#### § 4. Історична довідка про вибухи у вигляді надзвичайних ситуацій

Історія становлення і розвитку промисловості зіштовхується з аваріями з загибеллю людей внаслідок викиду наявного на підприємстві енергетичного запасу у вигляді стиснутих рідин і газів, хімічної енергії вибухових речовин чи горючих газів. Часто аварійна ситуація супроводжується вибухом, в якому

бере участь не тільки готова продукція, але й сировина, проміжні продукти, відходи виробництва. В навколишньому середовищі виникають такі вражаючі фактори як ударні хвилі, променисті теплові потоки, загазованість і зараження місцевості, що спричиняють важкі й трагічні наслідки.

Першим великим інцидентом з вибухом пароповітряної хмари, щодо якої було складено докладний звіт, була аварія на підприємстві фірми BASF у м. Людвігсхафені (Німеччина) у 1948 р. В атмосферу внаслідок гідравлічного розриву цистерни було викинуто 30 т скрапленого диметилового ефіру. Утворилася пароповітряна хмара об'ємом 150 тис. м<sup>3</sup>; її вибух забрав життя 207 осіб, 3808 осіб отримали поранення. Площа зони повних руйнувань склала близько 40 тис. м<sup>2</sup>, сильних руйнувань – 300 тис. м<sup>2</sup>. Максимальний рівень надлишкового тиску в ударній хвилі досягав 50 кПа, тротиловий еквівалент оцінили в 20–60 т. Рівень знань того часу не дозволив авторам звіту зробити детальний аналіз процесу вибуху пароповітряної хмари.

Вважалось, що в необмеженому об'ємі початкове горіння сумішей вуглеводнів із повітрям зі швидкостями порядку декілька метрів за секунду не може призвести до вибухових ефектів та аномально високих швидкостей (сотні метрів за секунду) з переходом процесів горіння в детонаційний режим, за якого тиск в ударних хвилях досягає 1,0 МПа. Проте серія руйнівних вибухів газопароповітряних сумішей (ГППС) із численними людськими жертвами, що сталися за цим, довела, що за певних умов (великі розміри хмар, затримка запалювання, турбулізація за рахунок вихрових потоків чи перешкод, низькі температури ГППС і т.і.) повільне горіння хмари, що почалося від звичайного джерела запалювання, може самостійно прискоритися до швидкостей звуку з можливим переходом у детонацію. Існує розбіжність в оцінках потужності вибухів хмар, а також протиріччя і невизначеність у висновках різних авторів відносно режимів горіння. Це пов'язано з тим, що для деяких вибухів рівень надлишкового тиску в ударній хвилі можна оцінити лише за масштабами і характером руйнувань шляхом порівняння з вибухами конденсованих вибухових речовин (ВР).

Горючі речовин у всіх агрегатних станах здатні до вибухового горіння у разі утворення сумішей з повітрям, які за складом близькі до стехіометричного співвідношення. Але існує велика кількість речовин, здатних до вибухового розкладання, їх називають вибуховими та широко використовують під час військових дій та для проведення вибухових робіт у промисловості.

Вибухи небезпечних речовин відомі з давніх часів та спостерігаються й у сучасних умовах. Історія свідчить про неодноразові вибухи порохових сховищ під час потрапляння в них снарядів, необережного поводження з вибуховими речовинами та інших інциденти під час військових дій. Але траплялися вибухи таких речовин й у мирні часи внаслідок пожеж та інших нещасних випадків.

Першою ВР вважають димний порошок (суміш сірки, деревинного вугілля та селітри – нітратів лужних металів та амонію), який використовували у якості речовини бризантної та фугасної дії.

Одним з перших руйнівних вибухів у вигляді надзвичайної ситуації була «Дублінська порохова катастрофа»: у 1597 р. в Ірландії у порту вибухнули діжки з димним порохом, внаслідок чого загинуло 126 осіб та було зруйновано десятки будівель. У 1626 році в Пекіні, Китай, у Збройній палаті почалася пожежа, яка закінчилася вибухом; руйнувань зазнало близько половини Пекіну, загинуло до 20 тис. осіб. У 1769 р. у бастион міста Брешия, Італія, потрапила блискавка, що викликало пожежу, внаслідок якої вибухнуло 90 т пороху та було зруйновано значну частину міста, загинуло 3000 осіб. У 1893 р. у Сантандері, Іспанія, виникла пожежа на пароплаві з сірчаною кислотою і динамітом; пожежогасіння було невдалим, вибух та викликане ним цунамі зруйнувало порт, загинуло 590 осіб, у тому числі людина за 8 км внаслідок розльоту уламків. У 1896 р. біля Йоханесбургу, ПАР, вагони з гелігнітом (динамітний желатин) у спекотний період зазнали удару маневрового паровозу, що спричинило вибух; утворилася вирва довжиною 60 м, шириною 50 м, глибиною 8 м, загинуло 75 осіб.

У 1917 році в порту Галіфакса, Шотландія, у вузькому проливі зіткнулися два кораблі, один з яких перевозив пікринову кислоту та бензол. Діжки з бензолом на палубі перекинулися, він пролився в трюм, де пара бензолу проконтактувала з гарячим двигуном, що спричинило початок пожежі; через деякий час відбувся вибух в детонаційному режимі (за оцінками температура досягла 5000 °С і виникла вибухова хвиля швидкістю 1000 м/с); вибух викликав цунамі висотою 18 м, розплавив та випарував пушку на кораблі, загинуло до 2000 осіб (у їх числі рятувальники, які гасили пожежу), багато осіб втратило зір, ударна хвиля в багатьох домах перекинула печні прилади, що викликало чисельні пожежі.

У 1988 р. біля станції Арзамас, СРСР, на залізничному переїзді відбувся вибух 3 вагонів з ВР (ЕПКС-80 – нефлегматизований гексоген, тринітратолуол (ТНТ), амонал, амоніт та деякі інші загальною масою 118 т). Внаслідок вибуху з тротиловим еквівалентом близько 150 т утворилася вирва довжиною 85 м і глибиною 10 м, загинула 91 особа. Причин катастрофи: не правильно було вказано категорію вибухонебезпеки речовин, що перевозилися, в порушення правил безпеки разом перевозили ініціюючі та бризантні ВР, не правильно було закріплено у вагоні вибухонебезпечний вантаж, при фасуванні було пошкоджено герметичність ящика з дисперсною вибухівкою. Порошок потрапив в жолоб пересування дверей та внаслідок вібрації дверей під час руху поїзда сталося його самозаймання, що призвело до виникнення пожежі, яка ініціювала вибух. Таким чином, історія зберігання та перевезення ВР має багато сумних сторінок.

Сучасним прикладом таких ситуацій є подвійний вибух у ресторані міста Патлавад, Індія: внаслідок короткого замкнення вибухнув гелігніт (динамітний желатин), що нелегально зберігався у крамниці, а далі вибухнув балон з газом у ресторані, була зруйнована будівля, загинуло 105 осіб.

Крім ВР вибухати можуть й інші речовини, такі як добрива і напівфабрикати їх виготовлення. Найбільш тяжкі наслідки спостерігаються за умов поводження з аміачною селітрою. Більш за 100 років від першої такої аварії, відбулося близько 30 важких інцидентів з нітратом амонію. Деякі з них починалися саме з вибуху, у деяких спочатку була пожежа, а потім вибух (іноді після автомобільних аварій, наприклад, у 2007 р., Монклова, Мексика). У деяких випадках самопідтримувальну пожежу розкладання (SSD) вдалося загасити за рахунок спеціального режиму подачі води (пожежа на кораблі, м. Естака де Барес, Іспанія, 2007 р.).

У 1916 р. сталася найбільша аварія вибухової промисловості Великобританії, яка є першою відомою надзвичайною ситуацією техногенного походження внаслідок обертання на виробництві аміачної селітри. Спочатку сталася пожежа після самозаймання купи порожніх мішків з під селітри. Заводська пожежна охорона змогла захистити від пожежі сховище з готовими боеприпасами, але вибухнуло 200 т ТНТ, що спричинило більш сильний вибух 700 т аміачної селітри (напівфабрикати виробництва амотолу). Загинуло 115 осіб, у тому числі усі пожежні. Схожа ситуація сталася у 1946 р. у Нахідці, СРСР, на пароплаві «Дальнострой» внаслідок самозаймання 7000 т амоналу (суміш аміачної селітри, ТНТ і дрібнодисперсного алюмінію). Пожежа спричинила вибух 400 т ТНТ на кораблі. Вибух підняв у повітря 2000 т мазуту, який брудним дощем опадав 2 години; було зруйновано порт, знищено 800 т продовольчих та промислових товарів, загинуло 105 осіб.

У 1921 р. в Оппау, Германия, на заводі з виробництва добрив застосовувалося подрібнення злежаної суміші сульфату та нітрату амонію складу 50/50 % за допомогою малих вибухів. Попередні дослідження визнали таку суміш вибухобезпечною та 2 роки експлуатували спеціальну технологію безінцидентів. Але з 1921 року суміш стали готувати з меншою вологістю та густиною. За пізнішими дослідженнями такі зміни збільшили ймовірність вибуху. До того ж, утворена суміш мала неоднорідний склад, і можливо, що вибуховий заряд при закладанні потрапив в область зі збільшеним вмістом нітрату амонію, а збільшення його вмісту в цій суміші до 55 % збільшує ймовірність вибуху. Технологічний вибух, який мав на меті подрібнення матеріалу, виявився сильнішим, ніж очікувалося, і його виявилося достатньо для детонації 10 % добрива від його загальної кількості (4500 т у силосі висотою 20 м). Відбулося 2 вибухи з інтервалом 0,5 с потужністю до 2 кілотонн тротилового еквіваленту. В результаті утворилася вирва довжиною 125 м та глибиною 19 м, було зруйновано 80 % будівель в Оппау, легкі руйнування мали місце на відстані

до 30 км, загинула 561 особа. Аналогічний інцидент трапився на 2 місяці раніше у Кривальді, на той час Германія (зараз Кнурув, Польща), але висновків та зміни технології не було зроблено.

У 1924 р. у Едісоні, США, на заводі з виробництва нітрату целюлози відбувались паралельні роботи з переробки нітрату амонію артилерійських снарядів на добриво. Вибух 10 тис. м<sup>3</sup> нітрату амонію повністю зруйнував будівлі на площі 10 км<sup>2</sup>, призвів до загибелі 20 осіб. При цьому розпочалася пожежа сусідніх будівель, де зберігався нітрат целюлози. Площа горіння досягла 2 км<sup>2</sup>. Самовіддана робота пожежних запобігла охопленню полум'ям сусіднього арсеналу з 500 тис. осколково-фугасних снарядів.

У 1947 р. у порту Техас-сіті на кораблі зайнялися мішки з технічною аміачною селітрою (напівфабрикат для виготовлення добрив та ВР), гасіння пожежі було невдалим. Наступний вибух зруйнував 1000 будівель, викликав пожежі резервуарів з нафтопродуктами та хімічними речовинами, загинуло 567 осіб (у їх числі пожежні); виникла пожежа на другому кораблі з селітрою, яку теж не вдалося загасити і через 15 годин відбувся наступний вибух. Причина пожежі за офіційною версією – необережне поводження з вогнем, але є свідчення, що мішки під час завантаження на корабель були значно нагрітими. Тобто причиною пожежі могло бути й самозаймання.

У 2015 р. відбулася серія вибухів у порту Тяньцзиня, Китай, де зберігалася багато активних хімічних речовин, у тому числі нітроцелюлоза та аміачна селітра. Вважають, що спочатку відбулось самозаймання контейнеру з нітроцелюлозою, далі гасіння водою невідомих речовин призвело до посилення пожежі й наступного не дуже потужного вибуху, який викликав сильний вибух 800 т аміачної селітри та найбільші руйнування. Внаслідок інциденту загинуло 173 особи, було зруйновано 300 будівель, у повітря викинуто 700 т ціаніду натрію, що призвело до масової загибелі риби.

У 2020 р. у порту Бейрута, Ліван, сталася пожежа, яка призвела до потужного вибуху (більше 1 кілотонни ТНТ), який спричинив заарештований протягом 6 років вантаж аміачної селітри (2750 т). Руйнування спостерігалися на відстані до 10 км. Загинуло 178 осіб.

Відоме використання добрив для виготовлення саморобних вибухівок. Так, у 2011 р. в Осло, Норвегія, було скоєно теракт вибухівкою на основі аміачної селітри та дизельного пального, що спричинило загибель 8 осіб.

В історії використання вибухонебезпечних речовин відомі також вибухи перхлорату амонію, що зберігається у вигляді білих кристалів. За умови нагріву вище за 150 °С він розкладається, а за швидкого нагріву це супроводжується вибухом. Так, у 1988 р. у місті Хендерсон, США, на заводі з виробництва перхлорату амонію як окисника для багаторазових космічних кораблів «Шаттл» під час пожежі відбулась серія вибухів, найпотужніший з яких зафі-

ксовано сейсмографам як землетрус потужністю 3,5 бали. Вважають, що пожежа виникла внаслідок проведення зварювальних робіт для усунення наслідків стихійного лиха. Роботи проводились за 30 хв до початку пожежі та на відстані 20 м від місця її виявлення (сушарка періодичної дії). Далі пожежа поширилась по сайдинговим пластиковим панелям зі скловолокном та слідами перхлорату амонію, досягла ємності з перхлоратом амонію з поліетилену високого тиску. Перший вибух відбувся через 10 хв після початку пожежі. Внаслідок малої відстані між будівлями та наявності вітру пожежа охопила сусідні споруди. Через 7 хв. вибухнув перхлорат амонію в алюмінієвій ємності (тротиловий еквівалент 30 кг). Пожежі допомагали осередки негерметичності газопроводу з газом, який проходив під заводом, після одного з вибухів виник потужний факел. Далі сталися декілька вибухів контейнерів з кристалами дисперсністю 200 мкм, найпотужніший з них оцінили в 1 кілотонну ТНТ, при цьому утворилася вирва довжиною 61 м, глибиною 4,6 м, було зруйновано будівлі в радіусі 16 км. Інші ємності не вибухали. Газовий факел загасили перекиванням подачі газу. Особовий склад підприємства встиг евакуюватися, загинуло 2 особи.

Горіння і вибух мають загальні і відмітні ознаки, тому горіння за певних умов може переходити у вибух, а вибух відповідно вироджуватися у горіння. Майже єдиним представником газів серед вибухових речовин є ацетилен. Він може вибухати без наявності кисню: за енергії джерела запалювання більше за 210 Дж та нормального атмосферного тиску; або за тиску 170 кПа та енергії джерела запалювання 30 Дж; за тиску більше за 196 кПа, а також у рідкому та твердому стані, ацетилен вибухає від удару або швидкого нагрівання до 500 °С; контакт ацетиленоповітряних сумішей з хлором викликає вибух. Стосовно горіння порохів, то за кількістю тепла і газоподібних продуктів цей процес суттєво не відрізняється від їх вибухового перетворення, а ось за швидкістю перетворення та поширення процесу – в тисячі разів. На відміну від процесів горіння швидкість протікання вибухових процесів майже не залежить від атмосферного тиску і температури. При зміні температури і тиску в деяких межах може змінюватися склад продуктів і теплота згорання пороху.



**ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ****1. Скласти рівняння реакції горіння у повітрі наведених речовин.**

№	Речовина	Формула	№	Речовина	Формула
1.	вуглець бутан гліцерин анілін хлористий етил	C C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub> C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl	7.	натрій октан діетиловий ефір гексамідін дихлорпентан	Na C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O C <sub>12</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub> N <sub>2</sub> C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> Cl <sub>2</sub>
2.	сірка етан амілацетат тринітротолуол дифторетан	S C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub> C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> O <sub>6</sub> N <sub>3</sub> C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> F <sub>2</sub>	8.	кальцій гексан пропанол нікотин диметилфосфат	Ca C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> N <sub>2</sub> C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> O <sub>4</sub> P
3.	фосфор ацетилен етилацетат нітробензол бромметан	P C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> O <sub>2</sub> N CH <sub>3</sub> Br	9.	магній пропілен етиловий спирт уротропін діетилтіоефір	Mg C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> N <sub>4</sub> C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> S
4.	оксид карбону (II) бензол оцтова кислота тринітрогліцерин хлорбензол	CO C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> O <sub>6</sub> N <sub>3</sub> C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl	10.	алюміній стирол метиловий спирт нітроанілін хлорбутан	Al C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> CH <sub>4</sub> O C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> N <sub>2</sub> C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> Cl
5.	калій толуол оцтовий альдегід диметиламін дихлорпропан	K C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> N C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> Cl <sub>2</sub>	11.	літій додекан етиленгліколь нітрометан хлорбензол	Li C <sub>12</sub> H <sub>26</sub> C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> N C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl
6.	водень ксилол ацетон капролактан дихлорметан	H <sub>2</sub> C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> ON CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	12.	цезій циклопентан метанова кислота нітротолуол хлоргексен	Cs C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub> C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> O <sub>2</sub> N C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> Cl

**2. Визначити характер свігіння дифузійного полум'я наведених речовин.**

№	Речовина	Формула	№	Речовина	Формула
1.	етилацетат	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	11	стирол	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>
2.	амілацетат	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	12	гліцерин	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>
3.	метанол	CH <sub>4</sub> O	13	гексан	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>
4.	пропанол	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	14	пентан	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
5.	гептиловий спирт	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> O	15	декан	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>
6.	оцтова кислота	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	16	етилбензол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>
7.	мурашина кислота	CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	17	етиленгліколь	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>
8.	метилацетат	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	18	толуол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>
9.	циклогексан	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	19	діоксан	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>
10	гептан	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	20	гексан	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>

## 3. Розрахувати об'ємну і масову стехіометричну концентрацію:

- а) горючої речовини у повітрі і кисні за нормальних умов;  
 б) горючої речовини у повітрі за вказаних у таблиці умов.

№	Речовина	Формула	$t_0, ^\circ\text{C}$	$P_0, \text{кПа}$
1.	пропіловий спирт	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$	5	102,5
2.	метиловий спирт	$\text{CH}_4\text{O}$	0	98,0
3.	аміловий спирт	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$	18	100,0
4.	оксид карбону (II)	$\text{CO}$	25	98,0
5.	бутан	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	5	100,0
6.	пентан	$\text{C}_5\text{H}_{12}$	18	101,5
7.	гексильовий спирт	$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$	10	100,5
8.	сульфід карбону	$\text{CS}_2$	25	102,5
9.	ацетон	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	10	102,5
10.	бензол	$\text{C}_6\text{H}_6$	20	101,5
11.	етилацетат	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	15	98,5
12.	етиленгліколь	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$	17	100,5
13.	етильовий спирт	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	23	101,0
14.	бутилацетат	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2$	30	99,5
15.	анлін	$\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$	10	101,0

4\*. Скільки карбиду кальцію  $\text{CaC}_2$  повинно прореагувати з водою, щоб у приміщенні об'ємом  $480 \text{ м}^3$  утворилася стехіометрична концентрація ацетилену  $\text{C}_2\text{H}_2$  в суміші із повітрям за нормальних умов.

5. Для заданої кількості горючих речовин розрахувати повні об'єми повітря, продуктів згорання та їх відсотковий склад за наведених умов.

№	Назва речовини	Формула речовини	$V_{\text{гр}}, \text{м}^3$	$\alpha$	$t_{\text{поч}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{кр}}, ^\circ\text{C}$
1.	оксид карбону (II)	$\text{CO}$	2	1,8	20	1100
2.	метан	$\text{CH}_4$	14	1,5	0	900
3.	етан	$\text{C}_2\text{H}_6$	4	1,4	5	950
4.	етилен	$\text{C}_2\text{H}_4$	7	1,3	18	1200
5.	ацетилен	$\text{C}_2\text{H}_2$	80	1,7	10	900
6.	пропан	$\text{C}_3\text{H}_8$	9	1,1	25	1200
7.	пропілен	$\text{C}_3\text{H}_6$	200	1,6	10	1000
8.	бутан	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	11	1,2	18	900
9.	бутаналь	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$	3	1,9	32	1100
10.	пентан	$\text{C}_5\text{H}_{12}$	25	2,2	20	1100
11.	пентанол	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$	3	1,4	15	1200
12.	гексан	$\text{C}_6\text{H}_{14}$	12	1,6	40	1200
13.	гексанол	$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$	1	1,4	22	800
14.	гептан	$\text{C}_7\text{H}_{16}$	7	1,5	50	950
15.	октан	$\text{C}_8\text{H}_{18}$	4	1,7	13	900
16.	диметильовий ефір	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	5	1,9	25	800
17.	сірководень	$\text{H}_2\text{S}$	7	1,4	30	950
18.	аміак	$\text{NH}_3$	5	1,6	27	1000
19.	оцтова кислота	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	2	2,0	7	1050
20.	октанова кислота	$\text{C}_8\text{H}_{16}\text{O}_2$	5	1,7	65	1000

Розділ 1. Загальна характеристика процесу горіння

6. Для наведених рідин розрахувати об'єм повітря, необхідний для згорання заданої маси горючої речовини, об'єм та склад продуктів горіння, якщо процес горіння відбувається за вказаних у таблиці умов.

№	Речовина	Формула	m, кг	$\alpha$	$t_{\text{поч}}, ^\circ\text{C}$	$P_0$ , кПа	$t_{\text{пр}}, ^\circ\text{C}$
1.	пентанол	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$	7	1,1	25	100	900
2.	гексанол	$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$	3	2,1	5	105	1000
3.	фенол	$\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$	6	1,5	5	103	800
4.	хлорбензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$	3	1,1	25	97	1100
5.	анілін	$\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$	2	1,3	25	103	1200
6.	ніпротолуол	$\text{C}_7\text{H}_7\text{NO}_2$	25	1,6	10	100	1200
7.	гліцерин	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	15	1,4	21	101	1000
8.	етанол	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	80	1,7	10	104	900
9.	діетиловий ефір	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	5	1,9	25	102	800
10.	толуол	$\text{C}_7\text{H}_8$	10	1,5	20	100	1100
11.	ксилол	$\text{C}_8\text{H}_{10}$	7	1,1	-10	101	1200
12.	етиленгліколь	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$	4	1,2	12	100	950
13.	хлоргептан	$\text{C}_7\text{H}_{15}\text{Cl}$	5	2,1	31	98	1100
14.	хлоранілін	$\text{C}_6\text{H}_6\text{NCl}$	1	1,4	17	102	1000
15.	гексаналь	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$	18	1,1	-5	100	650
16.	дибутиламін	$\text{C}_8\text{H}_{19}\text{N}$	35	1,3	25	105	700
17.	бензилтіол	$\text{C}_7\text{H}_8\text{S}$	48	1,6	25	103	880
18.	діоксан	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	56	1,4	10	97	590
19.	диніпротолуол	$\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_4\text{N}_2$	14	1,7	21	103	620
20.	герпінеол	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}$	11	1,9	-10	100	1000
21.	ніпроетан	$\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2\text{N}$	8	1,4	25	101	900
22.	тіофен	$\text{C}_4\text{H}_4\text{S}$	25	1,7	0	103	800
23.	евгенол	$\text{C}_{10}\text{H}_{12}\text{O}_2$	30	1,9	5	100	1100
24.	ціанамід	$\text{CH}_2\text{N}_2$	49	1,5	12	101	1200
25.	крезол	$\text{C}_7\text{H}_8\text{O}$	52	1,1	22	104	950

7. Розрахуйте, при горінні метану  $\text{CH}_4$ , ацетилену  $\text{C}_2\text{H}_2$  чи бутану  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  у продуктах горіння буде більший вміст діоксиду карбону, якщо в першому випадку горіння відбувалося з  $\alpha=1,7$ , у другому –  $\alpha=2,0$ , а в третьому –  $\alpha=2,5$ .

8\*. Зловмисники планують підірвати сейф об'ємом 100 дм<sup>3</sup>. Його наповнюють 5 дм<sup>3</sup> водню ( $T = 298 \text{ K}$ ); щоб уникнути шуму, занурюють у озеро ( $T = 280 \text{ K}$ ), потім суміш підпалюють. Тиск усередині сейфа до підпалювання суміші становив 100 кПа. Процес можна вважати ізохорним. Знайти: а) скільки молів газів знаходиться в сейфі до запалювання? б) скільки молів газу залишилися в сейфі після згорання за умови, що пірогенетична вода повністю сконденсувалася? в) тиск продуктів реакції після охолодження?

9\*. Визначити коефіцієнт надлишку повітря, якщо на горіння 7 кг етилацетату  $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$  витрачено 240 м<sup>3</sup> повітря за температури 21 °C та тиску 101,3 кПа.

Розділ 1. Загальна характеристика процесу горіння

10\*. Для зварювальних робіт необхідно ємність об'ємом 50 м<sup>3</sup> з-під бензолу C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> заповнити сухими продуктами його горіння. Скільки потрібно спалити C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> і який має бути коефіцієнт надлишку повітря, щоб у продуктах горіння містилося не більше 5 % кисню. Умови вважати нормальними.

11. Для наведених рідин визначити масу горючої речовини, що згоріла, та вміст заданого продукту горіння в об'ємі приміщення, якщо відомо, за якого вмісту кисню у повітрі горіння припинилося. Початкові умови наведені у таблиці. Під час горіння утворювалися лише продукти повного згоряння.

№	Речовина	Формула	V <sub>пр</sub> , м <sup>3</sup>	t <sub>поч</sub> , °C	P <sub>о</sub> , кПа	Залишок O <sub>2</sub> , %	Шуканий Ш
1.	бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	250	18	100	14,6	H <sub>2</sub> O
2.	етиленгліколь	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	150	19	98	14,2	N <sub>2</sub>
3.	хлорпентан	C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> Cl	120	28	102	12,5	HCl
4.	хлорбензол	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl	100	15	101	16,3	CO <sub>2</sub>
5.	оцтова кислота	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	200	20	103	11,7	H <sub>2</sub> O
6.	нітробензол	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> O <sub>2</sub> N	350	22	99	10,5	N <sub>2</sub>
7.	сульфід карбону	CS <sub>2</sub>	180	15	104	15,2	SO <sub>2</sub>
8.	етилбензол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	80	20	100	14,8	CO <sub>2</sub>
9.	циклогексан	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	120	0	101	15,5	H <sub>2</sub> O
10	діетилбензол	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	100	25	102	16,0	N <sub>2</sub>

12. Визначити теоретичний та дійсний об'єми повітря, об'єм та склад продуктів горіння при згорянні заданої кількості горючого газу наступного складу, якщо горіння відбувалося за вказаних у таблиці умов.

№	Склад горючого газу, %							V <sub>газ</sub> , м <sup>3</sup>	α	t <sub>о</sub> , °C	t <sub>пр</sub> , °C
	CH <sub>4</sub> (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	CO (N <sub>2</sub> )	H <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> O)	C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	H <sub>2</sub> S (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	O <sub>2</sub>				
1.	60	20	–	(20)	–	–	–	5	1,1	20	950
2.	40	30	20	–	–	–	10	15	1,2	12	890
3.	(40)	15	20	–	(20)	–	5	21	2,1	31	780
4.	15	–	–	(35)	(15)	20	15	12	1,4	17	850
5.	35	–	(10)	(25)	25	–	5	2	2,4	7	750
6.	25	5*	10	35	–	(20)	5	16	1,6	15	1085
7.	25	–	60	(5)	–	5	5	11	3,6	10	985
8.	15	–	15	(40)	10	(15)	5	35	1,4	25	1005
9.	10	(15)	22	(30)	(20)	–	3	52	2,5	15	710
10.	25	15	–	30	–	(25)	5	16	1,8	10	910
11.	(45)	20	(5)	(15)	10	–	5	50	2,2	45	1200
12.	65	15*	15	–	–	3	2	70	1,7	20	950
13.		20		50		(30)	–	30	1,7	21	1000
14.		10	10		(70)	6	4	50	1,9	10	650
15.	35	40		25			–	48	1,5	25	700
16.	(10)			20	32	30	8	20	1,1	20	880
17.	50			10	10	24	6	15	1,2	-9	590
18.		5	(8)	5	80		2	35	2,1	12	620
19.	4	6*	(30)			60	–	18	1,4	31	1000
20.			40	30	27		3	46	1,1	17	900

\* – вміст у газі CO<sub>2</sub>.

Розділ 1. Загальна характеристика процесу горіння

13. Визначити об'єм повітря, об'єм та склад продуктів горіння при згорянні заданої маси речовини наступного складу, вологості (W), зольності (A). Горіння відбувалось за умов, вказаних у таблиці.

№	Склад горючої речовини, %							m, кг	$\alpha$	$t_0, ^\circ\text{C}$	$P_0, \text{кПа}$	$t_{\text{пр}}, ^\circ\text{C}$
	речовина	C	O	H	S	N (W)	P (A)					
1.	мазут	85	0,4	14	0,3	0,3	–	2,6	2,1	12	86,0	950
2.	гума	83		11	3		3	5,2	1,1	22	106	970
3.	бігумна смола	80		11	6	3	–	14,5	2,1	5	103	700
4.	капронова смола	78	6	9		7	–	12	2,5	25	100	830
5.	деревина	42	43	5		(9)	(4)	16	2,6	7	93	810
6.	– « –					(8)	(5)			35	95	650
7.	нафта	81	1	11	1	(6)		25	2,1	12	86	950
8.	отрутохімікат	53	10	21	8		8	52	2,6	5	105	970
9.	– « –	68	12	8	5	(5)	(2)		1,4	22	102	550
10.	– « –	70	5	12	4	3	6		2,0	18	98	900
11.	епоксидна смола	75		14	5	6	–	45	2,1	17	103	750
12.	– « –	72	12	8		8	–	30	1,9	22	99	660
13.	гас	85	1	13	1	–	–	15	1,5	12	101	830
14.	буре вугілля	76	5	6	2	2	(9)	80	2,3	16	100	650
15.	– « –	70	8	8	3		(8)	45	1,4	-7	103	880
16.	– « –	73	7	6	2	1	(11)	60	1,3	28	95	740
17.	– « –	72	8	7	1		(12)	75		16	98	430
18.	кам'яне вугілля	78	2	15	1,5	3,5	(8)	50	2,2	20	99	950
19.	– « –	80	5	9	2	–	(4)	85	2,5	10	97	580
20.	– « –	76	6	10	3	–	(5)	90	1,6	-5	104	840

14. Із ємності об'ємом  $1,8 \text{ м}^3$  витісняють водою газову суміш такого складу:  $\text{H}_2 - 7\%$ ,  $\text{CH}_4 - 30\%$ ,  $\text{C}_2\text{H}_5 - 50\%$ ,  $\text{C}_4\text{H}_{10} - 10\%$ ,  $\text{H}_2\text{S} - 3\%$ . Розрахувати, який об'єм повітря за стандартних умов необхідний для повного згорання дифузійного факела всього об'єму газу, якщо коефіцієнт надлишку повітря становить 3. Розчинність газу у воді не враховувати.

15\*. В сушильній камері розмірами  $8 \times 5 \times 3 \text{ м}$  сталася пожежа із горінням деревини складу: C – 47 %; H – 5 %; O – 40 % за вологості деревини  $W = 8\%$ . Скільки деревини згоріло, якщо полум'яне горіння припинилося за зниження концентрації кисню до 14 %. Умови пожежі: температура  $1000 ^\circ\text{C}$ , тиск 98 кПа.

16\*. Визначити необхідну витрату повітря за 1 годину для повного згорання природного газу такого складу:  $\text{H}_2 - 6\%$ ;  $\text{CH}_4 - 75\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6 - 3\%$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8 - 5\%$ ;  $\text{O}_2 - 11\%$ , якщо витрата газового пальника становить  $45 \text{ л} \cdot \text{хв}^{-1}$ .

17\*. Для речовин, представлених у таблиці, розрахувати об'єм та відсотковий вміст заданого продукту горіння при згорянні даної маси рідини у закритому приміщенні за стандартних умов. Об'єм приміщення заданий у таблиці.

№	Речовина	Формула	m, кг	V <sub>прим</sub> , м <sup>3</sup>	ПГ, що визначається
1.	ксилол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	7	250	H <sub>2</sub> O
2.	етиленгліколь	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	4	150	N <sub>2</sub>
3.	хлоргептан	C <sub>7</sub> H <sub>15</sub> Cl	5	120	HCl
4.	анілін	C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N	1	150	N <sub>2</sub>
5.	оцтова кислота	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	8	200	H <sub>2</sub> O
6.	нітробензол	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> O <sub>2</sub> N	4	350	CO <sub>2</sub>
7.	сульфід карбону	CS <sub>2</sub>	2	180	SO <sub>2</sub>
8.	пропилбензол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	1	120	N <sub>2</sub>
9.	амінобутан	C <sub>4</sub> H <sub>11</sub> N	5	100	CO <sub>2</sub>
10.	етилетаноламін	C <sub>6</sub> H <sub>15</sub> ON	3	80	H <sub>2</sub> O

## ГЛАВА 2. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ

*Енергетичний баланс* процесу горіння відображає закон збереження енергії під час протікання хімічного перетворення, відповідно до першого закону термодинаміки. Він показує, що загальний запас внутрішньої енергії або ентальпії речовин, які реагують, дорівнює сумі внутрішньої енергії або ентальпії продуктів згорання і теплоті, що виділилась під час реакції, за умов, що тиск і температура в системі не змінювались (ізобарно-ізотермічний процес), або об'єм і температура в системі не змінювались (ізохорно-ізотермічний процес) [2–4].

Розрахунок енергетичного балансу здійснюють відповідно до термохімічного рівняння реакції згідно із законом Г.І. Гесса, коли в рівнянні вказують тепловий ефект реакції:  $\sum n_i A_i \rightarrow \sum n_j A_j + Q_{xp}$ , де  $n_i$  – число молів початкових (вихідних) речовин  $A_i$ ;  $n_j$  – число молів продуктів реакції  $A_j$ ;  $Q_{xp}$  – тепловий ефект реакції.

**Тепловий ефект реакції** – кількість тепла, що виділяється чи поглинається системою під час протікання в ній незворотної хімічної реакції (хімічна енергія перетворюється в теплову) за умов сталої температури й об'єму чи температури й тиску. Початковий і кінцевий рівні енергії системи відрізняються між собою на величину теплоти реакції  $Q_{xp}$ :

$$E_{кін} - E_{поч} = Q_{xp}. \quad (1.38)$$

За міру енергії приймають величину *внутрішньої енергії*  $U$  або *ентальпії*  $H$  системи. Внутрішня енергія системи – це загальний запас енергії, сума кінетичної енергії її частинок та потенційної енергії їх взаємодії, зокрема енергія хімічних зв'язків. Ентальпія – це внутрішня енергія системи, в якій відбувається робота розширення за умов сталого тиску:

$$\Delta H = \Delta U + P \cdot \Delta V, \quad (1.39)$$

або з урахуванням рівняння стану ідеального газу  $PV = nRT$

$$\Delta H = \Delta U + \Delta nRT, \quad (1.40)$$

де  $\Delta n$  – різниця між числом молів продуктів реакції і вихідних речовин.

Внутрішня енергія та ентальпія системи не мають нуля або точки відліку, оскільки не можна систему привести у стан, коли вона не має енергії. Тому для визначення енергетики реакції достатньо знайти зміну енергії ( $\Delta H$ ,  $\Delta U$ ) під час реакції. Тепловий ефект хімічної реакції виникає за рахунок зміни в системі або внутрішньої енергії  $\Delta U$  (за сталого об'єму), або ентальпії  $\Delta H$  (за сталого тиску). Реакції горіння майже завжди протікають за сталого тиску, отже, їх тепловий ефект визначається зміною саме ентальпії системи.

Процес горіння є мимовільним, тобто під час горіння система переходить у більш стійкий стан, що відповідає зменшенню внутрішньої енергії системи, яка йде на виконання корисної роботи хімічної реакції. Корисна робота визначається за допомогою *термодинамічних потенціалів* Гіббса ( $\Delta G$ ) за умови

сталих тиску та температури, або Гельмгольца ( $\Delta F$ ) за умови сталих об'єму та температури:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S; \quad \Delta F = \Delta U - T\Delta S, \quad (1.41)$$

де  $T$  – абсолютна температура системи;  $\Delta S$  – ентропія системи.

Довільному процесу відповідає зменшення цих параметрів (внутрішньої енергії), тобто:

$$\Delta G_{P,T} < 0, \quad \Delta F_{V,T} < 0. \quad (1.42)$$

Під час горіння ентропія системи зростає  $\Delta S > 0$ , через те, що, як правило, число молів системи збільшується  $\Delta n > 0$ , а температура системи зростає. За цих умов значення термодинамічних потенціалів падає лише у випадках, коли  $\Delta H < 0$  або  $\Delta U < 0$ .

Якщо ентальпія або внутрішня енергія системи після реакції зменшується, то енергія виділяється, реакція є **екзотермічною** ( $\Delta H < 0$ ,  $\Delta U < 0$ ). Якщо ентальпія кінцевих продуктів є більшою, ніж вихідних, то реакція може протікати тільки за умови підведення енергії в систему, вона є **ендотермічною** ( $\Delta H > 0$ ,  $\Delta U > 0$ ). Реакції горіння завжди є екзотермічними. Згідно із першим законом термодинаміки, тепло, що виділилося в системі, дорівнює:

$$-dQ = dU + PdV = dH - VdP. \quad (1.43)$$

Теплота реакції не залежить від шляху, яким йде процес, а тільки від початкового і кінцевого стану системи (закон Гесса). Якщо горіння відбувається за сталого тиску, тобто  $dP = 0$ , теплота реакції дорівнює різниці ентальпій системи у початковому й кінцевому стані:

$$Q_p = -\int dH = -\Delta H. \quad (1.44)$$

Якщо згорання сталося у закритому об'ємі чи, як під час вибуху, за незмінного об'єму, то  $dV = 0$  і теплоту реакції описує співвідношення:

$$Q_v = -\int dU = -\Delta U. \quad (1.45)$$

Отже, теплота реакції є функцією стану системи й істотно залежить від того, в якому кінцевому стані знаходяться продукти реакції, наприклад, вода – у вигляді пари чи у вигляді рідини, вуглець – у вигляді графіту чи алмазу (тобто залежно від кристалічної структури) й т. і.

**Теплота згорання** – це кількість тепла, що виділяється при повному згоранні одиниці кількості горючої речовини з утворенням продуктів повного згорання за умови, що початкові та кінцеві продукти знаходяться за стандартних умов. Для розрахунку *теплого ефекту* хімічної реакції горіння використовують стандартну теплоту утворення сполуки з простих речовин:

$$\Delta H_{гор}^0 = \sum_i n_{пр_i} \Delta H_{ф пр_i}^0 - \sum_{гс} n_{гс} \Delta H_{ф гс}^0, \quad (1.46)$$

де  $\Delta H_{гор}^0$  – стандартна теплота згорання, кДж моль<sup>-1</sup>;  $\Delta H_{ф пр_i}^0$ ,  $\Delta H_{ф гс}^0$  – стан-



дартні теплоти утворення  $i$ -го продукту горіння та компонентів горючої суміші,  $\text{кДж моль}^{-1}$ ;  $n_{\text{пр}i}$ ,  $n_{\text{гс}}$  – число молів  $i$ -го продукту горіння та компонентів горючої суміші.

**Стандартна теплота утворення речовини  $\Delta H_{\text{f}}^{\circ}$**  – теплота реакції, в якій за стандартних умов ( $P = 101,3 \text{ кПа}$ ,  $T = 298 \text{ К}$ ) утворюється один моль речовини із простих речовин, стійких за стандартних умов. Стандартна теплота утворення простої речовини приймається рівною нулю.

Через те що рівняння реакції горіння у повітрі складає на 1 моль горючої речовини, а горюча суміш, крім горючої речовини, містить кисень та азот, стандартна теплота утворення яких дорівнює нулю, тепловий ефект реакції горіння можна записати у вигляді:

$$\Delta H_{\text{гор}} = \sum_i n_{\text{пр}i} \Delta H_{\text{f пр}i}^{\circ} - \Delta H_{\text{f гр}}^{\circ} \quad (1.47)$$

Залежно від того, як визначають одиницю кількості горючої речовини, розрізняють теплоти згорання: *молярну* (або *стандартну*)  $Q$  ( $\text{кДж моль}^{-1}$ ) – при згоранні одного моля, *масову*  $Q'$  ( $\text{кДж кг}^{-1}$ ) – одного кілограма та *об'ємну*  $Q''$  ( $\text{кДж м}^{-3}$ ) – одного кубічного метра горючої речовини.

Залежно від агрегатного стану води, яка утворилася у процесі горіння і знаходиться у продуктах горіння, розрізняють вищу  $Q_{\text{в}}$  та нижчу  $Q_{\text{н}}$  теплоту згорання.

**Вищою теплотою згорання** називають кількість тепла, що виділяється при повному згоранні одиниці кількості горючої речовини за умови, що горюча суміш і продукти горіння знаходяться за стандартних умов, а вода у продуктах горіння знаходиться у сконденсованому (рідкому) стані.

**Нижчою теплотою згорання** називають кількість тепла, що виділяється при повному згоранні одиниці кількості горючої речовини за умови, що горюча суміш і продукти горіння знаходяться за стандартних умов, а вода, яка міститься у продуктах горіння, знаходиться у газоподібному стані.

Різниця між нижчою та вищою теплотою згорання показує схема на рис. 1.1. Вища теплота згорання відрізняється від нижчої на величину теплоти, що виділяється при конденсації води у продуктах горіння,  $Q_{\text{конд}}$ :

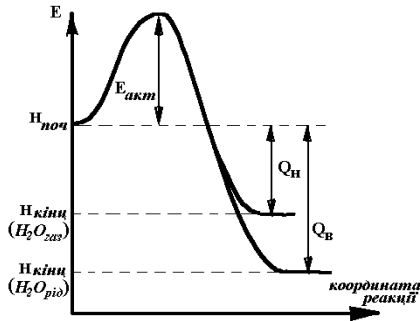
$$Q_{\text{в}} - Q_{\text{н}} = Q_{\text{конд}}; \quad (1.48)$$

$$Q_{\text{конд}} = n_{\text{H}_2\text{O}} \Delta H_{\text{вип}}, \quad (1.49)$$

де  $n_{\text{H}_2\text{O}}$  – число молів води у продуктах згорання;  $\Delta H_{\text{вип}}$  – молярна прихована теплота випаровування води,  $\text{кДж моль}^{-1}$ .

З урахуванням чинників, що впливають на теплоту згорання речовини, таких як хімічний недопал, вологість матеріалу, теплові втрати на випромінювання, визначають **практичну** або **робочу теплоту згорання** матеріалу  $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ , яка завжди є меншою за нижчу теплоту згорання. За збільшення вмісту

вологи в речовині кількість енергії, витрачена на її випаровування, збільшується, а практична теплота згорання зменшується.



**Рис. 1.1 – Тепловий ефект екзотермічної реакції горіння у разі утворення води у газоподібному або рідкому стані**

$E_{\text{акт}}$  – мінімальна енергія, яку необхідно підвести до початкової системи для ініціювання хімічної реакції

### **Практичне значення розрахунку енергетичного балансу**

Основою розрахунку енергетичного балансу є розрахунок теплоти згорання. Теплота згорання має велике практичне значення при розрахунку параметрів пожежної небезпеки речовин та параметрів розвитку пожежі.

1. Теплоту згорання використовують для розрахунку пожежної навантаги  $P_{\text{пож}}$ ,  $\text{МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ , що є кількісною характеристикою теплового впливу пожежі на будівельні конструкції.

2. Нижчу теплоту згорання використовують для визначення характеристик пожежної небезпеки речовин, а саме: температури горіння і вибуху речовини, нижньої концентраційної межі поширення полум'я, максимального тиску вибуху, швидкості наростання тиску під час вибуху.

3. За теплотою згорання визначають горючість речовини. Експериментально доведено, що речовини є негорючими, якщо вони не відносяться до вибухонебезпечних та їх нижча теплота згорання є меншою за  $1830 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}$  для газів та парів рідин або  $2100 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$  для твердих горючих матеріалів.

## **§ 1. Розрахунок теплоти згорання індивідуальних речовин та складних матеріалів**

Для розрахунку стандартного теплового ефекту реакції горіння використовують стандартну теплоту утворення індивідуальних речовин  $\Delta H_f^\circ$  з елементів. Крім того, її застосовують для розрахунку таких показників пожежної небезпеки, як концентраційні та температурні межі поширення полум'я, мінімальна флегматизуюча концентрація негорючих газів та ін.

### § 1.1. Розрахунок стандартної теплоти утворення індивідуальних речовин

Для оцінки стандартної теплоти утворення речовини у газоподібному стані користуються значеннями енергій розриву хімічних зв'язків між атомами:

$$\Delta H_f^0 = \sum_i \Delta(\Delta H_f^0)_i n_i, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}, \quad (1.50)$$

де  $\Delta(\Delta H_f^0)_i$  – адитивний внесок зв'язку  $i$ -го типу в ентальпію молекули,  $\text{кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ ;  $n_i$  – число зв'язків  $i$ -го типу у молекулі.

Адигивні внески – це значення енергії розриву хімічних зв'язків, які залежать від типу атомів, їх валентності, кратності зв'язку, наявності взаємної спряженості зв'язків. Значення адигивних внесків зв'язків наведені у табл. 1.7.

Таблиця 1.7 – Адигивні внески зв'язків різних типів при розрахунку стандартної теплоти утворення речовини

Тип зв'язку	Внесок зв'язку $i$ -го типу, $\Delta(\Delta H_f^0)_i, \text{кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$
C – C	19,645
C = C	115,767
C $\overset{\cdot\cdot\cdot}{\text{---}}$ C (полуторний)	29,04
C $\overset{\cdot\cdot\cdot}{\text{---}}$ C (ароматичний)	22,483
C – H	-19,703
C – O	-49,866
C = O	-134,19
C – N <sup>3</sup>	-21,186
C – N <sup>3</sup>	41,869
O – H	-123,681
O – N <sup>3</sup>	45,763
O = N <sup>3</sup>	-3,684
H – N <sup>3</sup>	-5,904

#### Методика розрахунку стандартної теплоти утворення

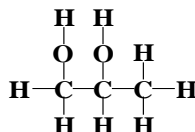
1. Записати структурну формулу речовини, визначити видів хімічних зв'язків.
2. За структурною формулою визначити тип та число зв'язків  $i$ -го типу.
3. За табл. 1.7 визначити величини адигивних внесків зв'язків  $\Delta(\Delta H_f^0)_i$ .
4. Розрахувати теплоту утворення речовини  $\Delta H_f^0$  за формулою (1.50).

#### Приклад розв'язання задачі

Розрахувати теплоту утворення пропіленгліколю.

#### Розв'язання

1. Визначаємо структурну формулу пропіленгліколю:



2. Визначаємо тип, число зв'язків і адитивні внески  $\Delta(\Delta H_f^\circ)$  цих зв'язків у теплоту утворення речовини. Для зручності складаємо таблицю:

Тип зв'язку	Число зв'язків	Внесок $\Delta(\Delta H_f^\circ)$ , кДж·моль <sup>-1</sup>
C – C	2	19,65
C – H	6	-19,70
C – O	2	-49,87
O – H	2	-123,68

3. Розраховуємо теплоту утворення пропіленгліколю за формулою (1.50):

$$\Delta H_f^\circ = 19,65 \cdot 2 + (-19,7)6 + (-49,87)2 + (-123,68)2 = -426,0 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

Висновок: теплота утворення пропіленгліколю за розрахунком становить  $-426,0 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ ; за довідником [7]  $-499,9 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ , відносна похибка розрахунку дорівнює 14,8 %.

### § 1.2. Розрахунок теплоти згорання індивідуальних речовин

Молярну (стандартну) теплоту згорання (вищу та нижчу) розраховують за законом Гесса як числове значення теплового ефекту реакції (1.47):

$$Q_{\text{гор}} = \left| \Delta H_{\text{гор}}^\circ \right| \text{ або } Q_{\text{гор}} = \left| \sum_i \Delta H_{f, \text{пр } i}^\circ \cdot n_{\text{пр } i} - \Delta H_{f, \text{гр}}^\circ \right|, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (1.51)$$

Перерахування молярної теплоти згорання (вищої та нижчої)  $Q_{\text{гор}}$  у масову  $Q'_{\text{гор}}$  виконують за формулою:

$$Q'_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{гор}} \cdot 1000}{\mu_{\text{гр}}}, \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}, \quad (1.52)$$

де  $\mu_{\text{гр}}$  – молярна маса горючої речовини,  $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ .

Для речовин у газоподібному стані для перерахування молярної теплоти згорання  $Q_{\text{гор}}$  в об'ємну  $Q''_{\text{гор}}$  використовують формулу:

$$Q''_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{гор}} \cdot 1000}{V_\mu}, \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (1.53)$$

де  $V_\mu$  – молярний об'єм газу за даних умов,  $\text{м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$ .

Теплоту утворення горючих речовин та тих, що можуть бути наявними у продуктах горіння, подано у таблицях 4, 13, 14 додатків й у довіднику [7].

### Методика розрахунку теплоти згорання індивідуальної речовини

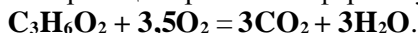
1. Скласти рівняння реакції горіння речовини.
2. Визначити стандартні теплоти утворення продуктів горіння і горючої речовини; розрахувати вищу і нижчу молярну теплоту згорання за формулою (1.51).
3. Визначити молярну масу речовини.
4. Перерахувати молярну теплоту згорання у масову за формулою (1.52).
5. Розрахувати молярний об'єм газу за даних умов за формулою (1.10).
6. Перерахувати молярну теплоту згорання в об'ємну за формулою (1.53).

**Приклад розв'язання задачі**

Визначити вищі та нижчі стандартну, масову та об'ємну теплоти згорання етилформиату  $C_3H_6O_2$  за стандартних умов.

*Розв'язання*

1. Складаємо рівняння реакції горіння етилформиату:



2. Розраховуємо молярні вищу та нижчу теплоти згорання етилформиату за законом Гесса (1.51). Значення стандартних теплот утворення продуктів горіння обираємо за таблицею 4 додатків; а етилформиату – за таблицею 14 додатків:  $\Delta H_f^{\circ} C_3H_6O_2 = -371,2$  кДж·моль<sup>-1</sup>;  $\Delta H_f^{\circ} CO_2 = -393,5$  кДж·моль<sup>-1</sup>;  $\Delta H_{H_2O(g)}^{\circ} = -241,8$  кДж·моль<sup>-1</sup>;  $\Delta H_{H_2O(l)}^{\circ} = -285,8$  кДж·моль<sup>-1</sup>.

$$Q_B = \left| n_{CO_2} \Delta H_{fCO_2}^{\circ} + n_{H_2O} \Delta H_{fH_2O(l)}^{\circ} - \Delta H_{f_{гр}}^{\circ} \right| =$$

$$= |3 \cdot (-393,5) + 3 \cdot (-285,8) - (-371,2)| = 1667,7 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

$$Q_H = \left| n_{CO_2} \Delta H_{fCO_2}^{\circ} + n_{H_2O} \Delta H_{fH_2O(g)}^{\circ} - \Delta H_{f_{гр}}^{\circ} \right| =$$

$$= |3 \cdot (-393,5) + 3 \cdot (-241,8) - (-371,2)| = 1535,7 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. Визначаємо молярну масу етилформиату:

$$\mu_{гр} = 3 \cdot 12 + 6 \cdot 1 + 2 \cdot 16 = 74 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}.$$

4. Перераховуємо молярні теплоти згорання у масові за формулою (1.52):

$$Q'_B = \frac{1667,7 \cdot 1000}{74} = 22536,3 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1},$$

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

5. Молярний об'єм газу за стандартних умов  $V_{\mu} = 24,4$  м<sup>3</sup>·кмоль<sup>-1</sup>.

6. Перераховуємо молярні теплоти згорання в об'ємні за формулою (1.53):

$$Q''_B = \frac{1667,7 \cdot 1000}{24,4} = 67486,8 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3},$$

$$Q''_H = \frac{1535,7 \cdot 1000}{24,4} = 63987,1 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

Висновок: етилформиат має такі теплоти згорання: молярна  $Q_B = 1667,7$  кДж·моль<sup>-1</sup>,  $Q_H = 1535,7$  кДж·моль<sup>-1</sup>; масова  $Q'_B = 22536,3$  кДж·кг<sup>-1</sup>,  $Q'_H = 20752,6$  кДж·кг<sup>-1</sup>; об'ємна  $Q''_B = 67486,8$  кДж·м<sup>-3</sup>,  $Q''_H = 63987,1$  кДж·м<sup>-3</sup>.

**§ 1.3. Розрахунок теплоти згорання складних речовин та матеріалів**

Теплота згорання газових сумішей обумовлена її складом і теплою згорання кожного компонента та визначається за формулою:

$$\begin{aligned} \text{об'ємна:} \quad Q''_{\text{н(в)}}_{\text{сум}} &= \sum_i Q''_{\text{н(в)}}_i \cdot r_i, \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}; \\ \text{масова:} \quad Q'_{\text{н(в)}}_{\text{сум}} &= \sum_i Q'_{\text{н(в)}}_i \cdot g_i, \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}, \end{aligned} \quad (1.54)$$

де  $Q''_{\text{н(в)}}$ ,  $Q'_{\text{н(в)}}$  – нижча (або вища) об'ємна (кДж·м<sup>-3</sup>) і масова (кДж·кг<sup>-1</sup>) теплоти згорання і-го горючого компонента суміші;  $r_i$ ,  $g_i$  – об'ємна і масова частки і-го горючого компонента у газовій суміші; об'ємна  $r_i$  і масова  $g_i$  частки пов'язані між собою формулою:  $g_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_k r_k \mu_k}$ ,  $\mu_i$  – молярна маса і-го компонента.

Для спрощення розрахунку теплоти згорання газових сумішей об'ємні теплоти згорання основних газів за нормальних умов зведені до таблиці 1.8.

Таблиця 1.8 – Значення вищої та нижчої теплоти згорання деяких газів та парів за нормальних умов

Речовина		Теплота згорання, кДж·м <sup>-3</sup>	
назва	формула	вища $Q''_в$	нижча $Q''_н$
водень	H <sub>2</sub>	12750	10790
оксид карбону (II)	CO	12640	12640
сірководень	H <sub>2</sub> S	25350	23700
метан	CH <sub>4</sub>	39820	35880
ацетилен	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	55123	53320
етилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	57623	54016
етан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	70310	64360
пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	101210	93180
н-бутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	133800	123570
н-пентан	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	169270	150630
н-гексан	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	187400	187400
н-гептан	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	216880	200550

Для горючих речовин із випадковою будовою та для сумішей хімічних сполук, масову теплоту згорання визначають за рівнянням Менделєєва:

$$\begin{aligned} \text{- вища теплота згорання:} \quad Q'_в &= 339,4\varphi_C + 1256,8\varphi_H + 108,9(\varphi_S - \varphi_O - \varphi_N), \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}; \quad (1.55) \\ \text{- нижча теплота згорання:} \quad Q'_н &= Q'_в - 25,1(9\varphi_H + W) \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}; \text{ або} \\ Q'_н &= 339,4\varphi_C + 1256,8\varphi_H + 108,9(\varphi_S - \varphi_O - \varphi_N) - 25,1(9\varphi_H + W), \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}, \quad (1.56) \end{aligned}$$

де  $\varphi_C$ ,  $\varphi_H$ ,  $\varphi_S$ ,  $\varphi_O$ ,  $\varphi_N$ ,  $W$  – відповідно масовий відсотковий вміст карбону, гідрогену, сульфору, кисню, нітрогену та вологи в горючій речовині.

Формулу Менделєєва можна використовувати для розрахунку теплоти згорання як індивідуальних, так і складних речовин.

### **Методика визначення теплоти згорання газової суміші**

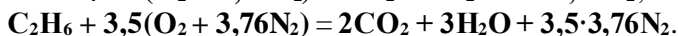
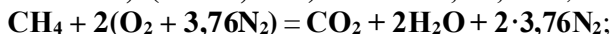
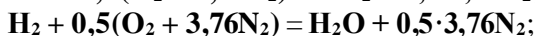
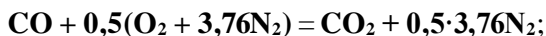
1. Скласти рівняння реакції горіння в повітрі для кожного горючого компонента.
2. Визначити теплоту утворення кожного горючого компонента суміші і продуктів горіння за табл. 4 додатків або розрахувати за формулою (1.50).
3. Визначити нижчу або вищу молярну теплоту згорання і-го компонента суміші за законом Гесса (якщо немає довідкових даних).
4. Перерахувати отримані значення молярної теплоти згорання кожного компонента суміші в об'ємну за формулою (1.53) або скористатися значеннями об'ємної теплоти згорання основних газів за таблицею 1.8.
5. Визначити об'ємну теплоту згорання газової суміші з урахуванням відсоткового вмісту кожного компонента за формулою (1.54).

### **Приклад розв'язання задачі**

Визначити нижчу теплоту згорання коксового газу складу: CO – 6,8 %, H<sub>2</sub> – 57 %, N<sub>2</sub> – 7,7 %, CO<sub>2</sub> – 2,3 %, CH<sub>4</sub> – 22,5 %, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> – 3,7 % за стандартних умов.

#### *Розв'язання*

1. Складаємо рівняння реакцій горіння в повітрі горючих компонентів суміші:



2. Визначаємо теплоту утворення кожного компонента суміші та продукту горіння за довідником [9]:  $\Delta H_{\text{CO}}^\circ = -110,6$  кДж·моль<sup>-1</sup>,  $\Delta H_{\text{H}_2}^\circ = 0$  кДж·моль<sup>-1</sup>,  $\Delta H_{\text{CH}_4}^\circ = -74,85$  кДж·моль<sup>-1</sup>,  $\Delta H_{\text{C}_2\text{H}_6}^\circ = -84,67$  кДж·моль<sup>-1</sup>,  $\Delta H_{\text{N}_2}^\circ = 0$  кДж·моль<sup>-1</sup>,  $\Delta H_{\text{f H}_2\text{O}(\text{r})}^\circ = -241,8$  кДж·моль<sup>-1</sup>,  $\Delta H_{\text{f CO}_2}^\circ = -393,5$  кДж·моль<sup>-1</sup>.

3. Розраховуємо молярну нижчу теплоту згорання кожного горючого компонента суміші за формулою (1.51):

$$Q_{\text{n CO}} = |(-393,5) \cdot 1 - (-110,6)| = 283,18 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1},$$

$$Q_{\text{n H}_2} = |(-241,8) \cdot 1 - 0| = 241,84 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1},$$

$$Q_{\text{n CH}_4} = |(-393,5) \cdot 1 + (-241,8) \cdot 2 - (-74,8)| = 802,6 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1},$$

$$Q_{\text{n C}_2\text{H}_6} = |(-393,5) \cdot 2 + (-241,8) \cdot 3 - (-84,7)| = 1428,4 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

4. Розраховуємо об'ємну нижчу теплоту згорання кожного горючого компонента суміші за формулою (1.53) з урахуванням, що молярний об'єм газу за стандартних умов дорівнює  $V_{\mu} = 24,4$  м<sup>3</sup>·кмоль<sup>-1</sup>:

$$Q''_{\text{HCO}} = \frac{283,18 \cdot 1000}{24,4} = 11799 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q''_{\text{HН}_2} = \frac{241,84 \cdot 1000}{24,4} = 10077 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q''_{\text{HCH}_4} = \frac{802,61 \cdot 1000}{24,4} = 33442 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q''_{\text{HC}_2\text{H}_6} = \frac{1428,41 \cdot 1000}{24,4} = 59517 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

5. Визначаємо нижчу об'ємну теплоту згорання коксового газу заданого складу:

$$Q''_{\text{сум}} = \frac{11799 \cdot 6,8 + 10077 \cdot 5,7 + 33442 \cdot 22,5 + 59517 \cdot 3,7}{100} = 16273 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

Відповідь: при згоранні 1 м<sup>3</sup> коксового газу даного складу за стандартних умов та гарячих продуктів горіння виділяється нижча об'ємна теплота згорання у кількості 16273 кДж.

### *Методика визначення теплоти згорання складних речовин і сумішей*

1. Якщо відсоток складових елементів у горючій речовині не відомий, розрахувати його за формулою (1.2).

2. Розрахувати вищу та нижчу теплоту згорання складної речовини за формулою Менделєєва (1.55), (1.56).

### *Приклад розв'язання задачі*

Визначити нижчу масову теплоту згорання та дати роз'яснення, під час горіння якого матеріалу виділиться більше енергії: деревини з елементним складом: С – 49 мас. %; Н – 6,5 мас. %; О – 39 мас. %; N – 0,5 мас. %; W – 5 мас. %; чи кам'яного вугілля такого складу: С – 79,4 мас. %; Н – 5,3 мас. %; О – 10,3 мас. %; S – 2,8 мас. %; W – 1,2 мас. %.

### *Розв'язання*

1. Визначаємо нижчу масову теплоту згорання для кожного матеріалу за формулою Менделєєва:

- для деревини:

$$Q'_n = 339,4 \cdot 49 + 1256,8 \cdot 6,5 - 108,9(39 + 0,5) - 25,1(9 \cdot 6,5 + 5) = 18842 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1};$$

- для вугілля:

$$Q'_n = 339,4 \cdot 79,4 + 1256,8 \cdot 5,3 - 108,9(10,3 - 2,8) - 25,1(9 \cdot 5,3 + 1,2) = 31541 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

Висновок: при згоранні 1 кг кам'яного вугілля тепла виділиться більше, ніж при згоранні 1 кг деревини.



### § 1.4. Розрахунок пожежної навантаги

Величину теплоти згорання використовують при розрахунку пожежної навантаги  $P_{\text{пож}}$ , що є кількісною характеристикою теплового впливу пожежі на будівельні конструкції.

**Пожежна навантага** – це кількість тепла, що може виділитися при згоранні речовин та матеріалів з одного квадратного метра поверхні підлоги приміщення.

Пожежну навантагу у приміщенні поділяють на тимчасову та постійну і визначають як суму добутків мас всіх горючих матеріалів на їх нижчу теплоту згорання, віднесено до одиниці поверхні підлоги, за формулою:

$$P_{\text{пож}} = \frac{\sum_i m_i Q'_{\text{ні}}}{S_{\text{підл}}}, \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}, \quad (1.57)$$

де  $m_i$  – маса  $i$ -го горючого матеріалу, кг;  $Q'_{\text{ні}}$  – нижча масова теплота згорання  $i$ -го горючого матеріалу, МДж · кг<sup>-1</sup>;  $S_{\text{підл}}$  – площа підлоги, м<sup>2</sup>.

#### Методика розрахунку пожежної навантаги

1. Визначити вид та масу горючих речовин, що знаходяться у приміщенні.
2. Визначити нижчу масову теплоту згорання кожної речовини за табл. 10, 12, 12 додатків або довідниками [7, 9, 17] чи розрахувати за формулами (1.52) або (1.56).
3. Розрахувати площу підлоги приміщення.
4. Розрахувати пожежну навантагу за формулою (1.57).

#### Приклад розв'язання задачі

Розрахувати пожежну навантагу у приміщенні розмірами 114x38 м<sup>2</sup>, якщо маса будівельних дерев'яних конструкцій становить 400 кг та у приміщенні зберігається 400 т каучуку, 30 т мазуту, 10 т поліетиленової плівки.

##### Розв'язання

1. Визначасмо нижчі масові теплоти згорання горючих речовин за довідником [17]: деревина – 13800 кДж · кг<sup>-1</sup>, каучук – 40200 кДж · кг<sup>-1</sup>, поліетилен у виробач – 47100 кДж · кг<sup>-1</sup>, мазут – 39800 кДж · кг<sup>-1</sup>.

2. Розраховуємо площу підлоги приміщення:

$$S_{\text{підл}} = 114 \cdot 36 = 4104 \text{ м}^2.$$

3. Розраховуємо пожежну навантагу у приміщенні:

$$P_{\text{пож}} = \frac{(13,8 \cdot 0,4 + 40,2 \cdot 400 + 39,8 \cdot 30 + 47,1 \cdot 10) 10^3}{4104} = 4320 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Висновок: пожежна навантага у приміщенні складає 4320 МДж м<sup>-2</sup>.

## § 2. Розрахунок температури горіння речовин

Енергія, що виділяється у зоні горіння, витрачається на підготовку горючої речовини до процесу горіння, нагрівання продуктів горіння та на теплові втрати із зони горіння в навколишнє середовище за рахунок теплового випромінювання. Температуру, до якої нагріваються продукти горіння, називають *температурою горіння*. Виходячи із закону Кірхгофа

$$\Delta H_{T_2} = \Delta H_{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} \Delta c_p dT, \quad (1.58)$$

який показує залежність ентальпії системи від температури, та з припущення, що вся теплота  $Q_n$  (вода у стані пари), яка виділяється під час горіння, витрачається на підвищення ентальпії продуктів горіння, для одного моля горючої речовини:

$$Q_n = \Delta H_{T_2} - \Delta H_{T_1} = \int_{T_1}^{T_2} \Delta c_p dT. \quad (1.59)$$

Звідси для питомого об'єму продуктів горіння індивідуальної речовини або компонента суміші маємо після інтегрування наступне вираження для теплоти, яка йде на розігрів продуктів горіння за сталого тиску:

$$Q_{p_{\text{пр}}} = \sum_i v_{\text{пр}i} c_p (T_{\text{гор}} - T_0), \quad (1.60)$$

де  $v_{\text{пр}i}$  – об'єм  $i$ -го продукту горіння при згорянні 1 моля горючої речовини,  $\text{м}^3$ ;  $c_p$  – теплоємність продуктів горіння за сталого тиску,  $\text{кДж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}$ ;  $T_0$  – початкова температура системи,  $\text{К}$ ;  $T_{\text{гор}}$  – температура горіння,  $\text{К}$ .

Із формули (1.60) можна визначити температуру горіння:

$$T_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{пр}}}{\sum_i v_{\text{пр}i} c_{p_{\text{пр}i}}} + T_{\text{поч}}, \text{ К}, \quad (1.61)$$

або за стандартних умов та відсутності тепловтрат:

$$T_{\text{гор}} = \frac{Q_n}{\sum_i n_{\text{пр}i} c_{p_{\text{пр}i}}} + 298 \text{ К}. \quad (1.62)$$

Залежно від умов, в яких протікає процес горіння, розрізняють калориметричну, теоретичну, адіабатичну та дійсну температури горіння.

Під *калориметричною температурою горіння* розуміють температуру, до якої нагріваються продукти горіння, якщо дотримано наступних умов: 1) все тепло, що виділилося у процесі реакції, йде на нагрівання продуктів горіння ( $Q_{\text{пр}} = Q_n$ ); 2) відбувається повне згоряння горючої суміші стехіометричного складу ( $\alpha = 1$ ); 3) у процесі утворення продуктів горіння не відбувається їх термічна дисоціація; 4) вихідна горюча суміш знаходиться за стандартних умов (початкова температура 298 К, тиск 101,3 кПа).

Якщо температура горіння є достатньо високою, то продукти горіння, що утворюються у процесі реакції, можуть розкладатися на елементи, з яких

вони утворені. Дисоціацію продуктів горіння слід враховувати за температур, більших за 1700 °С. За умови відсутності тепловтрат у навколишнє середовище та з урахуванням частки тепла, яке витрачається на процес дисоціації продуктів горіння, ступінь нагріву продуктів горіння буде являти собою **теоретичну температуру горіння**.

**Адіабатична температура горіння** – це температура, до якої нагріваються продукти горіння з урахуванням складу горючої суміші, тобто за умови, що горіння може відбуватися з надлишком повітря. Приймається, що тепловтрат у навколишнє середовище немає, отже, на нагрівання продуктів горіння (з урахуванням надлишку повітря) витрачається вся теплота згоряння. Початкові температура та тиск горючої суміші є стандартними.

**Дійсна температура горіння** – це температура, до якої нагріваються продукти горіння за реальних умов; при цьому враховують, що горіння може відбуватися з надлишком або нестачею повітря (з недопалом горючої речовини), тепловтратами у навколишнє середовище, а початкові умови у горючій суміші можуть відрізнятись від стандартних. Дійсна температура горіння є завжди нижчою за адіабатичну, але вона завжди визначається калориметричною температурою горіння й умовами тепловтрат.

На практиці використовують метод оцінювання температури горіння за кольором тіл, нагрітих у зоні горіння. Зміна спектра випромінювання залежить від температури нагрітого тіла: чим вища температура, тим вище інтенсивність і яскравість випромінювання. На підставі цього факту визначають **яскравісну температуру горіння**. Дані про колір нагрітих тіл наведені у табл. 1.3.

У досліді визначити температуру горіння більшості речовин достатньо складно, оскільки необхідно проводити дослід за високих температур та потрібно вимірювати температуру газу, який знаходиться у стані хімічного перетворення. Однак теорія дозволяє достатньо точно розрахувати адіабатичну температуру горіння, враховуючи закон збереження енергії та хімічного складу речовини. Використовують два розрахункових методи визначення адіабатичної температури горіння: за ентальпією продуктів горіння та з використанням залежності теплоємності продуктів горіння від їх температури.

### **Практичне значення розрахунку температури горіння**

1. Через теплове розширення газів температура горіння зумовлює той об'єм продуктів горіння, який вони займатимуть у процесі проходження реакції горіння за даного атмосферного тиску.

2. Температура горіння визначає максимальний тиск вибуху та параметри розвитку пожежі у приміщенні (температуру пожежі, висоту нейтральної зони).

3. Залежно від температури горіння речовин і матеріалів обирають вогнегасні речовини для даних умов горіння, а також розраховують витрату негорючого газу під час об'ємного гасіння пожежі у приміщенні.

### § 2.1. Розрахунок адіабатичної температури горіння з використанням ентальпії продуктів горіння

#### Методика розрахунку адіабатичної температури горіння індивідуальних речовин

1. Скласти рівняння реакції горіння, визначити стехіометричний коефіцієнт  $\beta$ .

2. Розрахувати питоме теоретичне число молів повітря  $n^{\circ}_{\text{пов}}$ , необхідне для горіння, за формулою (1.12).

3. Розрахувати питоме дійсне число молів продуктів горіння  $n_{\text{пр}}$  з урахуванням надлишку повітря за формулою (1.15).

4. Визначити нижчу стандартну теплоту згорання речовини  $Q_{\text{н}}$  за довідковими даними або розрахувати за формулою (1.51).

5. Розрахувати середню теплоту продуктів згорання  $Q_{\text{рсер}}$ :

$$Q_{\text{рсер}} = \frac{Q_{\text{н}}}{n_{\text{пр}}}, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (1.63)$$

6. Порівнюючи  $Q_{\text{рсер}}$  із молярною ентальпією азоту, визначити температуру горіння у першому наближенні  $T_1$  (таблиця 1 додатків).

7. Розрахувати теплоту продуктів горіння за температури горіння  $T_1$  з використанням даних ентальпії продуктів горіння за різних температур (таблиця 1 додатків) за формулою:

$$Q_{\text{рпр}}^{T_1} = \sum_i (\Delta H_{\text{пр}i}^{T_1} \cdot n_{\text{пр}i}), \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (1.64)$$

8. Визначити температуру горіння у другому наближенні  $T_2$ , враховуючи, що  $T_2 > T_1$ , якщо  $Q_{\text{рпр}}^{T_1} < Q_{\text{н}}$ , або  $T_2 < T_1$ , якщо  $Q_{\text{рпр}}^{T_1} > Q_{\text{н}}$ .

9. Розрахувати теплоту продуктів горіння за температури горіння  $T$ :

$$Q_{\text{рпр}}^{T_2} = \sum_i (\Delta H_{\text{пр}i}^{T_2} \cdot n_{\text{пр}i}), \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (1.65)$$

10. Розрахувати температуру горіння за методом лінійної інтерполяції:

$$T_{\text{ад}} = T_1 + \frac{(T_2 - T_1) \cdot (Q_{\text{н}} - Q_{\text{рпр}}^{T_1})}{(Q_{\text{рпр}}^{T_2} - Q_{\text{рпр}}^{T_1})}, \text{ К}. \quad (1.66)$$

**Приклад розв'язання задачі**

Розрахувати адіабатичну температуру горіння етиленгліколю  $C_2H_6O_2$ , якщо теплота його утворення дорівнює  $\Delta H_f^\circ = -453,8$  кДж·моль<sup>-1</sup>, а горіння здійснювалось із коефіцієнтом надлишку повітря  $\alpha = 1,8$ .

*Розв'язання*

1. Складаємо рівняння реакції горіння етиленгліколю:



2. Розраховуємо питоме теоретичне число молів повітря:

$$n_{пов}^0 = 4,76 \cdot 2,5 = 11,9 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. Розраховуємо питоме дійсне число молів продуктів горіння:

$$n_{пр} = 2 + 3 + 2,5 \cdot 3,76 + (1,8 - 1) \cdot 11,9 = 23,9 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}$$

4. Розраховуємо нижчу молярну теплоту згорання за законом Гесса:

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

5. Розраховуємо середню теплоту продуктів згорання за формулою (1.63):

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

6. Орієнтуючись на молярну ентальпію азоту, за табл. 1 додатків визначаємо температуру горіння у першому наближенні:  $T_1 = 1400$  К.

7. Визначаємо ентальпію продуктів горіння за температури 1400 К та розраховуємо їх загальну теплоту за формулою (1.64):  $\Delta H_{CO_2}^{T_1} = 65,2$  кДж·моль<sup>-1</sup>;

$$\Delta H_{H_2O}^{T_1} = 53,5 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \Delta H_{N_2}^{T_1} = 43,6 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \Delta H_{пов}^{T_1} = 44 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$Q_{рпр}^{T_1} = 2 \cdot 65,2 + 3 \cdot 53,5 + 2,5 \cdot 3,76 \cdot 43,6 + (1,8 - 1)11,9 \cdot 44 = 1119,6 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

8. Визначаємо температуру горіння у другому наближенні. Враховуючи, що теплота продуктів горіння за температури  $T_1 = 1400$  К виявилась більшою за нижчу теплоту згорання, приймаємо  $T_2 = 1200$  К.

9. Визначаємо ентальпію продуктів горіння за температури 1200 К та розраховуємо їх загальну теплоту за формулою (1.65):  $\Delta H_{CO_2}^{T_2} = 53,8$  кДж·моль<sup>-1</sup>;

$$\Delta H_{H_2O}^{T_2} = 44,5 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \Delta H_{N_2}^{T_2} = 36,8 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \Delta H_{пов}^{T_2} = 37,1 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$Q_{рпр}^{T_2} = 2 \cdot 53,8 + 3 \cdot 44,5 + 2,5 \cdot 3,76 \cdot 36,8 + (1,8 - 1)11,9 \cdot 37,1 = 940,2 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

10. Розраховуємо температуру горіння за методом лінійної інтерполяції:

$$T_{ад} = 1400 + \frac{(1200 - 1400)(1059,3 - 1119,6)}{940,2 - 1119,6} = 1333 \text{ К}.$$

Висновок: адіабатична температура горіння етиленгліколю за даних умов дорівнює 1333 К.

### **Методика розрахунку адіабатичної температури горіння складних речовин**

1. Визначити питомий об'єм продуктів горіння складної речовини із урахуванням надлишку повітря.

1.1. Розрахувати питомий теоретичний об'єм повітря  $v_{\text{пов}}^{\circ}$ , необхідний для згорання 1 м<sup>3</sup> газу або 1 кг матеріалу, за формулою (1.22) або (1.28).

1.2. Розрахувати питомий теоретичний об'єм продуктів горіння  $v_{\text{пр}}^{\circ}$  за формулою (1.36) з використанням табл. 1.5 або табл. 1.6. залежно від агрегатного стану горючої речовини.

1.3. Розрахувати питомий дійсний об'єм продуктів згорання з урахуванням надлишку повітря за формулою (1.25).

2. Визначити за довідковими даними або розрахувати нижчу масову теплоту згорання речовини за рівнянням Менделєєва (1.56) або розрахувати об'ємну теплоту згорання газової суміші за формулою (1.54).

3. Розрахувати середню теплоту продуктів згорання  $Q_{\text{рсер}}$  як відношення нижчої теплоти згорання до питомого дійсного об'єму продуктів горіння (аналогічно формулі (1.63)).

4. Порівнюючи  $Q_{\text{рсер}}$  із об'ємною питомою ентальпією азоту (таблиця 2 додатків), визначити температуру горіння у першому наближенні  $T_1$ .

5. Розрахувати теплоту продуктів горіння за температури  $T_1$  із використанням значень питомої об'ємної ентальпії продуктів горіння за цієї температури:

$$Q_{\text{рпр}}^{T_1} = \sum_i (\Delta H_{\text{пр}i}^{T_1} v_{\text{пр}i}) \quad (1.67)$$

6. Визначити температуру горіння у другому наближенні  $T_2$ , враховуючи, що  $T_2 > T_1$ , якщо  $Q_{\text{рпр}}^{T_1} < Q'_H (Q''_H)$ , або  $T_2 < T_1$ , якщо  $Q_{\text{рпр}}^{T_1} > Q'_H (Q''_H)$ .

7. Розрахувати теплоту продуктів горіння за температури  $T_2$

$$Q_{\text{рпр}}^{T_2} = \sum_i (\Delta H_{\text{пр}i}^{T_2} v_{\text{пр}i}) \quad (1.68)$$

8. Розрахувати температуру горіння методом лінійної інтерполяції за формулою (1.66).

#### **Приклад розв'язання задачі**

Розрахувати температуру горіння деревини складу: С – 46 %, Н – 5,5 %, О – 39,2 %, N – 0,9 %, волога W – 7 %, зола А – 1,4 %. Горіння відбувалося за стандартних умов із коефіцієнтом надлишку повітря  $\alpha = 1,5$ .

#### *Розв'язання*

1. Визначаємо питомий дійсний об'єм продуктів згорання деревини заданого складу з урахуванням надлишку повітря.

1.1. Розраховуємо питомий теоретичний об'єм повітря, необхідний для згорання деревини, за формулою (1.35):

$$v_{\text{пов}}^0 = 0,29 \left( \frac{46}{3} + 5,5 - \frac{39,2}{8} \right) = 4,6 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

1.2. Визначаємо питомі об'єми кожного продукту згорання за стандартних умов, користуючись даними таблиці 1.6, та розраховуємо питомий теоретичний об'єм продуктів згорання деревини заданого складу.

Елемент	Масова частка елемента, g	Об'єм продуктів згорання, м <sup>3</sup> ·кг <sup>-1</sup>		
		CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>
C	0,46	0,46·2,03		0,46·7,65
H	0,055		0,055·12,2	0,055·22,9
N	0,009			0,009·0,87
O	0,392			0,392·(-2,87)
W	0,07		0,07·1,36	
Всього	0,986	0,93	0,77	3,66

$$v_{\text{пр}}^0 = 0,93 + 0,77 + 3,66 = 5,36 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

1.3. Розраховуємо питомий дійсний об'єм продуктів згорання з урахуванням надлишку повітря:

$$v_{\text{пр}} = 5,36 + (1,5 - 1) \cdot 4,6 = 7,7 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

2. Розраховуємо нижчу масову теплоту згорання деревини за формулою Менделєєва:

$$Q_{\text{н}}' = 339,4 \cdot 46 + 1256,8 \cdot 5,5 - 108,9(39,2 + 0,9) - 25,1(9 \cdot 5,5 + 7) = 16740 \cdot \text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

3. Розраховуємо середню теплоту продуктів згорання:

$$Q_{\text{р,ср}} = \frac{16740}{7,7} = 2185 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

4. Орієнтуючись на питому об'ємну ентальпію азоту, визначаємо температуру горіння у першому наближенні:  $T_1 = 1600 \text{ К}$ .

5. Визначаємо за табл. 2 додатків об'ємну ентальпію продуктів горіння за температури 1600 К та розраховуємо теплоту продуктів горіння за формулою

$$(1.67): \Delta H_{\text{CO}_2}^{T_1} = 3430,2 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}; \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{T_1} = 2809,9 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$\Delta H_{\text{N}_2}^{T_1} = 2257,0 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}; \Delta H_{\text{пов}}^{T_1} = 2278,0 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q_{\text{р,пр}}^{T_1} = 0,93 \cdot 3430,2 + 0,77 \cdot 2809,9 + 3,66 \cdot 2257 + (1,5 - 1)4,6 \cdot 2278 = 18854 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

6. Визначаємо температуру горіння у другому наближенні. Теплота продуктів горіння 18853,5 кДж·кг<sup>-1</sup> за температури 1600 К виявилася більшою за нижчу теплоту згорання речовини 16739,8 кДж·кг<sup>-1</sup>, тому приймаємо температуру у другому наближенні нижче на 200 К:  $T_2 = 1400 \text{ К}$ .

7. Визначаємо об'ємну ентальпію продуктів горіння за температури

1400 К та розраховуємо теплоту продуктів горіння за формулою (1.68):

$$\Delta H_{\text{CO}_2}^{T_2} = 2909,0 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}; \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{T_2} = 2387,8 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$\Delta H_{\text{N}_2}^{T_2} = 1946,0 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}; \Delta H_{\text{пов}}^{T_2} = 1963,4 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q_{\text{пр}}^{T_2} = 0,93 \cdot 2909 + 0,77 \cdot 2387,8 + 3,66 \cdot 1946 + (1,5 - 1)4,6 \cdot 1963,4 = 16201 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

8. Визначаємо температуру горіння за методом лінійної інтерполяції:

$$T_{\text{гор}} = 1600 + \frac{(1400 - 1600)(16740 - 18853,5)}{(16201 - 18853,5)} = 1440 \text{ К}.$$

Висновок: адіабатична температура горіння деревини заданого складу за стандартних умов дорівнює 1440 К.

### Приклад розв'язання задачі

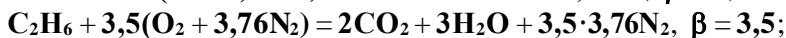
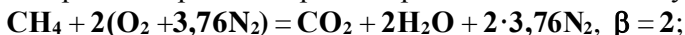
Розрахувати температуру горіння суміші складу:  $\text{CH}_4$  – 50 %;  $\text{C}_2\text{H}_6$  – 30 %;  $\text{N}_2$  – 17 %;  $\text{CO}_2$  – 3 %, яка згорає без тепловтрат за нормальних умов із коефіцієнтом надлишку повітря  $\alpha = 1,8$ .

#### Розв'язання

1. Визначаємо питомий об'єм продуктів горіння із урахуванням  $\alpha$ .

1.1. Розраховуємо питомий теоретичний об'єм повітря  $v_{\text{пов}}^0$ , необхідний для згорання 1 м<sup>3</sup> газової суміші, за формулою (1.32).

Складаємо рівняння реакції горіння горючих компонентів суміші:



$$v_{\text{повсум}}^0 = \frac{2 \cdot 50 + 3,5 \cdot 30}{21} = 9,76 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}.$$

1.2. Розраховуємо питомий теоретичний об'єм продуктів згорання  $v_{\text{пр}}^0$  за формулою (1.33) з урахуванням складу газової суміші та коефіцієнта табл. 1.5. Для зручності складаємо таблицю:

Компонент суміші	Об'ємна частка	Об'єм продукту згорання, м <sup>3</sup> ·м <sup>-3</sup>		
		CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>
CH <sub>4</sub>	0,5	1·0,5	2·0,5	7,52·0,5
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,3	2·0,3	3·0,3	13,16·0,3
N <sub>2</sub>	0,17	–	–	0,17
CO <sub>2</sub>	0,03	0,03	–	–
Всього	1,0	1,13	1,9	7,88

$$v_{\text{прсум}}^0 = 1,13 + 1,9 + 7,88 = 10,9 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}.$$



1.3. Розраховуємо питомий дійсний об'єм продуктів згорання з урахуванням надлишку повітря за формулою (1.25):

$$v_{\text{нгсум}} = 10,9 + (1,8 - 1) \cdot 9,76 = 18,7 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}.$$

2. Розраховуємо нижчу об'ємну теплоту згорання газової суміші за формулою (1.54). За табл. 1.8 знаходимо нижчі об'ємні теплоти згорання компонентів суміші:  $Q''_{\text{нСН}_4} = 35880 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $Q''_{\text{нС}_2\text{Н}_6} = 64360 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}$ ;

$$Q''_{\text{нсум}} = 35880 \cdot 0,5 + 64360 \cdot 0,3 = 37248 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

3. Розраховуємо середню теплоту продуктів згорання  $Q_{\text{рсер}}$ :

$$Q_{\text{рсер}} = \frac{37248}{18,7} = 1992 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

4. Орієнтуючись на питому об'ємну ентальпію азоту (за табл. 2 додатків), визначаємо температуру горіння у першому наближенні:  $T_1 = 1400 \text{ К}$ .

5. Визначаємо за табл. 2 додатків об'ємну ентальпію продуктів горіння за температури 1400 К та розраховуємо їх теплоту за цієї температури за формулою (1.67).  $\Delta H_{\text{CO}_2}^{T_1} = 2909,0 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{T_1} = 2387,8 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}$ ;

$$\Delta H_{\text{N}_2}^{T_1} = 1946,0 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}; \quad \Delta H_{\text{пов}}^{T_1} = 1963,4 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q_{\text{рнг}}^{T_1} = 1,13 \cdot 2909 + 1,9 \cdot 2387,8 + 7,88 \cdot 1946 + (1,8 - 1)9,76 \cdot 1963,4 = 38489 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

6. Визначаємо температуру горіння у другому наближенні. Теплота продуктів горіння  $38488,7 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}$  за температури 1400 К виявилася більшою за нижчу теплоту згорання газової суміші  $37248 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}$ , тому приймаємо значення температури у другому наближенні нижче на 200 К:  $T_2 = 1200 \text{ К}$ .

7. Визначаємо об'ємну ентальпію продуктів горіння за температури 1200 К та розраховуємо теплоту продуктів горіння:

$$\Delta H_{\text{CO}_2}^{T_2} = 2399,4 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}; \quad \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{T_2} = 1984,8 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$\Delta H_{\text{N}_2}^{T_2} = 1641,2 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}; \quad \Delta H_{\text{пов}}^{T_2} = 1655,1 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q_{\text{рнг}}^{T_2} = 1,13 \cdot 2399,4 + 1,9 \cdot 1984,8 + 7,88 \cdot 1641,2 + (1,8 - 1)9,76 \cdot 1655,1 = 32338 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

8. Розраховуємо температуру горіння за методом лінійної інтерполяції:

$$T_{\text{ад}} = 1400 + \frac{(1200 - 1400) \cdot (37248 - 38489)}{(32338 - 38489)} = 1360 \text{ К}.$$

Висновок: температура горіння газової суміші заданого складу за даних умов дорівнює 1360 К.

### § 2.2. Визначення температури горіння з використанням теплоємності продуктів горіння

Розрахунок температури горіння для речовин індивідуального і складного складу можна здійснювати з використанням залежності теплоємності продуктів горіння від їх температури за формулою (1.62).

Залежність середньої теплоємності суміші продуктів горіння від їх температури виражають рівнянням:

$$c_p = a_{\text{сум}} + b_{\text{сум}}t, \quad (1.69)$$

де  $t$  – температура продуктів горіння, °C,  $a_{\text{сум}}$ ,  $b_{\text{сум}}$  – константи складу продуктів горіння; розраховують як суму добутків числа молів (або об'ємів)  $i$ -го компонента продуктів горіння на відповідні константи  $a_i$  та  $b_i$  в температурній залежності теплоємності  $i$ -го продукту згорання (за табл. 4 додатків):

$$a_{\text{сум}} = \sum_i \left( a_i + \frac{b_i T_{\text{ст}}}{2} \right) n_{\text{пр}i}; \quad (1.70)$$

$$b_{\text{сум}} = \sum_i \frac{b_i}{2} n_{\text{пр}i}. \quad (1.71)$$

Температуру горіння розраховують за формулою:

$$t_{\text{гор}} = \frac{-a_{\text{сум}} + \sqrt{a_{\text{сум}}^2 + 4b_{\text{сум}}Q_{\text{н}}}}{2b_{\text{сум}}}, \quad ^\circ\text{C}, \quad (1.72)$$

де  $Q_{\text{н}}$  – нижча питома теплота згорання речовини (молярна, масова чи об'ємна залежно від розмірності кількості продуктів згорання).

### Методика розрахунку температури горіння з використанням теплоємності продуктів горіння для індивідуальних речовин

1. Визначити склад та питома число молів продуктів горіння з урахуванням надлишку повітря.

2. Визначити нижчу стандартну теплоту згорання речовини.

3. Визначити константи рівняння залежності молярної теплоємності газів від температури  $c_{p_i} = a_i + b_i t$  для кожного продукту згорання за табл. 4 додатків.

4. Розрахувати константи  $a_{\text{сум}}$  і  $b_{\text{сум}}$  для суміші продуктів горіння за формулами (1.70), (1.71).

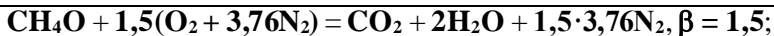
5. Розрахувати температуру горіння за формулою (1.72).

### Приклад розв'язання задачі

Розрахувати адиабатичну температуру горіння пари метанолу, якщо горіння відбувалося з коефіцієнтом надлишку повітря  $\alpha = 1,7$ .

#### Розв'язання

1. Визначаємо питома число молів продуктів горіння та їх склад з урахуванням надлишку повітря:



$$n_{\text{CO}_2} = 1 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}; n_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}; n_{\text{N}_2} = 1,5 \cdot 3,76 = 5,64 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$\Delta n_{\text{пов}} = (1,7 - 1)1,5 \cdot 4,76 = 5,0 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

2. Розраховуємо стандартну нижчу теплоту згорання метанолу з урахуванням, що його теплота утворення дорівнює мінус 239,0 кДж·моль<sup>-1</sup>:

$$Q_{\text{н}} = |1 \cdot (-393,5) + 2 \cdot (-241,8) - (-239,0)| = 638,5 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. Визначаємо константи рівняння  $c_{p_i} = a_i + b_i t$  для кожного продукту згорання за табл. 4 додатків (використовуємо молярні теплоємності речовин) та

$$\text{розраховуємо значення } a' = a + \frac{bT_{\text{ст}}}{2} \text{ та } b' = \frac{b}{2}:$$

Речовина	$a_i$	$a'_i$	$b_i$	$b'_i$
повітря	28,62	29,23	$4,08 \cdot 10^{-3}$	$2,04 \cdot 10^{-3}$
N <sub>2</sub>	27,87	28,54	$4,27 \cdot 10^{-3}$	$2,135 \cdot 10^{-3}$
CO <sub>2</sub>	44,14	45,49	$9,04 \cdot 10^{-3}$	$4,52 \cdot 10^{-3}$
H <sub>2</sub> O (газ)	30,00	31,59	$10,71 \cdot 10^{-3}$	$5,355 \cdot 10^{-3}$

4. Розраховуємо константи  $a_{\text{сум}}$  і  $b_{\text{сум}}$ :

Речовина	$a'_i n_{\text{пр}_i}$	$b'_i n_{\text{пр}_i}$
повітря	$29,23 \cdot 5,0$	$2,030 \cdot 10^{-3} \cdot 5,0$
N <sub>2</sub>	$28,54 \cdot 5,64$	$2,135 \cdot 10^{-3} \cdot 5,64$
CO <sub>2</sub>	$45,49 \cdot 1$	$4,520 \cdot 10^{-3} \cdot 1$
H <sub>2</sub> O (г)	$31,59 \cdot 2$	$5,355 \cdot 10^{-3} \cdot 2$
суміш продуктів горіння	$a_{\text{сум}} = 415,8$	$b_{\text{сум}} = 37,5 \cdot 10^{-3}$

5. Розраховуємо температуру горіння:

$$t_{\text{гор}} = \frac{-415,8 + \sqrt{415,8^2 + 4 \cdot 37,5 \cdot 10^{-3} \cdot 638,5 \cdot 10^3}}{2 \cdot 37,5 \cdot 10^{-3}} = 1367 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Висновок: адіабатична температура горіння пари метанолу за даних умов дорівнює 1367°C.

### *Методика розрахунку температури горіння з використанням теплоємності продуктів горіння для складних речовин*

1. Розрахувати питомий теоретичний об'єм повітря  $v_{\text{пов}}^{\circ}$  для згорання 1 м<sup>3</sup> газової суміші або 1 кг речовини, відповідно за формулою (1.32) або (1.34).

2. Визначити питомі теоретичні об'єми продуктів горіння з використанням табл. 1.5 або 1.6 залежно від агрегатного стану горючої речовини.

3. Розрахувати питомий дійсний об'єм кожного продукту згорання з урахуванням надлишку повітря.

4. Визначити за довідником або розрахувати нижчу масову або об'ємну теплоту згорання, відповідно за формулою (1.56) або (1.54).

5. Визначити константи  $a_i$  і  $b_i$  рівняння  $c_{p_i} = a_i + b_i t$  для кожного продукту

горіння за табл. 4 додатків (використовувати об'ємні теплоємності газів).

6. Розрахувати константи  $a_{\text{сум}}$  та  $b_{\text{сум}}$  для суміші продуктів горіння за формулами (1.70), (1.71).

7. Розрахувати температуру горіння за формулою (1.72).

### Приклад розв'язання задачі

Розрахувати температуру горіння дизельного пального складу: С – 83 %, Н – 15 %, S – 1 %, N – 1 %, якщо горіння відбувалося за нормальних умов, з коефіцієнтом надлишку повітря  $\alpha = 1,4$  за тепловтрат у навколишнє середовище 25 % від теплоти згорання з утворенням лише продуктів повного згорання.

### Розв'язання

1. Розраховуємо питомий теоретичний об'єм повітря, необхідний для згорання 1 кг дизельного пального, за формулою (1.34):

$$v_{\text{пов}}^0 = \frac{4,76 \cdot 22,4}{4 \cdot 100} \left( \frac{83}{3} + 15 - \frac{0-1}{8} \right) = 11,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

2. Визначаємо питомі об'єми продуктів горіння з урахуванням складу речовини та коефіцієнтів табл. 1.6. Для зручності складемо таблицю:

Елемент	Масова частка	Об'єм продукту згорання, $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$			
		CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
С	0,83	0,83·1,87			0,83·7,0
Н	0,15		0,15·11,2		0,15·21,1
S	0,01			0,01·0,7	0,01·2,63
N	0,01				0,01·0,8
Всього	1,00	1,55	1,68	0,007	9,0

3. Розраховуємо питомий об'єм кожного продукту згорання з урахуванням надлишку повітря:  $v_{\text{CO}_2} = 1,55 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$ ;  $v_{\text{N}_2} = 9,0 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$ ;  $v_{\text{H}_2\text{O}} = 1,68 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$ ;

$$v_{\text{SO}_2} = 0,007 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}; \Delta v_{\text{пов}} = (1,4 - 1)11,4 = 4,56 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

4. Розраховуємо нижчу масову теплоту згорання дизельного пального:

$$Q'_{\text{н}} = 339,4 \cdot 83 + 1256,8 \cdot 15 - 108,9(1-1) - 25,1 \cdot 9 \cdot 15 = 43633,7 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

На розігрів продуктів згорання було витрачено 75 % теплоти згорання:

$$Q'_{\text{гр}} = 0,75 \cdot 43633,7 = 32725,3 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

5. Визначаємо константи рівняння  $c_{\text{p}i}^0 = a_i + b_i t$  для кожного продукту горіння за табл. 4 додатків (використовуємо об'ємні теплоємності речовин) та

розраховуємо значення  $a' = a + \frac{b \Gamma_{\text{ст}}}{2}$  та  $b' = \frac{b}{2}$ :

Речовина	$a_i$	$a'_i$	$b_i$	$b'_i$
повітря	1172,95	1197,86	$167,21 \cdot 10^{-3}$	$83,6 \cdot 10^{-3}$
N <sub>2</sub>	1142,21	1168,28	$175,00 \cdot 10^{-3}$	$87,5 \cdot 10^{-3}$
CO <sub>2</sub>	1809,02	1864,22	$370,49 \cdot 10^{-3}$	$185,25 \cdot 10^{-3}$
H <sub>2</sub> O (газ)	1229,51	1294,91	$438,93 \cdot 10^{-3}$	$219,47 \cdot 10^{-3}$
SO <sub>2</sub>	1743,85	1820,49	$514,34 \cdot 10^{-3}$	$257,17 \cdot 10^{-3}$

6. Розраховуємо константи  $a_{\text{сум}}$  та  $b_{\text{сум}}$ .

Речовина	$a_i \cdot \nu_{\text{гр}i}$	$b_i \cdot \nu_{\text{гр}i}$
повітря	1197,86·4,56	83,6·10 <sup>-3</sup> ·4,56
N <sub>2</sub>	1168,28·9,0	87,5·10 <sup>-3</sup> ·9,0
CO <sub>2</sub>	1864,22·1,55	185,25·10 <sup>-3</sup> ·1,55
H <sub>2</sub> O (г)	1294,91·1,68	219,47·10 <sup>-3</sup> ·1,68
SO <sub>2</sub>	1820,49·0,007	257,17·10 <sup>-3</sup> ·0,007
суміш продуктів горіння	$a_{\text{сум}} = 21054,5$	$b_{\text{сум}} = 1826,4 \cdot 10^{-3}$

7. Розраховуємо температуру горіння за формулою (1.72):

$$t_{\text{гор}} = \frac{-21054,5 + \sqrt{21054,5^2 + 4 \cdot 1826,4 \cdot 327253 \cdot 10^3}}{2 \cdot 1826,4 \cdot 10^{-3}} = 1388 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Висновок: температура горіння дизельного пального за даних умов 1388 °С.

### § 2.3. Розрахунок температури дифузійного горіння в обмеженому просторі

Дифузійне горіння речовин та матеріалів в обмеженому просторі супроводжується розбавленням повітря продуктами горіння. Відомо, що полум'яне дифузійне горіння припиняється за умови зниження концентрації кисню у газоповітряній суміші до 14–16% внаслідок витрачання на реакцію.

Розрахунок коефіцієнта надлишку повітря під час дифузійного горіння в обмеженому просторі здійснюють за формулою:

$$\alpha = \frac{21}{21 - \varphi_{\text{O}_2}}, \quad (1.73)$$

де  $\varphi_{\text{O}_2}$  – кінцева об'ємна концентрація кисню у газоповітряній суміші у приміщенні у момент завершення полум'яного горіння, %.

Наявність надлишку повітря під час дифузійного горіння в обмеженому визначає повноту згоряння горючої речовини та ступінь нагріву продуктів горіння. Розрахунок температури дифузійного горіння в просторі також можна проводити із використанням залежності теплоємності димових газів від температури або за методом лінійної інтерполяції з використанням ентальпії продуктів згоряння. Для цього спочатку необхідно визначити фактичний коефіцієнт надлишку повітря за вмістом кисню у продуктах горіння за формулою (1.73), а потім повторити розрахунок за наведеними раніше методиками.

**Приклад розв'язання задачі**

Розрахувати температуру дифузійного полум'я етанолу за умови виникнення горіння аварійного розливу в цеху лікєро-горілочного заводу, якщо кінцева концентрація кисню у приміщенні дорівнювала 13 %, а тепловтрати від зони горіння – 20 % від кількості тепла, що виділялося. Прийняти початкові умови стандартними та утворення лише продуктів повного згорання.

*Розв'язання*

1. Розраховуємо коефіцієнт надлишку повітря під час дифузійного горіння у приміщенні цеху:  $\alpha = \frac{21}{21-13} = 2,6$ .

2. Визначаємо склад та питомих число молів продуктів горіння етанолу з урахуванням надлишку повітря:



$n_{\text{CO}_2} = 2$  моль·моль<sup>-1</sup>;  $n_{\text{H}_2\text{O}} = 3$  моль·моль<sup>-1</sup>;  $n_{\text{N}_2} = 3 \cdot 3,76 = 11,28$  моль·моль<sup>-1</sup>;

$$\Delta n_{\text{пов}} = (2,6 - 1)3 \cdot 4,76 = 22,8 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. Розраховуємо нижчу стандартну теплоту згорання етанолу за законом Гесса (1.51) з урахуванням, що  $\Delta H_{\text{f}}^{\circ} = -234,9$  кДж·моль<sup>-1</sup>:

$$Q_{\text{н}} = |2 \cdot (-393,5) + 3 \cdot (-241,8) - (-234,9)| = 1278,2 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

4. Визначаємо константи рівняння  $c_{\text{p}_i} = a_i + b_i \cdot t$  для кожного продукту згорання за табл. 4 додатків (використовуємо молярні теплоємності речовин)

та розраховуємо значення  $a' = a + \frac{bT_{\text{ст}}}{2}$  та  $b' = \frac{b}{2}$ :

Речовина	$a_i$	$a'_i$	$b_i$	$b'_i$
повітря	28,62	29,23	$4,08 \cdot 10^{-5}$	$2,04 \cdot 10^{-5}$
N <sub>2</sub>	27,87	28,54	$4,27 \cdot 10^{-5}$	$2,135 \cdot 10^{-5}$
CO <sub>2</sub>	44,14	45,49	$9,04 \cdot 10^{-3}$	$4,52 \cdot 10^{-3}$
H <sub>2</sub> O (газ)	30,00	31,59	$10,71 \cdot 10^{-3}$	$5,355 \cdot 10^{-3}$

5. Розраховуємо константи  $a_{\text{сум}}$  і  $b_{\text{сум}}$ :

Речовина	$a'_i n_{\text{пр}_i}$	$b'_i n_{\text{пр}_i}$
повітря	$29,23 \cdot 22,8$	$2,030 \cdot 10^{-3} \cdot 22,8$
N <sub>2</sub>	$28,54 \cdot 11,28$	$2,135 \cdot 10^{-3} \cdot 11,28$
CO <sub>2</sub>	$45,49 \cdot 2$	$4,520 \cdot 10^{-3} \cdot 2$
H <sub>2</sub> O (г)	$31,59 \cdot 3$	$5,355 \cdot 10^{-3} \cdot 3$
суміш продуктів горіння	$a_{\text{сум}} = 1174,1$	$b_{\text{сум}} = 95,5 \cdot 10^{-3}$

6. Розраховуємо температуру горіння за формулою (1.72) з урахуванням тепловтрат. За умовою задачі  $Q_{\text{твт}} = 0,2Q_{\text{н}}$ , тому на нагрів продуктів горіння витрачається:  $Q_{\text{нгр}} = Q_{\text{н}} - Q_{\text{твт}} = Q_{\text{н}} \cdot (1 - 0,2) = 0,8Q_{\text{н}}$ ;

$$t_{\text{гор}} = \frac{-1174 + \sqrt{1174^2 + 4 \cdot 0,095 \cdot 0,8 \cdot 1278,2 \cdot 10^3}}{2 \cdot 0,095} = 1007^{\circ}\text{C}.$$

Висновок: температура горіння етанолу за даних умов дорівнює 1007 °C.

### § 3. Розрахунок температури вибуху паро- і газоповітряних сумішей

Кінетичне горіння газо- або пароповітряної суміші протікає з такою великою швидкістю, що горюча суміш встигає згоріти ще до теплового розширення продуктів реакції. Отже можна вважати, що процес горіння під час вибуху протікає за постійного об'єму. Тому продукти горіння нагріваються у дві стадії: як тепловиділення хімічної реакції та адіабатичне стиснення.

Згідно із першим законом термодинаміки в системі виділяється тепло:  $dQ = dU + PdV = dH - VdP$  або за сталого об'єму:  $dU = dH - VdP$ . З урахуванням (1.44), (1.45) та рівняння стану ідеального газу отримаємо:

$$-Q_v = -Q_p - \Delta nRT_0 \quad \text{або} \quad Q_{\text{виб}} = Q_n + \Delta nRT_0, \quad (1.74)$$

де  $Q_p$ ,  $Q_v$  – теплота реакції за сталого тиску або об'єму;  $Q_{\text{виб}}$  – теплота, що виділяється під час вибуху;  $Q_n$  – нижча теплота згорання горючої речовини;  $R = 8,3 \cdot 10^{-3}$  кДж·моль<sup>-1</sup>К<sup>-1</sup> – універсальна газова стала;  $T_0$  – початкова температура вихідної суміші, К;  $\Delta n$  – різниця між числом молів продуктів горіння  $n_{\text{пр}}$  та вихідної горючої суміші  $n_{\text{гс}}$ .

Вважаємо, що вся внутрішня енергія, яка виділяється під час вибуху, витрачається на підвищення внутрішньої енергії продуктів горіння:

$$Q_{\text{виб}} = \sum_i \Delta U_{\text{пр}i}^{\text{Т}_{\text{виб}}} n_{\text{пр}i}, \quad \text{кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (1.75)$$

Тиск вибуху можна розрахувати за формулою:

$$P_{\text{виб}} = \frac{P_0 n_{\text{пр}} T_{\text{виб}}}{n_{\text{гс}} T_0}, \quad \text{кПа}, \quad (1.76)$$

де  $P_{\text{виб}}$ ,  $T_{\text{виб}}$ ,  $P_0$ ,  $T_0$  – тиск та температура продуктів горіння під час вибуху та вихідної горючої суміші, кПа;  $n_{\text{пр}}$ ,  $n_{\text{гс}}$  – число молів продуктів горіння і вихідної горючої суміші, моль·моль<sup>-1</sup>.

#### § 3.1. Розрахунок максимальної температури та тиску вибуху індивідуальної речовини

Розрахунок максимальної температури та тиску вибуху проводять за рівнянням реакції горіння із використанням значень внутрішньої енергії системи. При цьому припускають, що відбувається адіабатичне горіння стехіометричної суміші горючої речовини та повітря ( $\alpha = 1$ ) за постійного об'єму та без температурної дисоціації продуктів горіння.

##### Методика визначення максимальної температури та тиску вибуху

1. Скласти рівняння реакції горіння.
2. Розрахувати питоме теоретичне число молів продуктів горіння  $n_{\text{пр}}^0$ .
3. Розрахувати теоретичне число молів вихідної горючої суміші:

$$n_{\text{гс}} = 1 + \beta \cdot 4,76, \quad \text{моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (1.77)$$

4. Визначити нижчу стандартну теплоту згорання речовини за довідковими даними або розрахувати за законом Гесса (1.51).
5. Розрахувати енергію вибуху суміші за формулою (1.74).
6. Визначити середню енергію продуктів вибуху:

$$Q_{v\text{ср}} = \frac{Q_{\text{виб}}}{n_{\text{пр}}^0}, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (1.78)$$

7. Орієнтуючись на молярну внутрішню енергію азоту (таблиця 3 додатків), визначити температуру вибуху у першому наближенні  $T_1$ .
8. Розрахувати енергію продуктів вибуху за температури  $T_1$  з використанням внутрішньої енергії продуктів горіння (табл. 3 додатків) за формулою:

$$Q_{v\text{пр}}^{T_1} = \sum_i U_{\text{пр}i}^{T_1} \cdot n_{\text{пр}i}, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (1.79)$$

9. Визначити температуру вибуху у другому наближенні, враховуючи, що  $T_2 < T_1$ , якщо  $Q_{v\text{пр}}^{T_1} > Q_{\text{виб}}$ ; або  $T_2 > T_1$ , якщо  $Q_{v\text{пр}}^{T_1} < Q_{\text{виб}}$ .

10. Розрахувати енергію продуктів вибуху за температури  $T_2$  з використанням даних внутрішньої енергії продуктів горіння за формулою:

$$Q_{v\text{пр}}^{T_2} = \sum_i U_{\text{пр}i}^{T_2} \cdot n_{\text{пр}i}, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (1.80)$$

11. Розрахувати температуру вибуху методом лінійної інтерполяції:

$$T_{\text{виб}} = T_1 + \frac{(T_2 - T_1) \cdot (Q_{\text{виб}} - Q_{v\text{пр}}^{T_1})}{(Q_{v\text{пр}}^{T_2} - Q_{v\text{пр}}^{T_1})}, \text{ К}. \quad (1.81)$$

12. Розрахувати максимальний тиск вибуху за формулою (1.76).

### *Приклад розв'язання задачі*

Визначити максимальну температуру та тиск вибуху стехіометричної пароповітряної суміші етилацетату  $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ , якщо початкова температура  $t_0 = 25^\circ\text{C}$ , а  $P_0 = 110$  кПа. Теплота утворення етилацетату  $\Delta H_f^0 = -442,9$  кДж·моль<sup>-1</sup>.

#### *Розв'язання*

1. Складаємо рівняння реакції горіння етилацетату, визначаємо стехіометричний коефіцієнт  $\beta$ :



2. Розраховуємо питомих теоретичне число молів продуктів горіння:

$$n_{\text{пр}}^0 = 4 + 4 + 5 \cdot 3,76 = 26,8 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. Розраховуємо теоретичне число молів вихідної горючої суміші за формулою (1.77):

$$n_{\text{гс}}^0 = 1 + 5 \cdot 4,76 = 24,8 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

4. Розраховуємо нижчу молярну теплоту згорання етилацетату:

$$Q_{\text{н}} = |4 \cdot (-393,5) + 4 \cdot (-241,8) - (-442,9)| = 2100 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$



5. Розраховуємо енергію вибуху горючої суміші:

$$\Delta n = 26,8 - 24,8 = 2 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1},$$

$$Q_{\text{виб}} = 2100 + 2 \cdot 8,3 \cdot 10^{-3} \cdot 298 = 2105 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

6. Розраховуємо середню енергію продуктів вибуху за формулою (1.78):

$$Q_{\text{всер}} = \frac{2105}{26,8} = 78,52 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

7. Орієнтуючись на молярну внутрішню енергію азоту (табл. 3 додатків), визначаємо температуру вибуху у першому наближенні:  $T_1 = 3000 \text{ К}$ .

8. Визначаємо внутрішню енергію продуктів вибуху за температури  $T_1$  та розраховуємо їх енергію продуктів вибуху (1.79):  $U_{\text{CO}_2}^{T_1} = 137,7 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ ;

$$U_{\text{N}_2}^{T_1} = 76,9 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; U_{\text{H}_2\text{O}}^{T_1} = 113,2 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$Q_{\text{впр}}^{T_1} = 137,7 \cdot 4 + 113,2 \cdot 4 + 76,9 \cdot 5 \cdot 3,76 = 2449,7 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

9. Визначаємо температуру вибуху у другому наближенні. Оскільки  $Q_{\text{впр}}^{T_1} > Q_{\text{виб}}$ , температуру у другому наближенні обираємо меншою, ніж перше значення на  $400 \text{ К}$ :  $T_2 = 2600 \text{ К}$ .

10. Визначаємо внутрішню енергію продуктів вибуху за температури  $T_2$  та розраховуємо їх енергію за формулою (1.80):  $U_{\text{CO}_2}^{T_2} = 116,2 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ ;

$$U_{\text{N}_2}^{T_2} = 65,4 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; U_{\text{H}_2\text{O}}^{T_2} = 93,95 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$Q_{\text{впр}}^{T_2} = 116,2 \cdot 4 + 93,95 \cdot 4 + 65,4 \cdot 5 \cdot 3,76 = 2071 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

11. Розраховуємо температуру вибуху методом лінійної інтерполяції за формулою (1.81):

$$T_{\text{виб}} = 3000 + \frac{(2600 - 3000)(2104,5 - 2449,7)}{(2071 - 2449,7)} = 2635 \text{ К}.$$

12. Розраховуємо максимальний тиск вибуху стехіометричної пароповітряної суміші етилацетату за даних умов за формулою (1.76):

$$P_{\text{max}} = \frac{110 \cdot 26,8 \cdot 2635}{24,8 \cdot 298} = 955 \text{ кПа}.$$

Висновок: під час вибуху стехіометричної пароповітряної суміші етилацетату за даних умов температура вибуху буде становити  $2635 \text{ К}$ , а тиск продуктів горіння –  $955 \text{ кПа}$ .

### § 3.2. Розрахунок температури вибуху індивідуальної речовини за умов надлишку повітря

За умов аварійного перебігу технологічного процесу (виходу горючих газів всередину приміщення або розливу горючої рідини та подальшого її випаровування) концентрація горючої речовини у виробничому приміщенні з часом зростає, а вміст повітря при цьому зменшується. За досягнення концентрацією горючої речовини певного критичного значення (нижньої концентраційної межі  $\varphi_n$ ) утворюється середовище, яке може у випадку появи джерела запалювання горіти у кінетичному режимі, тобто може статися вибух газо- або пароповітряної суміші. Для кінетичного горіння існують критичні значення коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha_{\min}$  та  $\alpha_{\max}$ , які відповідають сумішам із критичним вмістом кисню та горючої речовини відповідно.

Суміш, що утворюється під час аварійного надходження горючої речовини у приміщення і відповідає мінімальному вибухонебезпечному вмісту горючої речовини  $\varphi_n$ , буде мати надлишок повітря. При цьому коефіцієнт надлишку повітря можна визначити за рівнянням:

$$\alpha = \frac{100 - \varphi_n}{\varphi_n \cdot v_{\text{пов}}^0} \quad \text{або} \quad \alpha = \frac{100 - \varphi_n}{\varphi_n \cdot n_{\text{пов}}^0}, \quad (1.82)$$

де  $\varphi_n$  – нижня концентраційна межа поширення полум'я горючої речовини, %;  
 $v_{\text{пов}}^0$ ,  $n_{\text{пов}}^0$  – питомий теоретичний об'єм або число молів повітря.

Дійсне число молів повітря розраховують за формулою:

$$n_{\text{пов}} = \alpha \cdot n_{\text{пов}}^0 = \frac{100 - \varphi_n}{\varphi_n}. \quad (1.83)$$

*Надлишок повітря*, що переходить до складу продуктів горіння, можна визначити за формулою:

$$\Delta n_{\text{пов}} = \alpha \cdot n_{\text{пов}}^0 - n_{\text{пов}}^0 = \frac{100 - \varphi_n}{\varphi_n} - n_{\text{пов}}^0. \quad (1.84)$$

Різниця ж між дійсним числом молів продуктів горіння та початкової суміші так само, як і для стехіометричної суміші, становить:

$$\Delta n = n_{\text{пг}} - n_{\text{гс}} = n_{\text{пг}}^0 + \Delta n_{\text{пов}} - (1 + \alpha n_{\text{пов}}^0) = n_{\text{пг}}^0 - (n_{\text{пов}}^0 + 1), \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1} \quad (1.85)$$

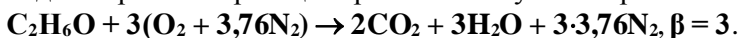
Розрахунок температури та тиску вибуху індивідуальної речовини за умов надлишку повітря можна провести за попередньою методикою з урахуванням, що вихідна горюча суміш та продукти горіння містять надлишок повітря, який можна розрахувати за формулою (1.84). Для цього необхідно спочатку визначити за довідником [7] або за допомогою розрахунків нижню концентраційну межу поширення полум'я горючої речовини  $\varphi_n$ .

**Приклад розв'язання задачі**

Розрахувати температуру вибуху, що стався при загоранні пароповітряної хмари, яка утворилася в робочому цеху лікєро-горілочного заводу внаслідок розриву технологічного трубопроводу і випаровування етанолу. Вважати, що вибух стався за стандартних початкових умов при досягненні концентрації горючої речовини нижньої концентраційної межі поширення полум'я  $\varphi_n$ . Під час горіння утворювалися лише продукти повного згорання, процес дисоціації продуктів горіння не враховувати.

*Розв'язання*

1. Складаємо рівняння реакції горіння етанолу в повітрі:



2. Визначаємо питоге теоретичне число молів повітря:

$$n_{\text{пов}}^0 = 4,76 \cdot \beta = 4,76 \cdot 3 = 14,3 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. Визначаємо питоге теоретичне число молів продуктів горіння:

$$n_{\text{пр}}^0 = 2 + 3 + 3,76 \cdot 3 = 16,3 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

4. Визначаємо різницю між числом молів продуктів горіння та числом молів початкової суміші:

$$\Delta n = 16,3 - (14,3 + 1) = 1 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

5. Визначаємо за довідником [7] нижню концентраційну межу поширення полум'я етанолу:  $\varphi_n = 3,6 \%$ .

6. Розраховуємо коефіцієнт надлишку повітря, що відповідає найменшому вибухонебезпечному вмісту горючої речовини в суміші з повітрям  $\varphi_n$ , за формулою (1.82):

$$\alpha = \frac{100 - 3,6}{14,28 \cdot 3,6} = 1,9.$$

7. Розраховуємо число молів вихідної горючої суміші з урахуванням надлишку повітря:

$$n_{\text{гс}} = 1 + 1,9 \cdot 14,3 = 28,2 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

8. Розраховуємо дійсне число молів продуктів горіння з урахуванням надлишку повітря за формулою (1.17):

$$n_{\text{пр}} = 16,3 + (1,9 - 1) \cdot 14,3 = 29,2 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

9. Розраховуємо енергію вибуху пароповітряної суміші етанолу за формулою (1.74). Визначаємо за довідником [7] стандартну молярну теплоту згорання етанолу:  $Q_n = 1408 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ .

$$Q_{\text{виб}} = 1408 + 1 \cdot 8,314 \cdot 10^{-3} \cdot 298 = 1410,5 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

10. Розраховуємо середню енергію продуктів вибуху за формулою (1.78):

$$Q_{v\text{сер}} = \frac{1410,5}{29,2} = 48,3, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

11. Орієнтуючись на молярну внутрішню енергію азоту за табл. 3 додатків, визначаємо температуру вибуху в першому наближенні:  $T_1 = 2000 \text{ К}$ .

12. Визначаємо внутрішню енергію продуктів вибуху за температури  $T_1$  та розраховуємо енергію продуктів вибуху за формулою (1.79) з урахуванням надлишку повітря:  $U_{\text{CO}_2}^{T_1} = 84,5 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ ;  $U_{\text{N}_2}^{T_1} = 48,6 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ ;

$$U_{\text{H}_2\text{O}}^{T_1} = 66,8 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; U_{\text{пов}}^{T_1} = 49,2 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$Q_{v\text{пр}}^{T_1} = 2 \cdot 84,5 + 3 \cdot 66,8 + 3 \cdot 3,76 \cdot 48,6 + (1,9 - 1)14,3 \cdot 49,2 = 1551 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

13. Визначаємо температуру вибуху у другому наближенні  $T_2$ . Оскільки  $Q_{v\text{пр}}^{T_1} > Q_{\text{виб}}$ , температуру у другому наближенні обираємо меншою, ніж перше значення на  $200 \text{ К}$ :  $T_2 = 1800 \text{ К}$ .

14. Визначаємо внутрішню енергію продуктів вибуху за температури  $T_2$  та розраховуємо їх енергію за формулою (1.80):  $U_{\text{CO}_2}^{T_2} = 74,1 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ ;

$$U_{\text{N}_2}^{T_2} = 43,0 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; U_{\text{H}_2\text{O}}^{T_2} = 58,2 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; U_{\text{пов}}^{T_2} = 43,6 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$Q_{v\text{пр}}^{T_2} = 2 \cdot 74,1 + 3 \cdot 58,2 + 3 \cdot 3,76 \cdot 43,0 + (1,9 - 1)14,3 \cdot 43,6 = 1368 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

15. Розраховуємо температуру вибуху за формулою (1.81):

$$T_{\text{виб}} = 2000 + \frac{(1800 - 2000)(1410,5 - 1551)}{1368 - 1550,9} = 1846 \text{ К}.$$

16. Розраховуємо тиск вибуху за формулою (1.76):

$$P_{\text{виб}} = \frac{101,3 \cdot 29,2 \cdot 1846}{28,2 \cdot 298} = 649,8 \text{ кПа}.$$

Висновок: під час вибуху пароповітряної суміші етанолу, що стався після аварійного розливу в цеху лікєро-горітчаноного заводу, температура вибуху буде дорівнювати  $1846 \text{ К}$ , а тиск вибуху –  $649,8 \text{ кПа}$ .

**ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ**

1. Для речовин, наведених у таблиці, визначити: а) стандартну теплоту утворення, нижчу та вищу молярну теплоту згорання; б) вищу масову та об'ємну теплоту згорання; в) адіабатичну температуру горіння за ентальпією продуктів горіння; г) -/- за теплоємністю продуктів горіння.

№	Речовина	$\alpha$	№	Речовина	$\alpha$	№	Речовина	$\alpha$
1.	сульфід карбону $\text{CS}_2$	1,8	14.	гептанол $\text{C}_7\text{H}_{16}\text{O}$	1,1	27.	бензол $\text{C}_6\text{H}_6$	2,2
2.	нітробензол $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	1,2	15.	етилацетат $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	1,3	28.	метан $\text{CH}_4$	2,6
3.	хлоргексан $\text{C}_6\text{H}_{13}\text{Cl}$	1,5	16.	гліцерин $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	1,4	29.	метанол $\text{CH}_4\text{O}$	1,9
4.	нітротолуол $\text{C}_7\text{H}_7\text{NO}_2$	1,6	17.	бутанол $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	1,2	30.	пентан $\text{C}_5\text{H}_{12}$	2,4
5.	диметиламін $\text{C}_2\text{H}_7\text{N}$	1,2	18.	уротропін $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$	1,3	31.	фенол $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$	1,8
6.	фталева к-та $\text{C}_8\text{H}_4\text{O}_3$	1,3	19.	пропанол $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$	1,8	32.	толуол $\text{C}_7\text{H}_8$	2,7
7.	дихлоретан $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$	1,5	20.	хлорбутан $\text{C}_4\text{H}_9\text{Cl}$	1,3	33.	октан $\text{C}_8\text{H}_{18}$	1,4
8.	диметилкетон $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	1,7	21.	циклопентан $\text{C}_5\text{H}_{10}$	1,9	34.	фенол $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$	1,8
9.	хлорбензол $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$	1,1	22.	ацетилен $\text{C}_2\text{H}_2$	2,0	35.	анілін $\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$	2,2
10.	валеріанова к-та $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_2$	1,6	23.	діетилкетон $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}$	1,2	36.	гексан $\text{C}_6\text{H}_{14}$	2,5
11.	циклогексанол $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$	1,3	24.	пропан $\text{C}_3\text{H}_8$	1,7	37.	піридин $\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$	1,9
12.	діетиловий ефір $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	2,0	25.	амілацетат $\text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}_2$	1,5	38.	пропілен $\text{C}_3\text{H}_6$	2,7
13.	діацетоновий спирт $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2$	2,1	26.	бензиловий спирт $\text{C}_7\text{H}_8\text{O}$	1,4	39.	етанол $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	1,8
						40.	бутан $\text{C}_4\text{H}_{10}$	

2. Для суміші газів, склад якої наведено у таблиці, визначити:

а) нижчу об'ємну теплоту згорання; б) адіабатичну температуру горіння за ентальпією продуктів горіння; в) -/- за теплоємністю продуктів горіння.

№	Суміш газів	$\alpha$	Вміст газів, об. %										
			$\text{H}_2$	$\text{CO}$	$\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_2\text{H}_4$	$\text{C}_2\text{H}_2$	$\text{C}_3\text{H}_8$	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	$\text{C}_4\text{H}_8$	$\text{CO}_2$	$\text{N}_2$
1	водяний газ	1,1	45	35	14	-	-	-	-	-	-	-	6
2	водяний газ	1,2	50	40	1	-	-	-	-	-	-	4	5
3	напівводяний газ	1,3	10	22	3	-	-	-	-	-	-	9	56
4	оксидоводяний газ	1,5	33	54	1	-	-	-	-	-	-	10	2
5	доменний газ	1,4	2	28	1	-	-	-	-	-	-	19	50
6	доменний газ	1,7	3	29	0,5	-	-	-	-	-	-	16,5	51
7	генераторний газ	1,6	21	39	40	-	-	-	-	-	-	-	-
8	коксівий газ	2,0	57	8	23	3	3	-	-	-	-	3	3
9	коксівий газ	1,8	53	5	30	2	4	-	-	-	-	2	4
10	побутовий газ	2,1	35	20	30	-	-	-	-	-	-	8	7
11	природний газ	2,2	-	-	65	15	-	-	13	-	-	-	7
12	підземної газифікації	1,9	13	15	2	-	-	-	-	-	-	10	60
13	піроліз лігроїну	1,2	15	-	25	9	26	7	3	-	10	3	2
14	-/- газівого бензину	1,1	16	-	28	8	24	-	4	6	14	-	-
15	-/- газу	1,3	18	-	32	5	26	-	5	-	3	6	5
16	-/- газівого конденсату	1,4	25	-	24	7	16	-	8	-	7	10	3
17	-/- сланцевої смоли	1,5	21	-	33	8	17	8	-	1	1	10	1
18	крекінг полімерів	1,6	18	-	31	8	23	-	3	4	3	6	4
19	сира нафта	1,7	17	-	24	9	26	3	4	6	4	6	1
20	очищена нафта	1,8	14	-	31	20	-	-	15	20	-	-	-

3. Для речовин, наведених у таблиці, визначити:

- а) максимальну температуру та тиск вибуху пароповітряної горючої суміші за стандартних умов;
- б) температуру та тиск вибуху бідної горючої суміші, що утворилася під час випаровування горючої рідини внаслідок аварійного розливу, якщо концентрація пари досягла нижньої концентраційної межі поширення полум'я  $\varphi_n$  (значення  $\varphi_n$  для складних речовин дивись у таблиці 12 додатків).

№	Речовина	Формула	№	Речовина	Формула
1.	бутанон	$C_4H_8O$	21.	етан	$C_2H_6$
2.	етилацетат	$C_4H_8O_2$	22.	диметилфосфат	$(CH_3)_2HPO_4$
3.	аліловий спирт	$C_3H_6O$	23.	нітротолуол	$C_7H_7O_2N$
4.	фенілетіловий ефір	$C_6H_{10}O$	24.	фталева кислота	$C_8H_4O_3$
5.	пентанова кислота	$C_5H_{10}O_2$	25.	бензиловий спирт	$C_7H_8O$
6.	діоксан	$C_4H_8O_2$	26.	етилацетат	$C_4H_8O_2$
7.	гексаден	$C_6H_{10}$	27.	циклогексанол	$C_6H_{12}O$
8.	етилтолуол	$C_9H_{12}$	28.	нітротолуол	$C_7H_7NO_2$
9.	метилбутират	$C_5H_{10}O_2$	29.	діетилсульфід	$(C_2H_5)_2S$
10.	бутаналь	$C_4H_8O$	30.	о-ксилол	$C_8H_{10}$
11.	нітротолуол	$C_7H_7NO_2$	31.	бутанова кислота	$C_4H_8O_2$
12.	гексилметилкетон	$C_8H_{16}O$	32.	діізопропілкетон	$C_7H_{14}O$
13.	толуол	$C_7H_8$	33.	бензилбензоат	$C_{14}H_{12}O_2$
14.	бутанол	$C_4H_{10}O$	34.	етилбензол	$C_8H_{10}$
15.	амілметилкетон	$C_7H_{14}O$	35.	амілциклогексан	$C_{11}H_{22}$
16.	уайт-спірит	$C_{10,5}H_{21,0}$	36.	бензин Б-70	$C_{7,267}H_{14,796}$
17.	гас КО – 20	$C_{13,595}H_{28,860}$	37.	бензин А-72(з)	$C_{6,991}H_{13,108}$
18.	гас КО – 22	$C_{10,914}H_{21,832}$	38.	бензин А-93 (л)	$C_{7,024}H_{13,706}$
19.	гас КО – 25	$C_{11,054}H_{21,752}$	39.	бензин А-93 (з)	$C_{6,911}H_{12,168}$
20.	дизельне пальне "З"	$C_{12,343}H_{23,889}$	40.	дизельне пальне "Л"	$C_{14,511}H_{29,120}$

4. Для речовин, наведених у таблиці, визначити:

- а) кількість тепла, що виділяється під час повного згорання за стандартних умов вказаної маси горючої речовини; яка маса води може бути нагріта при цьому до температури кипіння (початкова температура води  $25^\circ C$ , теплоємність води  $c_p = 4,18 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );
- б) температуру дифузійного горіння парів горючої рідини за умови аварійного розливу у виробничому приміщенні, якщо кінцевий вміст кисню у продуктах горіння наведено у таблиці.

Розділ 1. Загальна характеристика процесу горіння

№	Речовина	Сумарна формула	Маса води, кг	Вміст кисню у продуктах горіння, %
1.	акрилова кислота	$C_3H_4O_2$	7	13
2.	амілацетат	$C_7H_{14}O_2$	3	16
3.	аміловий спирт	$C_5H_{12}O$	5	11,5
4.	анілін	$C_6H_7N$	10	15
5.	ацетон	$C_3H_6O$	12	18
6.	ацетанлід	$C_8H_9ON$	25	15
7.	ацетальдегід	$C_2H_4O$	16	14
8.	бензол	$C_6H_6$	4	13
9.	бутилацетат	$C_6H_{12}O_2$	8	12
10.	бутиловий спирт	$C_4H_{10}O$	15	14
11.	тіодигліколь	$C_4H_{10}O_2S$	54	15
12.	циклопентан	$C_5H_{10}$	26	18
13.	метанол	$CH_4O$	47	12
14.	ксилол	$C_8H_{10}$	45	17
15.	бензин Б-70	$C_{7,267}H_{14,796}$	50	14
16.	бензин А-72 "З"	$C_{6,991}H_{13,108}$	40	16
17.	бензин А-93 "Л"	$C_{7,024}H_{13,706}$	30	19
18.	бензин А-93 "З"	$C_{6,911}H_{12,168}$	20	17
19.	дизельне паливо "З"	$C_{12,343}H_{23,889}$	10	15
20.	дизельне паливо "Л"	$C_{14,511}H_{29,120}$	5	16
21.	уайт-спірит	$C_{10,5}H_{21,0}$	55	18
22.	газ ГО – 20	$C_{13,595}H_{28,860}$	15	19
23.	газ ГО – 22	$C_{10,914}H_{21,832}$	25	13
24.	газ ГО – 25	$C_{11,054}H_{21,752}$	35	14
25.	олива трансформаторна	$C_{21,74}H_{42,28}S_{0,04}$	65	16
26.	олива АМТ-300	$C_{22,25}H_{33,48}S_{0,34}N_{0,07}$	75	17
27.	олива АМТ-300Т	$C_{19,04}H_{24,58}S_{0,196}N_{0,04}$	85	15
28.	розчинник Р-3	$C_{5,452}H_{7,606}O_{0,535}$	95	19
29.	розчинник Р-4	$C_{6,231}H_{7,798}O_{0,223}$	150	15
30.	розчинник Р-5	$C_{5,309}H_{8,655}O_{0,897}$	200	14
31.	розчинник Р-12	$C_{6,837}H_{9,217}O_{0,515}$	60	16
32.	розчинник М	$C_{2,761}H_{7,147}O_{1,187}$	70	19
33.	розчинник РМЛ	$C_{2,645}H_{6,810}O_{1,038}$	80	16

5. Для речовин, склад яких наведено у таблиці, визначити:

- масу горючої речовини, яку необхідно спалити для нагрівання заданої маси води (інтервал нагріву води та частка тепла, що втрачається під час нагрівання, наведені в таблиці; теплоємність води  $4,18 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ );
- масу горючої речовини, яку необхідно спалити для випаровування заданої маси води за умови, що 100 % тепла, яке виділилося при повному згорянні горючої речовини, витратилося на випаровування заданої кількості води (теплота випаровування води  $2260 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ );

Розділ 1. Загальна характеристика процесу горіння

- в) пожежну навантагу у приміщенні площею 150 м<sup>2</sup>, якщо згоряє три типи горючих матеріалів (задає викладач) масою по 20 кг кожний;
- г) адіабатичну температуру горіння речовини з використанням ентальпії продуктів горіння, якщо горіння протікало за відомого коефіцієнта надлишку повітря без тепловтрат;
- д) температуру горіння речовини з використанням теплоємності продуктів горіння, якщо горіння протікало за відомого коефіцієнта надлишку повітря ( $\alpha$ ) з урахуванням тепловтрат.

№	Речовина	Склад речовини, % мас.						Тепловтрати, % Q <sub>n</sub>	$\alpha$	m <sub>H2O</sub> , кг	Інтервал нагріву, °С
		С	Н	О	S (N)	W	A				
1.	нафта	84	14	—	1	1	—	10	1,8	30	5 – 80
2.	— // —	85	13	1	—	1	—	8	1,7	40	10 – 100
3.	газ	85	14	1	—	—	—	7	1,6	110	20 – 80
4.	бензин	83	12	3	2	—	—	6	1,5	90	0 – 25
5.	— // —	83	15	1	—	1	—	9	1,9	20	10 – 70
6.	диз. пальне	86	12	1	(1)	—	—	5	1,4	30	15 – 60
7.	мазут	83	11	1	(4)	1	—	24	1,3	50	15 – 90
8.	деревина	45	6	41	(2)	4	2	13	1,5	40	5 – 70
9.	— // —	42	6	38	(4)	7	3	5	1,3	30	10– 100
10	— // —	45	7	40	—	7	1	4	1,2	60	20– 100
11	— // —	46	6	41	—	5	2	5	1	70	15 – 95
12	торф	46	5	40	(4)	4	1	7	1,6	30	5 – 100
13	— // —	54	5	30	1	7	3	5	1,2	40	10 – 85
14	— // —	56	4	36	1	1	2	16	1,3	50	5 – 95
15	торф	57	6	34	1	1	1	4	1,7	30	10 – 80
16	вугілля	78	7	10	2	1	2	10	1,4	40	5 – 100
17	— // —	80	5	10	3	1	1	7	1,8	50	10 – 95
18	— // —	77	5	11	3	1	3	10	1,5	40	0 – 90
19	— // —	83	5	8	1	1	2	5	1,4	30	5 – 95
20	— // —	86	5	6	1	2	—	6	1,3	50	0 – 100
21	кокс	93	4	2	1	—	—	17	1,2	30	10 – 95
22	— // —	91	6	2	1	—	—	4	1,1	15	5 – 95
23	— // —	96	1	—	1	—	2	25	2,0	60	5 – 95
24	— // —	98	—	—	1	—	1	10	1,9	40	10 – 95
25	— // —	92	3	1	—	—	4	9	1,6	50	5 – 95
26	— // —	85	13	1	—	—	1	7	1,5	40	8 – 100
27	— // —	84	14	1	—	—	1	10	1,4	50	5 – 100
28	пластик	44	6	49	—	—	1	10	1,3	40	10 – 90
29	— // —	45	5	49	—	—	1	10	1,2	30	10–100
30	— // —	64	6	30	—	—	—	10	1,1	20	5 – 95
31	картон	50	20	15	—	5	10	8	1,8	100	-20– 10
32	бавовна	46	25	15	(6)	8	—	9	1,7	5	10 – 40
33	каучук	85	13	1	1	—	—	7	1,5	10	10 – 70
34	— // —	78	15	2	5	—	—	—	1,4	7	25 – 45
35	— // —	81	16	1	1	—	1	—	1,1	15	30 – 85



## РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ТА ПАРАМЕТРИ ПРОЦЕСУ ВИНИКНЕННЯ ГОРІННЯ

**Виникнення горіння** – це швидкий перехід повільної окисно-відновної реакції до миттєвого перетворення вихідних речовин у продукти реакції за рахунок самоприскорення. Це перетворення носить вибуховий характер та супроводжується спалахом або звуковим ефектом [1–3, 6].

Основна особливість явищ горіння полягає у тому, що швидкість хімічної реакції збільшується за умови зменшення концентрації реагуючих речовин. Саморозгін реакції відбувається, як правило, внаслідок зміни інших параметрів (властивостей) системи, наприклад, підвищення температури або накопичення активних продуктів, що прискорюють (каталізують) реакцію.

Існує значний клас хімічних реакцій, до якого відносяться всі реакції окиснення вуглеводнів киснем, швидкість яких зростає у міру накопичення продуктів реакції [6]. Такі реакції називають *автокаталітичними*. Істотною особливістю реакцій у суміші вуглеводнів та кисню є те, що автокаталіз зумовлений у них не кінцевими продуктами реакції, а вільними радикалами, що утворюються в результаті проміжних хімічних перетворень. Автокаталітичні процеси цього типу відносяться до класу так званих *ланцюгових реакцій*. За певних умов вільні радикали чи атоми можуть стати автокаталітичними агентами реакції горіння – *активними центрами*, які вступають у взаємодію між собою або з валентнонасиченими молекулами. Швидкість ланцюгової реакції  $\omega_{\text{лр}}$  відображається рівнянням:  $\omega_{\text{лр}} = \omega_0 + \omega_f - \omega_g$ , де  $\omega_0$  – швидкість утворення початкових активних центрів;  $\omega_f$ ,  $\omega_g$  – швидкості реакцій розгалуження та обриву ланцюга, відповідно, внаслідок яких число активних центрів збільшується або зменшується.

За умови перевищення швидкості розгалуження над швидкістю обриву ланцюгів у системі загальна швидкість хімічної реакції окиснення підвищується, і за досягнення критичного значення окиснення переходить у процес горіння, тобто виникає займання.

Умови, необхідні для швидкого протікання реакції, створюються самою системою, виникає так званий зворотний зв'язок. За малої зміни зовнішніх умов можливий стрибкоподібний перехід від стаціонарного режиму з малою швидкістю реакції до режиму, коли її швидкість зростає за експонентним законом. Умови, за яких відбувається цей перехід, називають «критичними».

Таким чином, виникнення горіння пов'язане з накопиченням у системі тепла або каталізуючих активних продуктів реакції (активних центрів). У першому випадку кажуть про *тепловий механізм виникнення горіння*, а у другому – про *ланцюговий*.

Умовою виникнення горіння є одночасна наявність трьох складових: горючої речовини та окисника в достатніх концентраціях (горюче середовище) і

теплого імпульсу достатньої потужності. Цим імпульсом можуть бути як зовнішні фактори (розжарена іскра, електричний розряд, нагріті стінки посудини, адіабатичне стиснення), так й внутрішні екзотермічні процеси.

Залежно від природи теплового імпульсу та початкових умов, в яких знаходиться горюча система, розрізняють три види виникнення горіння: самоспалахування, самозаймання, вимушене запалювання.

За умови *самоспалахування* вся горюча система нагрівається зовні до критичної температури, вище за яку горюча система самостійно спалахує без додаткового зовнішнього впливу.

За умови *самозаймання* відбувається накопичення тепла в певній частині горючої системи за рахунок внутрішніх екзотермічних фізико-хімічних або біологічних процесів, що призводить до виникнення горіння.

За умови *вимушеного запалювання* горіння виникає в будь-якій точці холодної горючої системи внаслідок дії джерела запалювання з високою температурою та запасом енергії.

Якщо в результаті будь-яких процесів у системі підвищується температура, то прискорюється рух молекул, збільшується кількість співударів, що веде до активізації компонентів горючої суміші. Молекули починають скоріше реагувати між собою з утворенням кінцевих і проміжних продуктів реакції. Реакції окиснення є екзотермічними, тобто ідуть із виділенням тепла, отже, в системі відбудеться додатковий розігрів і зростання температури. За наявності різниці температур виникає процес віддачі тепла від системи в навколишнє середовище за рахунок конвекційної теплопередачі.

Існує таке значення температури горючою системи, за якої кількість тепла, що виділяється у процесі окиснення, стає більшою, ніж кількість тепла, що віддається від системи. При цьому виникає саморозігрів системи, що призводить до виникнення горіння.

Характеристики різних видів виникнення горіння у значній мірі є різноманітними, але **загальними рисами процесу виникнення горіння** є:

- утворення *горючої системи*, яка складається з горючої речовини та окисника, взятих у певному співвідношенні;
- тепловиділення у горючій системі за рахунок протікання хімічної реакції окиснення перевищує тепловіддачу від системи у навколишній простір, тобто  $q(+) > q(-)$ ;
- відбувається підвищення концентрації активних центрів або температури всієї горючої системи чи певної її частини до *критичного значення*, вище за яке швидкість реакції окиснення різко підвищується;
- перехід від повільної реакції окиснення до миттєвого перетворення (горіння) відбувається за певний період часу – *період індукції*

## ГЛАВА 1. САМОСПАЛАХУВАННЯ ГОРЮЧИХ СУМІШЕЙ

### § 1. Температура самоспалахування

**Самоспалахування** – це процес виникнення горіння в результаті різкого підвищення швидкості екзотермічних реакцій окиснення, що виникають під дією зовнішнього нагрівання всієї горючої системи до критичної температури [1, 6, 10, 11].

**Температура самоспалахування** – найменша температура горючої системи, за якої в умовах спеціальних випробувань спостерігається її самоспалахування. За температури самоспалахування в горючій системі створюються умови, що призводять до стрибкоподібного підйому температури до температури горіння через різке підвищення швидкості хімічної реакції без додаткового зовнішнього впливу.

Температура самоспалахування  $t_{cc}$  та час індукції  $\tau_{\text{інд}}$  можуть використовуватися як показник ступеня пожежної небезпеки горючих речовин та матеріалів. Чим нижче  $t_{cc}$  речовини або менше період індукції, тим легше виникне горіння, а отже, тим більше її пожежна небезпека.

Оскільки виникнення горіння можливе внаслідок різної зміни тепловиділення й тепловіддачі (збільшення інтенсивності тепловиділення  $q(+)\uparrow$  або зменшення інтенсивності тепловіддачі  $q(-)\downarrow$ , або одночасна їх зміна), то  $t_{cc}$  й величина індукційного періоду не є постійними величинами, а залежать від характеру зміни інтенсивності тепловиділення й тепловіддачі.

На температуру самоспалахування речовин  $t_{cc}$ , а отже й на пожежну небезпеку процесу, в якому обертається ця речовина і може утворюватися горюча суміш, впливають три групи факторів:

- 1) вид горючої речовини (теплотворна здатність:  $Q_{\text{н}}\uparrow t_{cc}\downarrow$ , будова й просторова структура речовини (середня довжина карбонового ланцюга):  $\ell_{\text{сер}}\uparrow t_{cc}\downarrow$ );
- 2) склад горючої суміші (концентрація горючої речовини в суміші: за стехіометричного співвідношення компонентів  $\varphi_{\text{гр}} = \varphi_{\text{стм}} t_{cc}$  набуває мінімального значення; концентрація кисню в окислювальному середовищі:  $\varphi_{\text{O}_2}\uparrow t_{cc}\downarrow$ ; наявність негорючих домішок у суміші:  $\varphi_{\text{нг}}\uparrow t_{cc}\uparrow$ ; наявність каталізаторів або інгібіторів реакції окиснення:  $\varphi_{\text{кат}}\uparrow t_{cc}\downarrow$ ,  $\varphi_{\text{інг}}\uparrow t_{cc}\uparrow$ );
- 3) умови у горючій суміші (тиск у системі:  $P\uparrow t_{cc}\downarrow$ ; об'єм і діаметр посудини:  $V_{\text{гс}}\uparrow t_{cc}\downarrow$ ,  $d\uparrow t_{cc}\downarrow$ ; площа поверхні тепловіддачі:  $S_{\text{тв}}\uparrow t_{cc}\uparrow$ ; коефіцієнт конвекційної тепловіддачі:  $\alpha_{\text{к}}\uparrow t_{cc}\uparrow$ ; початкова температура суміші:  $t_0\uparrow t_{cc}\downarrow$ ).

Температура самоспалахування вуглеводнів та їх похідних передусім визначається будовою карбонового ланцюга, наявністю ненасичених зв'язків, а також типом функціональних груп, що входять до ланцюга. Найбільшу  $t_{cc}$  мають ароматичні вуглеводні. Так,  $t_{cc}$  вуглеводнів з однаковою кількістю атомів карбону: бензол (ароматичний вуглеводень) має  $t_{cc} = 864$  К, циклогексан (циклічний вуглеводень) – 543 К; гексан (нормальний алкан) – 534 К.

Сполуки з ненасиченими зв'язками (алкени й алкіни) окислюються легше, ніж насичені вуглеводні (алкани) з таким самим числом атомів карбону, отже їх  $t_{cc}$ , зазвичай, є нижчою за  $t_{cc}$  алканів.

Для вуглеводнів ізомерної будови зі збільшенням ступеня розгалуження молекули  $t_{cc}$  підвищується. Так, *n*-бутан має  $t_{cc}$  704 К, а ізобутан – 749 К. Експериментально встановлено, що  $t_{cc}$  залежить від середньої довжини карбонового ланцюга  $l_{сер}$  алканів: чим довшим є карбоновий ланцюг молекули, тим меншою є  $t_{cc}$ . Це пояснюється послабленням зв'язків між атомами карбону.

Кисневмісні похідні вуглеводнів (спирти, альдегіди, кетони, ефіри) мають  $t_{cc}$  зазвичай нижчу, ніж інші вуглеводні з таким самим числом атомів карбону в молекулі.

Швидкість хімічної реакції є максимальною за стехіометричного співвідношення горючої речовини й окисника, тому за цієї концентрації горючої речовини в суміші спостерігається мінімальне значення  $t_{cc}$ . При контактi деяких видів горючих речовин з чистим киснем навіть за температури навколишнього середовища може виникнути самоспалахування. За зміни концентрації горючої речовини від стехіометричної (як за нестачі, так і за надлишку горючої речовини), а також при додаванні до горючої суміші негорючих компонентів зменшується швидкість хімічної реакції, а отже,  $t_{cc}$  підвищується.

Через те що реакції окиснення вуглеводнів киснем мають ланцюговий механізм, збільшення об'єму реакційної посудини призводить до зменшення швидкості реакцій обриву ланцюгів на стінках посудини, а отже, і до зростання загальної швидкості реакції окиснення та збільшення інтенсивності тепловиділення. При цьому  $t_{cc}$  знижується. З іншого боку, за зменшення об'єму посудини збільшується питома поверхня тепловіддачі ( $S_{ТВ}/V \sim 1/d$ ), а отже,  $t_{cc}$  збільшується. За умови зменшення розміру посудини можливе досягнення такого критичного значення характерного розміру посудини  $d_{кр}$ , за якого самоспалахування не відбувається. Цей принцип використовується в основі технологічних апаратів – *вогнеперешкоджувачів*, що являють собою газопроникні пристрої, принцип дії яких полягає в розбиванні горючої системи на маленькі об'єми і різкому збільшенні площі тепловіддачі. Вогнеперешкоджувачі застосовують у дихальних пристроях технологічного обладнання для запобігання поширенню полум'я по горючих системах.

Оскільки пряме вимірювання  $t_{cc}$  пов'язане зі значними труднощами, для практичних цілей за  $t_{cc}$  приймають мінімальну температуру стінки реакційної посудини, за якої спостерігається самоспалахування горючої суміші.

Експериментально  $t_{cc}$  можна визначити різними методами. Основними з них є: 1) метод впускання заздалегідь готової холодної суміші у вакуумовану нагріту посудину; 2) метод адіабатичного стиснення заздалегідь готової суміші; 3) метод «краплі», коли горюча суміш утворюється в нагрій посудині за рахунок випаровування горючої рідини.

Оскільки  $t_{cc}$  не є величиною постійною і може змінюватися за зміни умов проведення випробувань, то для того щоб можна було порівнювати пожежну небезпеку декількох речовин, необхідно зіставляти їх  $t_{cc}$ , які визначені за однакових (стандартних) умов. Для отримання порівнянних та відтворюваних результатів під час пожежо-технічних досліджень застосовують стандартну випробувальну установку СТС і методику, що описані у стандарті [30]. Прилад СТС призначений для визначення *стандартної температури самоспалахування* пари рідин, газів і речовин, що плавляться, методом «краплі».

**Стандартна температура самоспалахування** – найменша температура, визначена стандартним методом, до якої повинна бути нагріта горюча суміш пари з повітрям, що найлегше займається, щоб виникло горіння без внесення стороннього джерела запалювання. Стандартна  $t_{cc}$  не є мінімальною температурою, за якої відбувається самоспалахування суміші. *Мінімальна температура самоспалахування* може бути меншою за стандартну температуру самоспалахування на 100÷150 °С. Числові значення мінімальної  $t_{cc}$  використовують під час розробки пожежо-профілактичних заходів, пов'язаних з безпечним високотемпературним нагрівом речовин та матеріалів.

### **Практичне значення температури самоспалахування**

Температуру самоспалахування речовини використовують для:

- 1) порівняння пожежонебезпеки речовин за значенням  $t_{cc}$ ;
- 2) класифікації пари рідин по групах вибухонебезпечних сумішей з повітрям для вибору типу вибухозахищеного енергоустановки згідно [32]:

Таблиця 2.1 – Визначення групи вибухонебезпечних сумішей за їх температурою самоспалахування

Група вибухонебезпечних сумішей	Температура самоспалахування, °С
T1	більше за 450
T2	300–450
T3	200–300
T4	135–200
T5	100–135
T6	85–100

за групою вибухонебезпечних сумішей установлюють максимально припустиму температуру нагріву поверхні електричного обладнання у вибухонебезпечних приміщеннях і у зовнішніх установках, якщо можливий контакт цих поверхонь з вибухонебезпечним середовищем.

3) визначення припустимої температури нагрівання робочих поверхонь технологічного обладнання (безпечної температури  $t_{без}$ ): необхідно підтримувати температури нагрівання поверхонь машин, механізмів, устаткування, пристроїв, речовин і матеріалів, що можуть вступити у контакт із горючим середовищем, нижче гранично припустимої, як 80 % від стандартної  $t_{cc}$ :

$$t_{без} \leq 0,8 \cdot t_{cc}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.1)$$

## § 2. Розрахунок температури самоспалахування

Стандартну температуру самоспалахування газів і парів органічних сполук можна приблизно розрахувати за емпіричними формулами [5]:

$$t_{cc} = 300 + 116\sqrt{5 - \ell_{сер}}, \text{ якщо } \ell_{сер} \leq 5; \quad (2.2)$$

$$t_{cc} = 300 - 38\sqrt{\ell_{сер} - 5}, \text{ якщо } \ell_{сер} \geq 5, \quad (2.3)$$

де  $\ell_{сер}$  – умовна середня довжина ланцюга молекули.

Похибка розрахунку за формулами (2.2) і (2.3) для органічних сполук, що складаються з атомів С, Н, О та N, становить 25 °С.

Умовна середня довжина  $\ell_{сер}$  молекули хімічної сполуки дорівнює середньому арифметичному всіх можливих довжин  $\ell_i$  ланцюгів молекули:

$$\ell_{сер} = \frac{\sum \ell_i}{n_{ланц}}, \quad (2.4)$$

де  $\ell_i$  – довжина  $i$ -го ланцюга молекули;  $n_{ланц}$  – число ланцюгів молекули.

У даному випадку під *ланцюгом молекули* розуміють безперервний ланцюг атомів, що з'єднує дві кінцеві групи. Число ланцюгів  $n_{ланц}$  молекули дорівнює числу сполучень із числа кінцевих груп у молекулі  $m$ :

$$n_{ланц} = 0,5 \cdot m(m - 1). \quad (2.5)$$

Кінцевими групами вважають  $-CH_3$ ,  $=CH_2$ , функціональні групи. Якщо функціональна група або цикл розташовані в середині ланцюга, їх слід вважати одночасно і кінцевою, і проміжною групою.

Довжину  $\ell_i$  ланцюга молекули розраховують як суму числа атомів карбону в даному  $i$ -тому ланцюзі  $m_{C_i}$  та еквівалентних довжин функціональних груп і циклів, що входять в даний ланцюг,  $\ell_e$ :  $\ell_i = m_{C_i} + \sum \ell_e$ .

Розрахункове число атомів карбону в аліфатичному вуглеводні дорівнює фактичному числу атомів карбону в даному ланцюзі. Подвійний зв'язок  $C=C$  довжину ланцюга не змінює. Потрійний зв'язок  $C \equiv C$  збільшує довжину ланцюга, в якому він міститься, на  $6/(m_{C_i})$  атомів карбону. Довжина ланцюга, що містить ароматичний цикл з двома групами в *орто*-положенні зростає на 2. Еквівалентна довжина функціональних груп  $-O-C_6H_5$  та  $-COO-$  дорівнює одиниці, груп  $-NH-$  і  $N \equiv$  дорівнює 2,5, для  $-O-$  у сполуках, де атом кисню не з'єднаний з первинним або вторинним атомом карбону – 3,5. Якщо до молекули приєднано декілька функціональних груп, довжина кожної зменшується у відповідну кількість разів. Еквівалентна довжина неароматичного моноядерного конденсованого циклу дорівнює числу атомів карбону в циклі, яке зменшене на 0,5, а також враховує еквівалентні довжини ароматичних циклів і функціональних груп, що входять до складу даного ядра.

Еквівалентну довжину ароматичного циклу визначають за формулою:

$l_{e_{Ar}} = n_{я} - 0,5 + \sum l_{ef}$ , де  $n_{я}$  – число ядер у циклі;  $\sum l_{ef}$  – сума еквівалентних до-  
вжин функціональних груп, що входять до складу циклу.

З більшою точністю, ніж за формулами (2.2) і (2.3), стандартну температура самоспалахування окремих класів органічних сполук можна визначити за таблицями: для парафінових вуглеводнів – табл. 2.2, для насичених аліфатичних одноатомних спиртів – табл. 2.3, для ароматичних вуглеводнів – табл. 2.4. Середню довжину молекули розраховують за формулою (2.4). При цьому число атомів карбону в ланцюзі аліфатичного спирту розраховують як фактичне число атомів карбону плюс «1», в ланцюзі, в якому є ароматичне кільце – як фактичне число атомів карбону мінус одиниця. Атоми карбону в ароматичному кільці в розрахунок не беруться.

Таблиця 2.2 – Залежність температури самоспалахування парафінових вуглеводнів (алканів) від довжини карбонового ланцюга

$l_{сер}$	$t_{сс}, ^\circ C$	$l_{сер}$	$t_{сс}, ^\circ C$	$l_{сер}$	$t_{сс}, ^\circ C$	$l_{сер}$	$t_{сс}, ^\circ C$
3,0	470	6,0	234	9,0	209	12,0	204
3,1	465	6,1	232	9,1	208	12,1	204
3,2	460	6,2	231	9,2	208	12,2	204
3,3	455	6,3	230	9,3	208	12,3	204
3,4	450	6,4	229	9,4	207	12,4	204
3,5	444	6,5	228	9,5	207	12,5	204
3,6	439	6,6	227	9,6	207	12,6	204
3,7	433	6,7	226	9,7	207	12,7	204
3,8	426	6,8	225	9,8	206	12,8	204
3,9	420	6,9	224	9,9	206	12,9	204
4,0	413	7,0	223	10,0	206	13,0	204
4,1	407	7,1	222	10,1	206	13,1	204
4,2	400	7,2	221	10,2	206	13,2	204
4,3	392	7,3	221	10,3	206	13,3	204
4,4	381	7,4	220	10,4	205	13,4	204
4,5	370	7,5	219	10,5	205	13,5	203
4,6	358	7,6	218	10,6	205	13,6	203
4,7	344	7,7	217	10,7	205	13,7	203
4,8	328	7,8	216	10,8	205	13,8	203
4,9	308	7,9	216	10,9	205	13,9	203
5,0	287	8,0	215	11,0	205	14,0	203
5,1	274	8,1	214	11,1	205	14,1	203
5,2	262	8,2	213	11,2	205	14,2	203
5,3	255	8,3	213	11,3	205	14,3	203
5,4	249	8,4	212	11,4	205	14,4	203
5,5	244	8,5	211	11,5	205	14,5	203
5,6	240	8,6	211	11,6	204	14,6	203
5,7	238	8,7	210	11,7	204	14,7	203
5,8	236	8,8	210	11,8	204	14,8	203
5,9	235	8,9	209	11,9	204	14,9	203

Таблиця 2.3 – Залежність температури самоспалахування одноатомних спиртів від довжини карбонового ланцюга

$l_{\text{сп}}$	$t_{\text{сс}}, ^\circ\text{C}$	$l_{\text{сп}}$	$t_{\text{сс}}, ^\circ\text{C}$	$l_{\text{сп}}$	$t_{\text{сс}}, ^\circ\text{C}$	$l_{\text{сп}}$	$t_{\text{сс}}, ^\circ\text{C}$
2,0	464	4,4	337	6,8	272	9,2	245
2,1	463	4,5	333	6,9	270	9,3	244
2,2	461	4,6	326	7,0	269	9,4	243
2,3	459	4,7	326	7,1	267	9,5	243
2,4	457	4,8	322	7,2	266	9,6	241
2,5	455	4,9	319	7,3	264	9,7	241
2,6	452	5,0	315	7,4	263	9,8	240
2,7	448	5,1	312	7,5	262	9,9	240
2,8	443	5,2	309	7,6	261	10,0	239
2,9	438	5,3	306	7,7	260	10,5	236
3,0	433	5,4	304	7,8	258	11,0	234
3,1	423	5,5	301	7,9	257	11,5	233
3,2	420	5,6	299	8,0	256	12,0	232
3,3	413	5,7	296	8,1	255	12,5	232
3,4	405	5,8	294	8,2	254	13,0	231
3,5	396	5,9	291	8,3	253	13,5	231
3,6	385	6,0	289	8,4	252	14,0	230
3,7	376	6,1	287	8,5	251	14,5	230
3,8	369	6,2	284	8,6	250	15,0	229
3,9	361	6,3	282	8,7	249	15,5	229
4,0	355	6,4	280	8,8	248	16,0	228
4,1	350	6,5	278	8,9	247	16,5	228
4,2	346	6,6	276	9,0	246	17,0	227
4,3	341	6,7	274	9,1	246	17,5	227

Таблиця 2.4 – Залежність температури самоспалахування ароматичних сполук від довжини карбонового ланцюга

$l_{\text{сп}}$	$t_{\text{сс}}, ^\circ\text{C}$	$l_{\text{сп}}$	$t_{\text{сс}}, ^\circ\text{C}$	$l_{\text{сп}}$	$t_{\text{сс}}, ^\circ\text{C}$	$l_{\text{сп}}$	$t_{\text{сс}}, ^\circ\text{C}$
-2,0	570	-0,4	557	1,2	437	2,8	425
-1,9	569	-0,3	556	1,3	436	2,9	425
-1,8	568	-0,2	554	1,4	435	3,0	424
-1,7	567	-0,1	551	1,5	434	3,1	424
-1,6	567	0,0	546	1,6	433	3,2	424
-1,5	566	0,1	537	1,7	432	3,3	424
-1,4	565	0,2	521	1,8	431	3,4	423
-1,3	564	0,3	501	1,9	430	3,5	423
-1,2	564	0,4	480	2,0	430	3,6	423
-1,1	563	0,5	460	2,1	429	3,7	423
-1,0	562	0,6	450	2,2	428	3,8	423
-0,9	562	0,7	445	2,3	428	3,9	423
-0,8	561	0,8	442	2,4	427	4,0	422
-0,7	560	0,9	440	2,5	427	4,1	422
-0,6	559	1,0	439	2,6	426	4,2	422
-0,5	558	1,1	438	2,7	426	4,3	422



Температуру самоспалахування окремих класів органічних сполук можна визначити порівняльним розрахунком за емпіричною формулою:

$$t_{cc} = at_{cc}^{алк} + b, \quad (2.6)$$

де  $a$ ,  $b$  – коефіцієнти гомологічного ряду даної речовини (табл. 2.5);  $t_{cc}^{алк}$  –  $t_{cc}$  алкану, що відповідає середній довжині  $\ell_{сер}$  алкільного радикалу молекули.

Таблиця 2.5 – Коефіцієнти для визначення температури самоспалахування окремих класів органічних сполук

Сполуки	a	b	Похибка, °C
спирти	0,6796	121,2	28
сполуки з групою – NH <sub>2</sub>	0,4722	170,4	19,8
ароматичні сполуки	0,6412	252,9	15
карбонові кислоти	0,7556	86,0	17
естери (складні ефіри):			
форміати	0,7719	81,5	19,2
ацетати	0,7909	52,0	15
пропіонати	0,7158	91,3	10

Якщо середню довжину ланцюга молекули можна розрахувати різними способами, то приймають середнє значення з усіх розрахованих методів.

Якщо необхідно визначити  $t_{cc}$  суміші горючих рідин, можна використати формули (2.2) або (2.3). При цьому середню довжину ланцюга умовної молекули газової суміші визначають з урахуванням мольних часток компонентів.

Визначальною причиною наявності похибок при розрахунку  $t_{cc}$  речовин є неточність методик визначення середньої довжини молекули  $\ell_{сер}$ . Це зумовлено тим, що стандартні методики опосередковано враховують ефекти перерозподілу електронної щільності у молекулі. Як відомо, розрізняють мезомерний та індуктивний ефекти, які бувають позитивної та негативної дії. Мезомерний ефект – це зміщення електронної щільності хімічного зв'язку по  $\pi$ -зв'язку, він слабо затухає по системі сполучених зв'язків. Найбільш характерними групами, яким властивий такий ефект, є групи з неподільними електронними парами. Індуктивний ефект – це зміщення електронної щільності хімічного зв'язку по  $\sigma$ -зв'язку за наявності певних замісників. Характерною особливістю цього ефекту у порівнянні з мезомерним ефектом є його швидке затухання по ланцюгу зв'язків. Мезомерний та індуктивний ефекти можуть додаватися або компенсувати вплив один одного. Дія ефектів по карбонівому ланцюгу вуглеводнів поширюється не більше ніж до п'ятого атому карбону від функціональної групи по безперервному ланцюгу зв'язків. Сукупна дія означених ефектів визначає відмінність окремих класів речовин у реакційній здатності і у значенні температури самоспалахування  $t_{cc}$ . Наприклад, у молекулах кетонів  $\text{R}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{R}$  та складних ефірів  $\text{R}_{оп}-\text{O}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{R}_к$  присутні мезомерний

Розділ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння ефект в обидва боки від групи C=O до п'ятого атома карбону й індукційний ефект. Відповідно молекула набуває підвищеної здатності до опору температурному впливу до десяти атомів карбону в ланцюгу. Цей вплив є сильнішим за індукційний ефект метилових груп ізомерних сполук, тому  $t_{cc}$  більшості кетонів слабо залежить від ступеня ізомеризації молекули. У зв'язку з цим, середня довжина кетонів становить половину від числа атомів карбону у молекулі:  $l_{сер} = m_c/2$ , де  $m_c$  – число атомів карбону у молекулі; для ізомерних сполук ряду кетонів  $m_c$  беруть на «1» менше за число атомів карбону у молекулі.

У молекулах із середньою довжиною більшою за «10» є незначне зростання  $t_{cc}$ , що пов'язано із завершенням дії електронних ефектів і виникненням в середині молекули області зі стабільною електронною щільністю.

Нетиповою залежність має поле значень  $t_{cc}$  складних ефірів, для яких існує багато власних гомологічних рядів. Так, складні ефіри етанової кислоти (ацетати) за малих довжин спиртового залишку мають  $t_{cc}$  трохи меншу, ніж складні ефіри метанової кислоти (форміати), які коротше ацетатів на один карбоновий ланцюг. Складні ефіри пропанової кислоти (пропіонати) за довжин спиртового залишку від 4 до 6 теж виявляють нетиповий максимум. Для перших п'яти гомологічних рядів складних ефірів (від форміатів до валеріатів) можна відзначити, що основний вплив на  $t_{cc}$  надає збільшення довжини спиртового залишку. Кислотний залишок значно впливає на  $t_{cc}$ , якщо його довжина більша за п'ять атомів карбону (у складних ефірів гексанової кислоти та інших ефірах). Такий характер зміни  $t_{cc}$  визначається впливом на середню довжину молекули еквівалентних довжин груп C=O та -O-.

Тоді визначальним фактором точності прогнозування є точність моделювання еквівалентної довжини  $l_{сер}$  молекули.

У альдегідів накладання електронних ефектів знижує стійкість молекули і значно збільшує їх середню довжину за умови, що  $l_{сер} = 3m_c + 1$ .

У молекулах спиртів присутні мезомерний та індуктивний ефект; можливе розташування алкільних та -ОН груп у бокових положеннях, що ускладнює врахування електронних ефектів. У порівнянні з алканами група -ОН змінює перерозподіл електронної щільності за рахунок від'ємного мезомерного та індуктивного ефектів. Але цей ефект слабкіший ніж в групі C=O кетонів та альдегідів. Якщо молекула спирту має в сусідніх ізомерних положеннях алкільну і гідроксильну групи то електронні ефекти компенсуються і молекула поводить себе як така, що має лише головний ланцюг. Взаємно компенсуються електронні ефекти гідроксильних груп і в діюль нормальної будови. Тому для розрахунку середньої довжини молекули спирту з  $m_{сп} < 5$  прийнята наступна формула:  $l_{сер} = (m_{сп} + m_{Cсер})/2 - (3n_{гп} - 2)/n_c$ .

Якщо максимальна довжина гідроксильно-карбонового ланцюга молекули  $m_{сп} \geq 5$ , то  $l_{сер}$  молекули одноатомного спирту ізомерної будови приймають за довжиною цього ланцюга; для карбінолів та багатоатомних спиртів

Розділ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння – за середнім значенням між найдовшими карбоновим та найменшим гідроксильно-карбоновим (між групами  $-\text{OH}$ ) ланцюгами. Якщо багатоатомний спирт має більш ніж один ізомерний карбоновий ланцюг, додатково враховують найдовший карбоновий ланцюг такої молекули.

Якщо молекула має  $-\text{OH}$  та метилову групи у сусідніх положеннях, а також більше ніж 3 атоми карбону в ланцюгу від групи  $-\text{OH}$ , то  $l_{\text{сер}}$  молекули спирту приймають за найдовшим карбоновим ланцюгом.

Для простих ефірів нормальної будови, як і для алканів, мінімум стійкості спостерігається для молекул з  $l_{\text{сер}} = 10$ , якщо довжину молекули прийняти за принципом:  $l_{\text{сер}} = 2 + m_{\text{с}}$ , де 2 – еквівалентна довжина групи  $-\text{O}-$ ;  $t_{\text{сс}}$  простих ефірів ізомерної будови можна визначити за методикою для спиртів ізомерної будови в залежності від максимальної довжини гідроксильно-карбонового ланцюга.

### **Методика розрахунку стандартної температури самоспалахування речовини за середньою довжиною ланцюга**

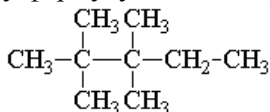
1. Скласти структурну формулу речовини (додаток 20).
2. Пронумерувати ланки у структурній формулі.
3. Визначити число кінцевих груп  $m$  у молекулі речовини.
4. Визначити число ланцюгів  $n_{\text{ланц}}$  у молекулі горючої речовини за формулою (2.5).
5. Виходячи зі структурної формули молекули, визначити довжину кожного ланцюга  $l_i$ .
6. Провести розрахунок умовної середньої довжини ланцюга  $l_{\text{сер}}$  молекули за формулою (2.4).
7. Визначити  $t_{\text{сс}}$  за формулами (2.2), (2.3) або за таблицями 2.2, 2.3, 2.4.
8. Розрахувати максимальну безпечну температуру нагрівання робочих поверхонь за формулою (2.1).
9. Визначити групу вибухонебезпечних сумішей горючих речовин з повітрям за таблицею 2.1.

### **Приклад розв'язання задачі**

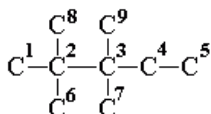
Розрахувати стандартну температуру самоспалахування 2,2,3,3-тетраметилпентану, порівняти розрахункове значення з експериментальним, рівним  $430^\circ\text{C}$ . Визначити безпечну температуру нагрівання поверхонь та групу вибухонебезпечних сумішей пари 2,2,3,3-тетраметилпентану з повітрям.

#### *Розв'язання*

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



2. Нумеруємо атоми карбону в ланцюгах, не враховуючи атоми гідрогену:



3. Визначаємо число кінцевих груп  $m$  молекули 2,2,3,3-тетраметилпентану. Кінцевими будуть групи  $\text{C}^1, \text{C}^5, \text{C}^6, \text{C}^7, \text{C}^8, \text{C}^9$ , тобто  $m = 6$ .

4. Визначаємо число ланцюгів  $n_{\text{ланц}}$  у молекулі за формулою (2.5):

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

5. Визначаємо довжину кожного ланцюга  $\ell_i$ ; складаємо таблицю.

№ ланцюга	Склад ланцюга	Довжина ланцюга
1	1-2-6	3
2	1-2-8	3
3	1-2-3-7	4
4	1-2-3-9	4
5	1-2-3-4-5	5
6	8-2-6	3
7	8-2-3-7	4
8	8-2-3-9	4
9	8-2-3-4-5	5
10	6-2-3-7	4
11	6-2-3-9	4
12	6-2-3-4-5	5
13	9-3-7	3
14	9-3-4-5	4
15	7-3-4-5	4

6. Розраховуємо умовну середню довжину  $\ell_{\text{сеп}}$  молекули 2,2,3,3-тетраметилпентану за формулою (2.4):

$$\ell_{\text{сеп}} = \frac{3 \cdot 4 + 4 \cdot 8 + 5 \cdot 3}{15} = 3,9.$$

7. Визначаємо стандартну температуру самоспалахування:

а) за формулою (2.2), оскільки  $\ell_{\text{сеп}} \leq 5$ :

$$t_{\text{сеп}} = 300 + 116\sqrt{5 - 3,9} = 419,9 \text{ } ^\circ\text{C};$$

б) за таблицею 2.2 для алканів: середній умовній довжині карбонового ланцюга  $\ell_{\text{сеп}} = 3,9$  відповідає температура самоспалахування  $t_{\text{сеп}} = 420 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

8. Розраховуємо максимальну безпечну температуру нагрівання робочих поверхонь за формулою (2.1):

$$t_{\text{без}} = 0,8 \cdot 419,9 = 335,9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

9. Визначаємо групу вибухонебезпечних сумішей 2,2,3,3-тетраметилпентану за табл. 2.1: оскільки  $t_{\text{сеп}} = 420 \text{ } ^\circ\text{C}$  лежить у межах від 300 до 450  $^\circ\text{C}$ , 2,2,3,3-тетраметилпентан відноситься до групи вибухонебезпечних сумішей Т2.

Висновок: розрахункова стандартна температура самоспалахування

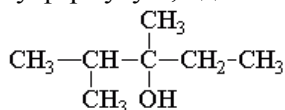
Розділ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння 2,2,3,3-тетраметилпентану дорівнює 420 °С; відхилення розрахунку від експериментального значення становить 10 °С або 2,3 %. Температура нагрівання поверхонь технологічного обладнання не повинна перевищувати 260 °С. Пароповітряна суміш 2,2,3,3-тетраметилпентану відноситься до групи вибухонебезпечних сумішей Т2.

### Приклад розв'язання задачі

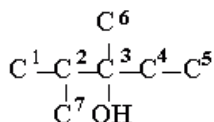
Розрахувати стандартну температуру самоспалахування 2,3-диметилпентанолу-3 та безпечну температуру нагрівання поверхонь технологічного обладнання, в якому обертається дана речовина.

#### Розв'язання

1. Складаємо структурну формулу 2,3-диметилпентанолу-3:



2. Нумеруємо атоми карбону в ланцюгах, не записуючи при цьому атоми гідрогену вуглецевого ланцюга:



3. Визначаємо число кінцевих груп  $m$  2,3-диметилпентанолу-3. Кінцевими групами в даному випадку будуть групи  $\text{C}^1, \text{C}^5, \text{C}^6, \text{C}^7, \text{OH}$ :  $m = 5$ .

4. Визначаємо число ланцюгів  $n_{\text{ланц}}$  у молекулі за формулою (2.5):

$$n_{\text{ланц}} = 0,5m(m - 1) = 0,5 \cdot 5 \cdot (5 - 1) = 10.$$

5. Визначаємо довжину кожного ланцюга  $l_i$ , враховуючи, що розрахункове число атомів карбону в ланцюзі аліфатичного спирту дорівнює фактичному числу атомів карбону плюс одиниця.

№ ланцюга	Склад ланцюга	Довжина ланцюга $l_i$
1	1 - 2 - 7	3
2	1 - 2 - 3 - 6	4
3	1 - 2 - 3 - OH	4
4	1 - 2 - 3 - 4 - 5	5
5	7 - 2 - 3 - OH	4
6	7 - 2 - 3 - 6	4
7	7 - 2 - 3 - 4 - 5	5
8	6 - 3 - 4 - 5	4
9	6 - 3 - OH	3
10	OH - 3 - 4 - 5	4

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

$$l_{\text{сер}} = \frac{3 \cdot 2 + 4 \cdot 6 + 5 \cdot 2}{10} = 4,0.$$

7. Визначаємо температуру самоспалахування за таблицею 2.3. Оскільки умовна середня довжина карбонового ланцюга 2,3-диметилпентанолу-3 становить  $\ell_{\text{сер}} = 4$ , температура самоспалахування дорівнює  $t_{\text{cc}} = 355$  °С.

8. Розраховуємо максимальну безпечну температуру нагрівання робочих поверхонь:

$$t_{\text{без}} = 0,8 \cdot 355 = 284 \text{ °С.}$$

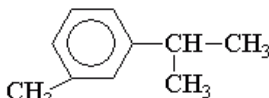
Висновок: розрахункова стандартна температура самоспалахування 2,3-диметилпентанолу-3 дорівнює 355 °С; безпечна температура нагрівання поверхонь технологічного обладнання не повинна перевищувати 284 °С.

### Приклад розв'язання задачі

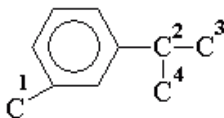
Розрахувати стандартну температуру самоспалахування 3-метил-ізопропілбензолу.

#### Розв'язання

1. 3-метил-ізопропілбензол належить до ароматичних сполук; складемо структурну формулу молекули:



2. Нумеруємо атоми карбону в ланцюгах:



3. Визначаємо число кінцевих груп  $m$  молекули 3-метил-ізопропілбензолу. Кінцевими групами є три метильні групи  $C^1$ ,  $C^3$ ,  $C^4$  і ароматичне кільце  $Ar$  (цикл, розташований у середині ланцюга, вважають одночасно і кінцевою, і проміжною групою). Отже, число кінцевих груп  $m = 4$ .

4. Визначаємо число ланцюгів  $n_{\text{ланц}}$  у молекулі за формулою (2.5):

$$n_{\text{ланц}} = 0,5 \cdot 4 \cdot (4 - 1) = 6.$$

5. Визначаємо довжину ланцюгів  $\ell_i$ , враховуючи, що число атомів карбону в ланцюзі, в якому є ароматичне кільце, приймають як фактичне число атомів карбону мінус одиниця; атоми карбону в ароматичному кільці у розрахунок не беруть.

№ ланцюга	Склад ланцюга	Довжина ланцюга $\ell_i$
1	1 - Ar	0
2	1 - Ar - 2 - 4	2
3	1 - Ar - 2 - 3	2
4	Ar - 2 - 3	1
5	Ar - 2 - 4	1
6	4 - 2 - 3	3

6. Розраховуємо умовну середню довжину ланцюга  $\ell_{\text{сер}}$ :

$$\ell_{\text{сер}} = \frac{2+2+1+1+3}{6} = 1,5.$$

7. За таблицею 2.4 визначаємо температуру самоспалахування 3-метилізопропілбензолу. Оскільки умовна середня довжина карбонового ланцюга дорівнює  $\ell_{\text{сер}} = 1,5$ , температура самоспалахування становить  $t_{\text{cc}} = 434$  °С.

### Приклад розв'язання задачі

Визначити безпечну максимальну температуру нагрівання робочої поверхні радіаційної сушарки фарбувального цеху, якщо розчинником є 2,4-диметил-3-пентанол.

#### Розв'язання

Температура самоспалахування 2,4-диметил-3-пентанолу за довідником [7] дорівнює 325 °С. Визначаємо безпечну максимальну температуру нагрівання робочої поверхні радіаційної сушарки за формулою (2.1):

$$t_{\text{без}} = 0,8 \cdot 325 = 260$$
 °С.

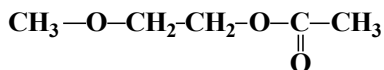
Висновок: температура нагрівання поверхонь радіаційної сушарки фарбувального цеху у разі використання розчинника 2,4-диметил-3-пентанолу не повинна перевищувати 260 °С.

### Приклад розв'язання задачі

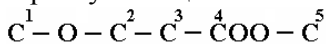
Розрахувати стандартну температуру самоспалахування метоксиетилацетату та безпечну температуру нагрівання поверхонь технологічного обладнання. Порівняти розраховане значення з експериментально визначеною температурою самоспалахування, яка дорівнює 400 °С.

#### Розв'язання

1. Складаємо структурну формулу метоксиетилацетату:



2. Нумеруємо атоми карбону в ланцюгах:



3. Визначаємо число кінцевих груп у молекулі метоксиетилацетату; функціональні групи, розташовані всередині ланцюга, приймаємо і кінцевими, і проміжними. Тому кінцевими будуть групи  $\text{C}^1$ ,  $-\text{O}-$ ,  $-\text{C}^4\text{OO}-$ ,  $\text{C}^5$ , а  $m = 4$ .

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

$$n_{\text{ланц}} = 0,5m(m - 1) = 0,5 \cdot 4 \cdot (4 - 1) = 6.$$

5. Визначаємо довжину кожного ланцюга  $\ell_i$ , враховуючи число атомів карбону та еквівалентну довжину функціональних груп; метоксиетилацет має дві функціональні групи, тому їх розрахункова довжина зменшується у два рази; приймаємо довжину групи  $-\text{O}-$  як 1,75, а групи  $-\text{COO}-$  як 0,5.

Розділ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння

№ ланцюга	Склад ланцюга	Довжина ланцюга $\ell_i$
1	1 – 2	2,75
2	1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6	6,25
3	1 – 2 – 3 – 4 – 5	5,25
4	2 – 3 – 4 – 5 – 6	5,25
5	2 – 3 – 4 – 5	4,25
6	5 – 6	1,5

6. Розраховуємо умовну середню довжину  $\ell_{\text{сер}}$  молекули:

$$\ell_{\text{сер}} = \frac{2,75 + 6,25 + 5,25 \cdot 2 + 4,25 + 1,5}{6} = 4,2.$$

7. Оскільки  $\ell_{\text{сер}} \leq 5$ , визначаємо температуру самоспалахування метоксиетилацетату за формулою (2.2):

$$t_{\text{сc}} = 300 + 116\sqrt{5 - 4,2} = 403 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

8. Розраховуємо максимальну безпечну температуру нагрівання робочих поверхонь:

$$t_{\text{без}} = 0,8 \cdot 403 = 322,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Висновок: розрахункова стандартна температура самоспалахування метоксиетилацетату дорівнює  $403 \text{ } ^\circ\text{C}$ ; відхилення розрахунку від експериментального значення становить  $3 \text{ } ^\circ\text{C}$  або  $0,8 \%$ . Температура нагрівання поверхонь технологічного обладнання не повинна перевищувати  $322,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

### **Методика розрахунку стандартної температури самоспалахування суміші горючих речовин**

1. Визначити склад горючої суміші та встановити молярні частки кожного

компонента суміші за формулою: 
$$r_{\mu_i} = \frac{\mu_i}{\sum_{i=1}^k c_i \mu_i},$$

де  $c_i$  – масова концентрація  $i$ -го компонента у складі горючої суміші, %;  $\mu_i$  – молярна маса  $i$ -го компонента, г-моль<sup>-1</sup>;  $k$  – число компонентів горючої суміші.

2. Скласти структурну формулу кожного компонента горючої суміші та розрахувати їх середню довжину ланцюга  $\ell_{\text{сер}_i}$  за формулою (2.4).

3. Розрахувати середню довжину умовної молекули газової суміші  $\ell_{\text{сер}_{\text{сум}}}$

за формулою:

$$\ell_{\text{сер}_{\text{сум}}} = \sum_{i=1}^k r_{\mu_i} \ell_{\text{сер}_i}.$$

4. Визначити стандартну температуру самоспалахування горючої суміші за формулами (2.2) чи (2.3) залежно від середньої довжини ланцюга.

5. Розрахувати максимальну безпечну температуру нагрівання робочих поверхонь за формулою (2.1).



**Приклад розв'язання задачі**

Розрахувати стандартну температуру самоспалахування розчинника РС–1 та безпечну максимальну температуру нагрівання поверхонь технологічного обладнання. Порівняти розраховане значення з експериментально визначеною температурою самоспалахування, яка дорівнює 490 °С.

*Розв'язання*

1. Визначаємо склад розчинника РС–1 та молярні маси компонентів суміші за довідником [7]:

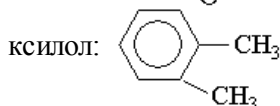
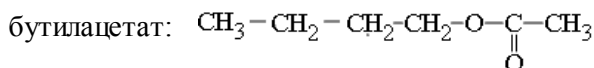
№	компонент суміші	формула	сі, мас. %	$\mu_i$ , г·моль <sup>-1</sup>
1	бутилацетат	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	30	116
2	толуол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	60	92
3	ксилол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	10	106

Розраховуємо мольні частки компонентів розчинника РС–1:

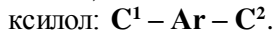
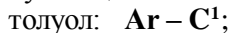
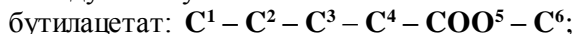
$$r_{\mu 1} = \frac{\frac{30}{116}}{\frac{30}{116} + \frac{60}{92} + \frac{10}{106}} = 0,26; \quad r_{\mu 2} = \frac{\frac{60}{92}}{\frac{30}{116} + \frac{60}{92} + \frac{10}{106}} = 0,65; \quad r_{\mu 3} = \frac{\frac{10}{106}}{\frac{30}{116} + \frac{60}{92} + \frac{10}{106}} = 0,09.$$

2. Визначаємо середню довжину ланцюга  $\ell_{\text{сер},i}$  кожного компонента розчинника РС–1.

2.1. Складаємо структурні формули компонентів суміші:



2.2. Визначаємо число ланцюгів та їх довжину для кожного компонента розчинника РС–1. Нумеруємо атоми карбону та функціональні групи, що входять до складу молекули:



Бутилацетат має 3 кінцеві групи, враховуючи групу –COO–, довжину якої приймаємо як 1: C<sup>1</sup>, COO<sup>5</sup>, C<sup>6</sup>. Отже, за формулою (2.5)  $m = 3$ .

№ ланцюга	Склад ланцюга	Довжина ланцюга $\ell_i$
1	1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6	6
2	1 – 2 – 3 – 4 – 5	5
3	5 – 6	2

Толуол та ксилол мають ароматичне кільце, яке приймаємо і кінцевою, і проміжною групою; воно зменшує довжину карбонового ланцюга на 1.

Розділ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння  
Толуол має 2 кінцеві групи – C<sup>1</sup>, Ar, тому число ланцюгів дорівнює 1.

№ ланцюга	Склад ланцюга	Довжина ланцюга $\ell_i$
1	Ar – 1	0

Ксилол має 3 кінцеві групи: C<sup>1</sup>, Ar, C<sup>2</sup>. Отже, число ланцюгів у молекулі ксилолу дорівнює 3. Крім того, ксилол має карбоновий ланцюг в орто- положенні, тому розрахункова довжина ланцюга збільшується на 2.

№ ланцюга	Склад ланцюга	Довжина ланцюга $\ell_i$
1	1 – Ar	0
2	1 – Ar – 2	4
3	Ar – 2	0

2.3. Розраховуємо умовну середню довжину складових розчинника РС–1:

$$\ell_{\text{сер1}} = \frac{6+5+2}{3} = 4,33; \ell_{\text{сер2}} = 0; \ell_{\text{сер3}} = \frac{0+4+0}{3} = 1,33.$$

3. Визначаємо середню довжину умовної молекули розчинника РС–1:

$$\ell_{\text{сер}} = 0,26 \cdot 4,33 + 0,65 \cdot 0 + 0,09 \cdot 1,33 = 1,2.$$

4. Оскільки  $\ell_{\text{сер}} \leq 5$ , визначаємо температуру самоспалахування розчинника РС–1 за формулою (2.2):

$$t_{\text{cc}} = 300 + 116\sqrt{5 - \ell_{\text{сер}}} = 300 + 116\sqrt{5 - 1,2} = 526 \text{ }^\circ\text{C}.$$

5. Розраховуємо максимальну безпечну температуру нагрівання робочих поверхонь:

$$t_{\text{без}} = 0,8 \cdot 526 = 420,8 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Висновок: розрахункова стандартна температура самоспалахування розчинника РС–1 дорівнює 526 °С; відхилення розрахунку від експериментального значення становить 36 °С або 7,3 %. Температура нагрівання поверхонь технологічного обладнання не повинна перевищувати 420,8 °С.

### **Методика розрахунку стандартної температури самоспалахування за константами гомологічного ряду**

1. Записати структурну формулу речовини та визначити, до якого гомологічного класу відноситься дана хімічна сполука.

2. Розрахувати температуру самоспалахування вуглеводневого радикала, що входить до складу речовини даного гомологічного ряду (наприклад: пропілацетат C<sub>5</sub>H<sub>10</sub>O<sub>2</sub> відноситься до складних ефірів – ацетатів, а вуглеводним радикалом для нього буде пропан).

3. Визначити коефіцієнти  $a$  і  $b$  рівняння (2.6) за таблицею 2.5.

4. Розрахувати  $t_{\text{cc}}$  речовини за рівнянням (2.6).

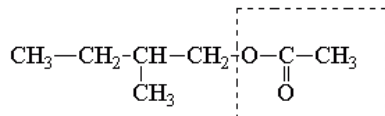
**Приклад розв'язання задачі**

Розрахувати температуру самоспалахування 2-метилбутилацетату та безпечну температуру нагрівання поверхонь технологічного обладнання. Порівняти розраховане значення з експериментально визначеною температурою самоспалахування, яка дорівнює 390 °С.

*Розв'язання*

1. 2-метилбутилацетат відноситься до складних ефірів оцтової кислоти,

його структурну формула:

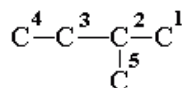


Алкільний радикал      Функціональна група

2. Проводимо розрахунок  $t_{cc}$  вуглеводневого радикала.

2.1. Вуглеводневим радикалом є 2-метилбутан:  $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-\text{CH}_3$

2.2. Нумеруємо атоми карбону в ланцюгах:



2.3. Визначаємо число кінцевих груп  $m$  2-метилбутану. Кінцевими групами будуть групи  $\text{C}^1, \text{C}^4, \text{C}^5$ . Таким чином, число кінцевих груп  $m = 3$ .

2.4. Визначаємо число ланцюгів  $n_{\text{ланц}}$  в радикалі:  $n_{\text{ланц}} = 0,5 \cdot 3 \cdot (3 - 1) = 3$ .

2.5. Визначаємо довжину кожного ланцюга  $\ell_i$ :

№ ланцюга	Склад ланцюга	Довжина ланцюга $\ell_i$
1	1- 2- 3- 4	4
2	1- 2- 3- 5	4
3	5- 3- 4	3

2.6. Розраховуємо умовну середню довжину  $\ell_{\text{сер}}$ :  $\ell_{\text{сер}} = \frac{4 \cdot 2 + 3}{3} = 3,7$ .

2.7. Розраховуємо температуру самоспалахування алкільного радикала за формулою (2.2), оскільки  $\ell_{\text{сер}} < 5$ :  $t_{cc} = 300 + 116\sqrt{5 - 3,7} = 432$  °С.

3. Визначасмо константи  $a$  і  $b$  із табл. 2.5 для ацетатів:  $a = 0,7909$ ,  $b = 52,0$ .

4. Розраховуємо температуру самоспалахування 2-метилбутилацетату за формулою (2.6):  $t_{cc} = a t_{cc}^{\text{алк}} + b = 0,7909 \cdot 432 + 52,0 = 393,8$  °С.

5. Розраховуємо максимальну безпечну температуру нагрівання робочих поверхонь за формулою (2.2):  $t_{\text{роб}_{\text{ез}}} \leq 0,8 \cdot 393,8 = 315$  °С.

Висновок: розрахункове значення  $t_{cc}$  2-метилбутилацетату становить 393,8 °С, що відрізняється від встановленої за дослідом на 3,8 °С, похибка розрахунку склала менше 1 %. Температура нагрівання поверхонь технологічного обладнання, де обертається ця речовина, має не перевищувати 315 °С.

## ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Для наведених у таблиці речовин розрахувати:

- а) стандартну температуру самоспалахування за середньою довжиною ланцюга;  
 б) групу вибухонебезпечних сумішей і безпечну температуру нагрівання робочої поверхні обладнання  $t_{p,без}$ .

№	Назва речовини	Формула	№	Назва речовини	Формула
1.	2,2-диметилпропан	$C_5H_{12}$	14.	Октилциклогексан	$C_{14}H_{28}$
2.	2-метилбутан	$C_5H_{12}$	15.	Оцтова кислота	$C_2H_4O_2$
3.	2,2,4-триметилпентан	$C_8H_{18}$	16.	Оцтовий ангідрид	$C_4H_6O_3$
4.	2,2,3,6-тетраметилгептан	$C_{11}H_{24}$	17.	Пентан	$C_5H_{12}$
5.	2,5-диметил-5-етил-3-пропілгептан	$C_{14}H_{30}$	18.	Пентанол-2	$C_5H_{12}O$
			19.	Триметилгексан	$C_9H_{20}$
6.	2-метилпропен-1	$C_4H_8$	20.	Пропіонова кислота	$C_3H_6O_2$
7.	2,4,4 -триметилпентен-1	$C_8H_{16}$	21.	Мурашина кислота	$CH_2O_2$
8.	бутанол	$C_4H_{10}O$	22.	Нонан	$C_9H_{20}$
9.	гексанол	$C_6H_{14}O$	23.	Ноніловий спирт	$C_9H_{20}O$
10.	2-метилбутанол-3	$C_5H_{12}O$	24.	Октан	$C_8H_{18}$
11.	2-амінобутан	$C_4H_{11}N$	25.	Октаналь	$C_8H_{16}O$
12.	Октанова кислота	$C_8H_{16}O_2$	26.	Гексилметилкетон	$C_8H_{16}O$
13.	Октиловий спирт	$C_8H_{18}O$	27.	Акрилова кислота	$C_3H_4O_2$

2. Для наведених у таблиці речовин розрахувати стандартну температуру самоспалахування за константами гомологічного ряду.

№	Назва речовини	Формула	№	Назва речовини	Формула
1.	амілформіат	$C_6H_{12}O_2$	15.	метилбензоат	$C_8H_8O_2$
2.	бутилформіат	$C_5H_{10}O_2$	16.	етилбензоат	$C_9H_{10}O_2$
3.	пропілформіат	$C_4H_8O_2$	17.	лауриновий спирт	$C_{12}H_{26}O$
4.	бутилпропіонат	$C_7H_{14}O_2$	18.	гексанол-3	$C_6H_{14}O$
5.	етилпропіонат	$C_5H_{10}O_2$	19.	бутанол-2	$C_4H_{10}O$
6.	метилпропіонат	$C_4H_8O_2$	20.	2-метилбутанол-3	$C_5H_{12}O$
7.	метилацетат	$C_3H_6O_2$	21.	етиламін	$C_2H_7N$
8.	етилацетат	$C_4H_8O_2$	22.	2-амінобутан	$C_4H_{11}N$
9.	2-етилбутилацетат	$C_8H_{16}O_2$	23.	діетилетаноламін	$C_6H_{15}ON$
10.	додеканова кислота	$C_{12}H_{24}O_2$	24.	ізобутиламін	$C_4H_{11}N$
11.	диметилпропіонова кислота	$C_5H_{10}O_2$	25.	2-етилгексиламін	$C_8H_{19}N$
12.	гексанова кислота	$C_6H_{12}O_2$	26.	Октанова кислота	$C_8H_{16}O_2$
13.	ізооктанова кислота	$C_8H_{16}O_2$	27.	Октиловий спирт	$C_8H_{18}O$
14.	бензилбензоат	$C_{14}H_{12}O_2$	28.	Оцтова кислота	$C_2H_4O_2$

## 3. Для наведених у таблиці речовин визначити:

- а) яку найвищу безпечну температуру можуть мати робочі поверхні технологічного обладнання, якщо в технологічному процесі використовують зазначені рідини;
- б) можливість використання у технологічному процесі вказаних рідин, якщо технологічне обладнання має задану температуру поверхні.

№	Назва речовини	Хімічна формула	Температура поверхні, °С
1.	2,2-диметилпропан	$C_5H_{12}$	150
2.	2-метилбутан	$C_5H_{12}$	175
3.	2,2,4,-триметилпентан	$C_8H_{18}$	200
4.	2,2,3,6-тетраметилгептан	$C_{11}H_{24}$	225
5.	2-метилпропен-1	$C_4H_8$	250
6.	2,4,4,-триметилпентан-1	$C_8H_{16}$	275
7.	2,4-диметил-3-етилпентан	$C_9H_{20}$	300
8.	2,4-диметил-3-пентанол	$C_7H_{16}O$	325
9.	дитолілметан	$C_{15}H_{16}$	350
10.	1,3-дифенілбензол	$C_{18}H_{14}$	375
11.	1,1-дифенілбутан	$C_{16}H_{18}$	400
12.	3,3-дифенілбутен-1	$C_{16}H_{16}$	425
13.	o-діетилбензол	$C_{10}H_{14}$	450
14.	2-метилпропанол-1	$C_4H_{10}O$	475
15.	ізобутилбензол	$C_{10}H_{14}$	500
16.	2-метилпентан	$C_6H_{14}$	525
17.	2,2,3,3-тетраметилпентан	$C_9H_{20}$	550
18.	2,2,3,4-тетраметилпентан	$C_9H_{20}$	150
19.	3-метилоктан	$C_9H_{20}$	175
20.	4,4-диметилгептан	$C_9H_{20}$	200
21.	2-метилнонан	$C_{10}H_{22}$	225
22.	бутанол	$C_4H_{10}O$	250
23.	гексанол	$C_6H_{14}O$	275
24.	2-метилбутанол-3	$C_5H_{12}O$	300
25.	пропілформіат	$C_4H_8O_2$	325
26.	амілформіат	$C_6H_{12}O_2$	350
27.	бутилпропіонат	$C_7H_{14}O_2$	375
28.	гексанова кислота	$C_6H_{12}O_2$	400
29.	2-амінобутан	$C_4H_{11}N$	425
30.	етилбензол	$C_8H_{10}$	450
31.	ізопропілбензол	$C_9H_{12}$	475
32.	n-діетилбензол	$C_{10}H_{14}$	500
33.	бензилбензоат	$C_{14}H_{12}O_2$	525
34.	n-ксилол	$C_8H_{10}$	550
35.	етилциклогексан	$C_8H_{16}$	275

4. Розрахувати безпечну температуру нагрівання робочої поверхні об'єкта, в якому обертається суміш речовин заданого складу.

№	Горюча речовина	
	назва	вміст
1.	метилацетат $C_3H_6O_2$	20 % мас.
	циклогексан $C_6H_{12}$	80 % мас.
2.	бутанова кислота $C_4H_8O_2$	25 % об.
	октаналь $C_8H_{16}O$	75 % об.
3.	бензол $C_6H_6$	30 % мас.
	кумол $C_9H_{12}$	70 % мас.
4.	пропанол $C_3H_8O$	40 % об.
	толуол $C_7H_8$	60 % об.
5.	метилбутилкетон $C_6H_{12}O$	25 % об.
	аміловий спирт $C_5H_{12}O$	75 % об.
6.	бензиловий спирт $C_7H_8O$	20 % мас.
	ацетон $C_3H_6O$	30 % мас.
	етилбензол $C_8H_{10}$	50 % мас.
7.	<i>n</i> -метилфенол $C_7H_9O$	30 % об.
	ізопропілбензол $C_9H_{12}$	40 % об.
	бутилформіат $C_5H_{10}O_2$	30 % об.
8.	пропаналь $C_3H_6O$	40 % об.
	декан $C_{10}H_{22}$	50 % об.
	діоксан $C_4H_8O_2$	10 % об.
9.	оцтова кислота $C_2H_4O_2$	5 % мас.
	діетилкетон $C_5H_{10}O$	10 % мас.
	дібутилкетон $C_9H_{18}O$	85 % мас.
10.	метилпропілкетон $C_5H_{10}O$	15 % об.
	анілін $C_6H_7N$	30 % об.
	бутанон $C_4H_8O$	55 % об.

## ГЛАВА 2. САМОЗАЙМАННЯ РЕЧОВИН І МАТЕРІАЛІВ

Всі горючі речовини при контакті з повітрям за певних температур починають окислюватися. Цей процес супроводжується виділенням тепла і може призвести до самонагрівання системи, яке за умови досягнення критичної температури призведе до виникнення горіння [3],[8], [14], [25].

**Самонагрівання** – це підвищення температури системи за рахунок перевищення швидкості тепловиділення в системі внаслідок протікання екзотермічних процесів над швидкістю тепловіддачі від системи в навколишнє середовище. Найменша температура горючої системи, за якої виникає самонагрівання речовини, називається **температурою самонагрівання**.

Температура самонагрівання деяких горючих речовин може бути нижчою, ніж кімнатна температура. Хімічні реакції з енергією активації менше  $42 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$  протікають за кімнатної температури дуже швидко й закінчуються виникненням горіння. Зазвичай процес самонагрівання протікає за температури навколишнього середовища не менше  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  (за більш низьких температур різко зростає інтенсивність тепловіддачі). Речовини з температурою самонагрівання нижче  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  називають **пірофорними речовинами**.

Процес виникнення горіння за рахунок самонагрівання системи внаслідок накопичення тепла всередині самої системи під впливом внутрішніх екзотермічних процесів за сприятливих умов і відсутності джерела запалювання називають **самозайманням**.

Залежно від причин, що викликають процес первинного самонагрівання речовини, розрізняють чотири види samozаймання: фізичне, хімічне, мікробіологічне та теплове.

**Фізичним** називається samozаймання, викликане самонагріванням матеріалу внаслідок тепловиділення фізичних процесів.

Характерними фізичними процесами, що призводять до samozаймання, є процес тертя та адсорбції. Адсорбція – поглинання та утримання парів та газів на поверхні твердої речовини за рахунок міжмолекулярної взаємодії.

До фізичного samozаймання схильні лише тверді горючі матеріали з розвиненою поверхнею, серед яких найбільш характерним є вугілля.

**Хімічним** називається samozаймання, яке виникає внаслідок взаємодії речовин, що реагують з виділенням тепла.

**Мікробіологічне** samozаймання – виникнення горіння внаслідок саморозігріву рослинних продуктів під впливом тепловиділення під час життєдіяльності рослинних клітин і мікроорганізмів.

**Теплове** samozаймання – виникнення горіння внаслідок самонагрівання, що зумовлено тривалим впливом зовнішнього нагрівання речовини вище за температуру самонагрівання. Різке підвищення швидкості екзотермічних реакцій в об'ємі речовини пов'язане, в основному, зі зростанням температури в зоні реакцій під впливом теплового імпульсу.

Не слід вважати, що вказані види самозаймання можуть відбуватися ізольовано один від одного, тобто у «чистому» вигляді. У більшості випадків вид самозаймання виділяється з урахуванням тільки *першопричини протікання екзотермічного процесу*, а на якомусь його етапі даний процес закінчується і «передає естафету» іншому екзотермічному процесу.

Процес самозаймання можна розділити на два основні етапи: самонагрівання та, власне, виникнення горіння. Перший етап характеризується порівняно плавною зміною параметрів системи (температури, складу газового середовища та ін.) і протікає протягом значного проміжку часу. Початку ж другого етапу властивий високий динамізм фізичних та хімічних процесів і стрімка зміна параметрів.

Оскільки підведення тепла до системи ззовні відсутнє, умови виділення й віддачі тепла при самозайманні мають визначальне значення. Зростання температури у процесі самонагрівання зумовлене накопиченням тепла в умовах, що сприяють добрій теплоізоляції матеріалу.

На швидкість протікання процесу самонагрівання, а отже, і на схильність матеріалу до самозаймання, найбільше будуть впливати такі чинники, як:

- тепловий ефект екзотермічних процесів ( $Q \uparrow - t_{\text{сн}} \downarrow$ );
- концентрація кисню в окислювальному середовищі ( $\varphi_{\text{O}_2} \uparrow - t_{\text{сн}} \downarrow$ );
- величина поверхні окиснення, тобто ступінь подрібнення або пористість матеріалу, нерівномірність його укладання в об'ємі ( $S_{\text{ок}} \uparrow - t_{\text{сн}} \downarrow$ );
- швидкість надходження окисника в товщу матеріалу: повільне надходження  $V_{\text{пов}} \uparrow$  надає додатковий доступ кисню, тому  $t_{\text{сн}} \downarrow$ ; швидке надходження  $V_{\text{пов}} \uparrow$  надає додаткове охолодження надлишком повітря, тому  $t_{\text{сн}} \uparrow$ );
- теплофізичні характеристики матеріалу: густина, теплоємність, теплопровідність ( $\rho, c_p, \lambda \uparrow - t_{\text{сн}} \uparrow$ );
- коефіцієнт конвекційної тепловіддачі ( $\alpha \uparrow - t_{\text{сн}} \uparrow$ );
- початкова температура середовища ( $t_{\text{поч}} \uparrow - t_{\text{сн}} \downarrow$ );
- питома поверхня тепловіддачі, тобто відношення площі тепловіддачі до об'єму системи ( $S_{\text{пит}} \uparrow - t_{\text{сн}} \uparrow$ ).

*Період індукції* при самозайманні змінюється в дуже широких межах і може тривати протягом кількох тижнів і навіть місяців.

## § 1. Хімічне самозаймання

Залежно від характеру окисника, який вступає в реакцію з горючим матеріалом, хімічне самозаймання буває трьох видів [3]: при контакті з киснем повітря; при контакті з водою; при контакті з хімічним окисником.

У всіх вказаних випадках тепло, що виділяється під час реакції, може нагріти горючі речовини, які виділяються внаслідок реакції або знаходяться у контакті, до критичної температури самоспалахування або тління.



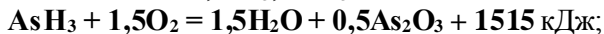
До хімічного самозаймання при *контакті з киснем повітря* здатні:

1) лужні, лужноземельні метали, алюміній (рубідій та цезій самозаймаються в кусковому вигляді, інші – лише у вигляді порошоків):



2) білий та жовтий фосфор:  $2\text{P} + 2,5\text{O}_2 = \text{P}_2\text{O}_5 + 1550,3 \text{ кДж};$

3) гідриди неметалів:  $\text{SiH}_4, \text{PH}_3, \text{AsH}_3:$



4) пірофорне сірчисте залізо: сульфід FeS, FeS<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>S<sub>3</sub>:



5) металоорганічні сполуки: етилат натрію C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>ONa, діетилалюмінійхлорид (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>AlCl, триетилалюміній (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>3</sub>Al, діетилцинк Zn(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>;

6) деякі жири та олії рослинного походження, а також просочені ними горючі матеріали.

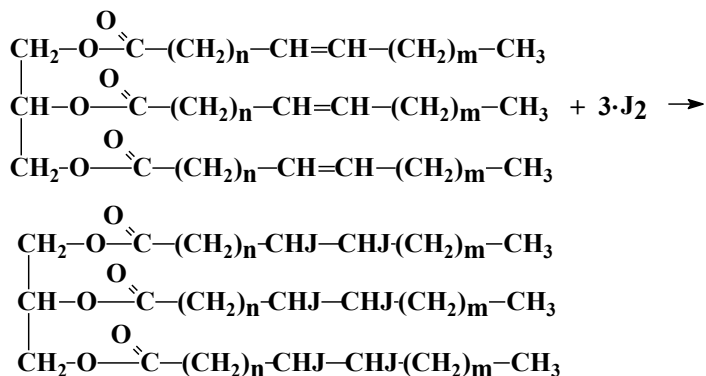
Жири та олії рослинного походження являють собою суміш гліцеридів – складних ефірів трьохатомного спирту гліцерину з високомолекулярними ненасиченими або насиченими (жирними) карбоновими кислотами. Молекули дигліцеридів мають загальну формулу C<sub>3</sub>H<sub>5</sub>OH(COOR)<sub>2</sub>, тригліцеридів – C<sub>3</sub>H<sub>5</sub>(COOR)<sub>3</sub>, де R – вуглеводневий радикал карбонової кислоти, який має нерозгалужений ланцюг атомів карбону. Радикал карбонової кислоти може бути насиченим або ненасиченим.

Самонагрівання з подальшим самозайманням олії та просоченого олією горючого матеріалу відбувається за рахунок тепловиділення реакцій окиснення та полімеризації, що протікають по місцях подвійних зв'язків у ланцюзі карбонової кислоти, за наявності умов для акумуляції тепла.

Насичені карбонові кислоти із загальною формулою C<sub>n</sub>H<sub>(2n+1)</sub>COOH (наприклад, пальмітинова кислота C<sub>15</sub>H<sub>31</sub>COOH) мають низьку хімічну активність і за низьких температур не полімеризуються й не окислюються. Ненасичені карбонові кислоти олеїнового ряду містять один подвійний зв'язок і мають загальну формулу C<sub>n</sub>H<sub>(2n-1)</sub>COOH, наприклад, деценова кислота C<sub>9</sub>H<sub>17</sub>COOH. Збільшення кількості ненасичених зв'язків у гліцериді збільшує схильність олії до самозаймання.

Визначити кількість подвійних зв'язків можна шляхом *йодометричного методу*. Даний метод ґрунтується на здатності галогенів (йоду) приєднуватися до органічних сполук у місцях подвійних зв'язків. За кількістю йоду, який вступив у реакцію приєднання, можна судити про наявність ненасичених зв'язків та схильність жиру або олії, до складу яких вони входять, до самозаймання. Чим більше йоду реагує з даною масою досліджуваної речовини, тим вище її ненасиченість, а отже, і схильність до самозаймання. Критерієм такої оцінки є *йодне число* (J<sub>ч</sub>), яке позначає, скільки грамів йоду приєднується за умов дослідження (або за розрахунком) до 100 грамів олії. Якщо J<sub>ч</sub> < 50, олія не схильна до самозаймання, а якщо J<sub>ч</sub> > 50 – схильна.

Реакцію приєднання йоду до подвійного зв'язку радикала карбонової кислоти у складі гліцериду можна представити наступною схемою:



Йодне число деяких олій наведено в табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Йодне число деяких олій та жирів

Олія або жир	Йодне число	Олія або жир	Йодне число	Олія або жир	Йодне число
Олії				Жири	
скипидарна	300	бавовняна	100÷120	сардиновий	170÷190
перилова	190÷206	кунжутна	110	трісковий	160÷180
лляна	170÷200	гірчична	96÷107	моржевий	160
тунгова	154÷176	мигдальна	92÷105	дельфіній	130÷140
конопельна	145÷167	арахісова	92	тюленийчий	122÷162
ойтисикова	140÷160	касторова	84÷90	оселедцевий	115÷146
сафлорова	130÷155	оливкова	84÷90	китовий	102÷144
горіхова	131÷143	пальмова	10÷84	солемас техн.	70÷80
макова	132÷157	какао	32÷36	кашалотовий	62–123
рижійна	132÷155	пальмоядрова	12÷20	свинячий	46÷66
рапсова	128÷132	кокосова	7÷10	кістковий	39÷50
соняшникова	127÷136			яловичий	32÷47
соева	114÷139			баранячий	31÷46
кукурудзяна	111÷133			вершковий	25÷47

Експериментально йодне число визначають за методиками Гюбля, Вейса, Виноградова та інших дослідників. Якщо відомий якісний та кількісний склад олії, йодне число можна визначити за розрахунком.

Дуже небезпечним у практичній діяльності підрозділів цивільного захисту є хімічне самозаймання при *контакті з водою*.

Реакції деяких речовин із водою або вологою повітря протікають із виділенням значної кількості теплоти, під дією якої горючі продукти реакції і вихідні речовини займаються, а негорючі матеріали нагріваються до високої температури і можуть викликати займання горючих речовин, які знаходяться поблизу зони реакції.

Залежно від складу вихідних речовин при реакції з водою утворюються різні газоподібні продукти: водень, ацетилен, метан, етан та інші гази. Саме ці гази спочатку будуть спалахувати під впливом теплоти хімічної реакції.

До речовин, які самозаймаються при контакті з водою, можна віднести лужні метали, гідриди металів ( $\text{NaNH}_2$ ;  $\text{KNH}_2$ ;  $\text{CaH}_2$ ), оксиди й пероксиди металів ( $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}_2$ ), карбід металів ( $\text{CaC}_2$ ,  $\text{K}_2\text{C}_2$ ), фосфіди та силіциди різних металів, деякі металоорганічні сполуки.

Реакція лужних металів, гідридів лужних і лужноземельних металів із водою або вологою повітря йде з виділенням водню і значної кількості тепла, від якого самоспалахує водень і самозаймаються метал або гідрид металу:



Взаємодія карбідів лужних і лужноземельних металів із водою протікає дуже бурхливо й може закінчуватися вибухом. При цьому метали згоряють повністю, а карбон виділяється у вільному стані або у вигляді ацетилену:

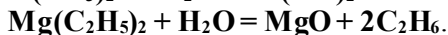
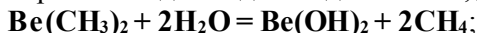


При взаємодії карбідів металів зі стехіометричною кількістю води виділяється стільки тепла, що система розігрівається до  $920^\circ\text{C}$  (карбід кальцію) і ацетилен, що утворюється в ході реакції, самоспалахує.

Силіциди різних металів при дії води виділяють гідрид силіцію (силан), який самоспалахує на повітрі:

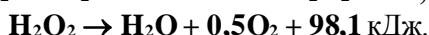


Деякі металоорганічні сполуки реагують із водою, утворюючи горючі гази; диметилберилій при взаємодії з водою виділяє метан, діетилмагній – етан:



Теплота, що виділяється при цьому, призводить до займання газу, що утворюється, і вихідної речовини.

Деякі речовини при взаємодії із водою не утворюють горючих продуктів, але теплота, що виділяється при цьому, розігріває зону реакції до високих температур, що сприяє виникненню горіння інших горючих матеріалів, які знаходяться поблизу. До таких речовин відносяться оксиди й пероксиди металів, хлорид алюмінію, сірчана кислота, хлорсульфонова кислота та ін. Так, оксид кальцію (негашене вапно), реагуючи з невеликою кількістю води, розігрівається до свігіння. При взаємодії пероксиду натрію з водою утворюється пероксид водню, здатний до самовільного розкладання з утворенням води й кисню також із виділенням теплоти:



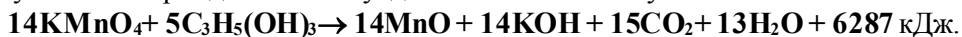
За умови контакту з хімічними окисниками самозаймається більшість

Розділ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння горючих матеріалів органічного походження. Можливість самозаймання значною мірою залежить від властивостей окисника. Залежно від агрегатного стану окисника самозаймання поділяють на 3 підкласи: при контакті з газоподібними окисниками; з рідкими окисниками; з твердими окисниками.

До найбільш поширених газів-окисників відносяться фтор, хлор, кисень, озон. Вони активно сполучаються з рядом речовин, причому реакція супроводжується виділенням великої кількості тепла, внаслідок чого речовини самозаймаються.

До основних рідких окисників відносять пероксид водню, пероксиди лужних і лужноземельних металів, кисневмісні кислоти.

До твердих окисників відносяться оксиди металів із високим ступенем окиснення (оксид хрому  $\text{CrO}_3$ , оксид марганцю  $\text{Mn}_2\text{O}_7$ ), солі кисневмісних кислот із високим ступенем окиснення (хромат та дихромат калію, перманганат калію, хлорат та перхлорат калію, азотнокисле срібло, персульфат амонію  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ ; аміачна та калієва селітра) та деякі інші речовини, що застосовуються як добрива й отрутохімікати в сільському господарстві. Наприклад, при контакті такого сильного окисника як перманганат калію з багатоатомними спиртами (етиленгліколь, гліцерин тощо) відбувається самозаймання буквально через декілька секунд після їхнього змішування:



Тверді горючі матеріали (папір, текстиль, тирса, бавовна та ін.) при контакті з подібними окисниками нагріваються до температури тління й самозаймаються.

### *Методика розрахункового визначення схильності до самозаймання жирів і олій на повітрі*

1. Установити тип гліцеридів карбонових кислот у складі олії або жиру за таблицями 5, 6 додатків.

2. Розрахувати молярну масу кожного гліцериду у складі олії  $\mu_i$ .

3. Визначити ступінь ненасиченості (число подвійних зв'язків) карбонової кислоти кожного гліцериду у складі олії або жиру.

3.1. Визначити вуглеводневий радикал карбонової кислоти у складі гліцериду  $\text{R} = \text{C}_n\text{H}_m$ , де  $n$  – число атомів карбону у складі вуглеводневого радикала;  $m$  – число атомів гідрогену у складі вуглеводневого радикала.

3.2. Визначити нестачу атомів гідрогену “ $x$ ” для насиченого стану радикала карбонової кислоти кожного гліцериду, враховуючи, що число атомів гідрогену в насиченому радикалі карбонової кислоти визначається числом атомів карбону  $n$  і дорівнює  $(2n + 1)$ . Насичені кислоти мають  $x = 0$ . Нестачу гідрогену “ $x$ ” можна розрахувати як:

$$m = 2n + 1 - x; \quad x = 2n + 1 - m. \quad (2.7)$$

3.3. Визначити число ненасичених зв'язків у радикалі карбонової кислоти кожного гліцериду  $z$ ; за місцем подвійного зв'язку можливе приєднання

Розділ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння  
двох атомів гідрогену, число подвійних зв'язків буде удвічі меншим:

$$z = \frac{x}{2}. \quad (2.8)$$

4. Визначити число ненасичених зв'язків у складі кожного гліцериду:

$$Z = kz, \quad (2.9)$$

де  $z$  – число ненасичених зв'язків у радикалі карбонової кислоти гліцериду;  $k$  – число радикалів карбонової кислоти даного типу у складі гліцериду.

5. Визначити еквівалентну масу йоду в реакції приєднання до кожного гліцериду із пропорції:

$$\begin{aligned} & 100 \text{ г гліцериду} - J_{\text{ч}_i} \text{ г йоду,} \\ & \mu_i, \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1} - Z_i \cdot 254 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}, \\ & J_{\text{ч}_i} = \frac{254 \cdot Z_i \cdot 100}{\mu_i}, \end{aligned} \quad (2.10)$$

де 254 – молярна маса йоду,  $\text{г} \cdot \text{моль}^{-1}$ .

6. Якщо олія складається з декількох гліцеридів, її йодне число визначається як сума добутків йодних чисел кожного компонента на їх масову частку в суміші:

$$J_{\text{ч}} = \sum J_{\text{ч}_i} \frac{\varphi_i}{100}, \quad (2.11)$$

де  $\varphi_i$  – концентрація гліцериду у складі олії.

7. За визначеним йодним числом олії, шляхом порівняння із критичним йодним числом  $J_{\text{ч(кр)}} = 50$ , зробити висновок щодо схильності олії даного складу до самозаймання.

### Приклад розв'язання задачі

Визначити за розрахунком схильність до самозаймання рослинної олії, яка містить тригліцериди карбонових кислот ерукової – 54 %, олеїнової – 16 %, лінолевої – 16 %, ліноленої – 10 %, пальмітинової – 4 %.

#### Розв'язання

1. Дана рослинна олія у своєму складі має п'ять компонентів, хімічний склад яких визначаємо за таблицею б додатків:

№	тригліцерид	формула	вміст
1	ерукової кислоти	$C_3H_5(COOC_{21}H_{41})_3$	54 %
2	олеїнової кислоти	$C_3H_5(COOC_{17}H_{33})_3$	16 %
3	лінолевої кислоти	$C_3H_5(COOC_{17}H_{31})_3$	16 %
4	ліноленої кислоти	$C_3H_5(COOC_{17}H_{29})_3$	10 %
5	пальмітинової кислоти	$C_3H_5(COOC_{15}H_{31})_3$	4 %

2. Розраховуємо молярну масу тригліцеридів карбонових кислот за кількістю атомів даного типу:

Розділ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння

$$\begin{aligned} C_3H_5(COOC_{21}H_{41})_3: \mu_1 &= 12 \cdot 3 + 5 \cdot 1 + (12 + 16 \cdot 2 + 12 \cdot 21 + 41 \cdot 1)3 = 1052 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}; \\ C_3H_5(COOC_{17}H_{33})_3: \mu_2 &= 12 \cdot 3 + 5 \cdot 1 + (12 + 16 \cdot 2 + 12 \cdot 17 + 33 \cdot 1)3 = 884 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}; \\ C_3H_5(COOC_{17}H_{31})_3: \mu_3 &= 12 \cdot 3 + 5 \cdot 1 + (12 + 16 \cdot 2 + 12 \cdot 17 + 31 \cdot 1)3 = 878 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}; \\ C_3H_5(COOC_{17}H_{29})_3: \mu_4 &= 12 \cdot 3 + 5 \cdot 1 + (12 + 16 \cdot 2 + 12 \cdot 17 + 29 \cdot 1)3 = 872 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}; \\ C_3H_5(COOC_{15}H_{31})_3: \mu_5 &= 12 \cdot 3 + 5 \cdot 1 + (12 + 16 \cdot 2 + 12 \cdot 15 + 31 \cdot 1)3 = 816 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1} \end{aligned}$$

3. Визначаємо ступінь ненасиченості карбонової кислоти у складі кожного гліцериду.

3.1. Визначаємо вуглеводневий радикал карбонової кислоти  $R_i = C_nH_m$  у складі кожного гліцериду:

$$R_1 = C_{21}H_{41}; R_2 = C_{17}H_{33}; R_3 = C_{17}H_{31}; R_4 = C_{17}H_{29}; R_5 = C_{15}H_{31}.$$

3.2. Визначаємо нестачу атомів водню до насиченого стану в радикалі карбонової кислоти за формулою (2.7):

$$\begin{aligned} C_{21}H_{41}: \quad x_1 &= 2 \cdot 21 + 1 - 41 = 2; \\ C_{17}H_{33}: \quad x_2 &= 2 \cdot 17 + 1 - 33 = 2; \\ C_{17}H_{31}: \quad x_3 &= 2 \cdot 17 + 1 - 31 = 4; \\ C_{17}H_{29}: \quad x_4 &= 2 \cdot 17 + 1 - 29 = 6; \\ C_{15}H_{31}: \quad x_5 &= 2 \cdot 15 + 1 - 31 = 0. \end{aligned}$$

3.3. Визначаємо число ненасичених зв'язків у радикалі карбонової кислоти гліцериду за формулою (2.8):

$$z_1 = \frac{2}{2} = 1; z_2 = \frac{2}{2} = 1; z_3 = \frac{4}{2} = 2; z_4 = \frac{6}{2} = 3; z_5 = \frac{0}{2} = 0.$$

4. Визначаємо число ненасичених зв'язків у гліцериді за формулою (2.9).  
Через те що тригліцериди містять 3 радикали карбонової кислоти,  $k = 3$ :

$$Z_1 = 3 \cdot 1 = 3; Z_2 = 3 \cdot 1 = 3; Z_3 = 3 \cdot 2 = 6; Z_4 = 3 \cdot 3 = 9; Z_5 = 3 \cdot 0 = 0.$$

5. Визначаємо йодні числа компонентів олії за формулою (2.10):

$$\begin{aligned} J_{ч_1} &= \frac{254 \cdot 3 \cdot 100}{1052} = 72,4 \text{ г}; \quad J_{ч_2} = \frac{254 \cdot 3 \cdot 100}{884} = 86,2 \text{ г}; \\ J_{ч_3} &= \frac{254 \cdot 6 \cdot 100}{878} = 173,1 \text{ г}; \quad J_{ч_4} = \frac{254 \cdot 9 \cdot 100}{872} = 262,2 \text{ г}. \end{aligned}$$

Тригліцерид пальмітинової кислоти не має подвійних зв'язків, тому не здатен до окиснення і не вступає в реакцію приєднання йоду, отже,  $J_{ч_5} = 0$ .

6. Розраховуємо йодне число рапсової олії за формулою (2.11):

$$J_{ч} = 72,4 \frac{54}{100} + 86,2 \frac{16}{100} + 173,1 \frac{16}{100} + 262,2 \frac{10}{100} = 106,9 \text{ г}.$$

Висновок: йодне число олії більше 50 г, отже, дана олія схильна до самозаймання.

**Приклад розв'язання задачі**

Визначити здатність до самозаймання жиру наступного складу: дигліцерид лінолевої кислоти – 40 %, динасичений – мононенасичений тригліцерид лінолевої і стеаринової кислоти – 60 %.

*Розв'язання*

1. Виходячи із загальної формули гліцеридів та хімічного складу кислот (табл. 6 додатків), визначаємо:

а) структуру молекули дигліцериду лінолевої кислоти: загальна формула дигліцериду –  $C_3H_5OH(COOR)_2$ , ліолева кислота – одноосновна карбонова кислота з двома подвійними зв'язками  $C_{17}H_{31}COOH$ , тому дигліцерид лінолевої кислоти має хімічну формулу  $C_3H_5OH(COOC_{17}H_{31})_2$ ;

б) структуру молекули динасиченого – мононенасиченого тригліцериду лінолевої і стеаринової кислоти: загальна формула тригліцериду –  $C_3H_5(COOR)_3$ , ліоленова карбонова кислота – одноосновна із трьома подвійними зв'язками  $C_{17}H_{29}COOH$ , стеаринова кислота – одноосновна насичена  $C_{17}H_{35}COOH$ , отже, динасичений – мононенасичений тригліцерид лінолевої і стеаринової кислоти має формулу  $C_3H_5(COOC_{17}H_{35})_2(COOC_{17}H_{29})$ .

2. Розраховуємо молярну масу гліцеридів карбонових кислот:

$C_3H_5OH(COOC_{17}H_{31})_2$ :  $\mu_1 = 12 \cdot 3 + 5 \cdot 1 + 16 \cdot 1 + 1 + (16 \cdot 2 + 12 \cdot 18 + 31 \cdot 1) \cdot 2 = 616 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$ ;

$C_3H_5(COOC_{17}H_{35})_2(COOC_{17}H_{29})$ :

$\mu_2 = 12 \cdot 3 + 5 \cdot 1 + (16 \cdot 2 + 12 \cdot 18 + 35 \cdot 1) \cdot 2 + (16 \cdot 2 + 12 \cdot 18 + 29 \cdot 1) = 872 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$ .

3. Визначаємо ступінь ненасиченості (число подвійних зв'язків) карбонової кислоти кожного гліцериду:

3.1. Визначаємо вуглеводневий радикал карбонової кислоти:

– у складі дигліцериду:  $R_1 = C_{17}H_{31}$ ;

– у складі тригліцериду:  $R_2 = C_{17}H_{35}$ ,  $R_3 = C_{17}H_{29}$ .

3.2. Визначаємо нестачу атомів гідрогену “x” для насиченого стану радикала карбонової кислоти кожного гліцериду за формулою (2.7):

$C_{17}H_{31}$ :  $x_1 = 2 \cdot 17 + 1 - 31 = 4$ ;

$C_{17}H_{35}$ :  $x_2 = 2 \cdot 17 + 1 - 35 = 0$ ;  $C_{17}H_{29}$ :  $x_3 = 2 \cdot 17 + 1 - 29 = 6$ .

3.3. Визначаємо число ненасичених зв'язків у радикалі карбонової кислоти кожного гліцериду за формулою (2.8):

лінолевої кислоти:  $z_1 = \frac{4}{2} = 2$ ;

стеаринової кислоти:  $z_2 = \frac{0}{2} = 0$ ; лінолевої кислоти:  $z_3 = \frac{6}{2} = 3$ .

4. Визначаємо число ненасичених зв'язків у гліцериді за формулою (2.9).

Через те, що дигліцерид містить 2 радикали лінолевої кислоти,  $k_1 = 2$ , а загальне число ненасичених зв'язків у складі дигліцериду лінолевої кислоти:

$$Z_1 = 2 \cdot 2 = 4.$$

До складу тригліцериду входять два радикали стеаринової кислоти ( $k_2 = 2$ ) та

Розділ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння  
 один радикал ліноленої кислоти ( $k_3 = 1$ ), тому загальне число ненасичених зв'язків у складі диенасиченого–мононенасиченого тригліцериду:

$$Z_{2+3} = 2 \cdot 0 + 1 \cdot 3 = 3.$$

5. Визначаємо йодне число компонентів жиру формулою (2.10):

$$J_{\text{ч}_1} = \frac{254 \cdot 4 \cdot 100}{616} = 165 \text{ г}; \quad J_{\text{ч}_{2+3}} = \frac{254 \cdot 3 \cdot 100}{872} = 87 \text{ г}.$$

6. Розраховуємо йодне число жиру як суміші гліцеридів за формулою (2.11):

$$J_{\text{ч}} = 165 \cdot \frac{40}{100} + 87 \cdot \frac{60}{100} = 118,2 \text{ г}.$$

Висновок: оскільки йодне число суміші  $J_{\text{ч}} = 118,2$  г більше за критичну величину йодного числа (50 г), даний жир схильний до самозаймання.

### *Методика визначення можливості виникнення горіння під впливом екзотермічного ефекту хімічної реакції*

1. Розрахувати маси початкових реагентів і продуктів реакції.

1.1. Скласти рівняння хімічної реакції.

1.2. Виходячи з рівняння реакції і маси реагуючої речовини, визначити масу компонентів (наприклад, води), що вступають у реакцію, і масу продуктів реакції, що утворюються внаслідок цієї реакції, із пропорцій:

$$\begin{aligned} \mu_{\text{р}} &\rightarrow \mu_{\text{к}} n_{\text{к}}, & \mu_{\text{р}} &\rightarrow \mu_{\text{пр}} n_{\text{пр}}, \\ m_{\text{р}} &\rightarrow m_{\text{к}}, & m_{\text{р}} &\rightarrow m_{\text{пр}}, \\ m_{\text{к}} &= \mu_{\text{к}} n_{\text{к}} \frac{m_{\text{р}}}{\mu_{\text{р}}}, & m_{\text{пр}} &= \mu_{\text{пр}} n_{\text{пр}} \frac{m_{\text{р}}}{\mu_{\text{р}}}, \end{aligned} \quad (2.12)$$

де  $\mu_{\text{р}}$ ,  $\mu_{\text{к}}$ ,  $\mu_{\text{пр}}$  – відповідно молярна маса реагуючої речовини, компонентів, що вступають у реакцію, та продуктів реакції,  $\text{г} \cdot \text{моль}^{-1}$ ;  $m_{\text{р}}$ ,  $m_{\text{к}}$ ,  $m_{\text{пр}}$  – відповідно початкова маса реагуючої речовини, компонентів, що вступають у реакцію, та продуктів реакції, г;  $n_{\text{к}}$ ,  $n_{\text{пр}}$  – відповідно число молів реагуючої речовини, компонентів, що вступають у реакцію, та продуктів реакції.

2. Розрахувати складові теплового балансу реакції. Тепловий баланс реакції розраховують із припущення, що теплота реакції  $Q_{\text{схр}}$  витрачається на нагрів і часткове випаровування компонентів, що вступають у реакцію (води  $Q_{\text{H}_2\text{O}}$  за умови самозаймання при контакті з водою), нагрів негорючих конденсованих  $Q_{\text{конд. пр}}$  та газоподібних продуктів реакції  $Q_{\text{газ. пр}}$ , горючих газоподібних продуктів реакції  $Q_{\text{гг}}$ , тепловтрати в навколишнє середовище  $Q_{\text{втр}}$ :

$$Q_{\text{схр}} = Q_{\text{H}_2\text{O}} + Q_{\text{конд. пр}} + Q_{\text{газ. пр}} + Q_{\text{гг}} + Q_{\text{втр}}. \quad (2.13)$$

2.1. Розрахувати кількість теплоти, що виділяється під час реакції вихідної речовини з окисником. Якщо вихідний матеріал являє собою суміш декількох речовин, стандартні теплоти окремих реакцій для складових вихідного матеріалу розрахувати за законом Гесса (1.51):



$$Q_{\Sigma \text{xp}} = \sum_i Q_{\text{xp}_i} \frac{m_{p_i}}{\mu_{p_i}}, \quad (2.14)$$

де  $Q_{\Sigma \text{xp}}$  – сумарна кількість тепла, що виділяється під час реакції вихідного матеріалу з окисником, кДж;  $Q_{\text{xp}_i}$  – стандартний тепловий ефект реакції  $i$ -го компонента матеріалу з окисником, кДж·моль<sup>-1</sup>;  $m_{p_i}$  – маса  $i$ -го компонента матеріалу, г;  $\mu_{p_i}$  – молярна маса  $i$ -го компонента матеріалу, г·моль<sup>-1</sup>.

2.2. Розрахувати кількість тепла, що витрачається на нагрівання компонентів, що вступають у реакцію, та продуктів реакції.

Приймаємо, що під час хімічного самозаймання при контакті з водою уся вода нагрівається від початкової температури  $T_{\text{поч}}$  до температури кипіння  $T_{\text{кип}}$ , а 50 % води випаровується, тоді:

$$Q_{\text{H}_2\text{O}} = m_{\text{H}_2\text{O}} c_{p\text{H}_2\text{O}} (T_{\text{кип}} - T_{\text{поч}}) + 0,5 \cdot m_{\text{H}_2\text{O}} \Delta H_{\text{вип}}, \quad (2.15)$$

де  $c_{p\text{H}_2\text{O}}$  – питома масова теплоємність води за сталого тиску, кДж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>;  $\Delta H_{\text{вип}}$  – масова теплота випаровування води, кДж·кг<sup>-1</sup>.

При утворенні горючих газів виходимо з імовірності їх самоспалахування, тобто припускаємо, що горючі гази нагріваються від початкової температури до температури їх самоспалахування  $T_{\text{сс}}$ :

$$Q_{\text{гг}} = m_{\text{гг}} \cdot c_{p\text{гг}} (T_{\text{сс}} - T_{\text{поч}}), \quad (2.16)$$

де  $c_{p\text{гг}}$  – питома масова теплоємність горючих газів, що утворюються, за сталого тиску, кДж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>.

Негорючі продукти реакції (конденсовані чи газоподібні) нагріваються від початкової температури до температури зони реакції  $T_{\text{зр}}$ , тоді:

$$Q_{\text{конд. пр}} = m_{\text{конд. пр}} c_{p\text{конд. пр}} (T_{\text{зр}} - T_{\text{поч}}); \quad (2.17)$$

$$Q_{\text{газ. пр}} = m_{\text{газ. пр}} c_{p\text{газ. пр}} (T_{\text{зр}} - T_{\text{поч}}), \quad (2.18)$$

де  $c_{p\text{конд. пр}}$  – питома масова теплоємність конденсованого продукту реакції за сталого тиску, кДж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>;  $c_{p\text{газ. пр}}$  – питома масова теплоємність негорючого газоподібного продукту реакції за сталого тиску, кДж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>.

2.3. Розрахувати тепловтрати від зони реакції у навколишнє середовище. Приймаємо, що тепловтрати відбуваються шляхом конвекційного теплообміну, на який витрачається 10 % від сумарної теплоти реакції:

$$Q_{\text{втр}} = 0,1 \cdot Q_{\Sigma \text{xp}}. \quad (2.19)$$

3. Розрахувати температуру зони реакції. Оскільки температура зони реакції не відома, спочатку з теплового балансу (2.13) знаходимо кількість тепла, що витрачається на нагрівання негорючих продуктів реакції:

• за умови утворення лише конденсованих негорючих продуктів реакції  $Q_{\text{конд. пр}}$ :

$$Q_{\text{конд. пр}} = Q_{\Sigma \text{xp}} - (Q_{\text{H}_2\text{O}} + Q_{\text{гг}} + Q_{\text{втр}}); \quad (2.20)$$

• за умови утворення конденсованих негорючих продуктів і негорючих газів:

$$Q_{\text{конд. пр.}} + Q_{\text{газ. пр.}} = Q_{\Sigma \text{xp}} - (Q_{\text{H}_2\text{O}} + Q_{\text{гг}} + Q_{\text{втр}}). \quad (2.21)$$

Температуру зони реакції знаходимо за теплою, до якої нагріваються продукти реакції, за формулами (2.17), (2.18) та (2.22):

- за умови утворення тільки конденсованих негорючих продуктів реакції:

$$T_{зр} = T_{поч} + \frac{Q_{\Sigma xp} - (Q_{H_2O} + Q_{гг} + Q_{впр})}{m_{конт.пр} \cdot c_{p,конт.пр}}; \quad (2.22)$$

- за умови утворення конденсованих негорючих продуктів і негорючих газів:

$$T_{зр} = T_{поч} + \frac{Q_{\Sigma xp} - (Q_{H_2O} + Q_{гг} + Q_{впр})}{m_{конт.пр} \cdot c_{p,конт.пр} + m_{газ.пр} \cdot c_{p,газ.пр}}. \quad (2.23)$$

4. Порівняти температуру зони реакції  $T_{зр}$  із критичною температурою горючого компонента (температурою самоспалахування для горючих газів або температурою тління для твердих горючих речовин). Якщо температура зони реакції є більшою, ніж критична для горючого компонента, то самозаймання може виникнути за рахунок екзотермічного ефекту хімічної реакції.

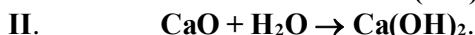
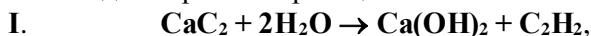
### Приклад розв'язання задачі

Розрахувати можливість виникнення хімічного самозаймання при контакті з водою 1 кг технічного карбїду кальцію, який містить 75 %  $CaC_2$  та 20 %  $CaO$ . Початкова температура системи дорівнює 20 °С, надлишок води, який потрапив до зони реакції, становить 30 %.

#### Розв'язання

1. Розраховуємо маси початкових реагентів і продуктів реакції на підставі матеріального балансу реакції.

1.1. Складаємо рівняння реакції компонентів технічного карбїду з водою:



1.2. Розраховуємо за формулою (2.12) масу води, що приймає участь у реакціях I і II зі складовими технічного карбїду, та масу продуктів, що утворюються в результаті цих реакцій. За складом 1 кг технічного карбїду кальцію містить  $m_{CaC_2} = 750$  г та  $m_{CaO} = 200$  г. Молярні маси реагуючих речовин і продуктів реакції визначаємо за довідником [9]:  $\mu_{CaC_2} = 64$  г·моль<sup>-1</sup>;  $\mu_{CaO} = 56$  г·моль<sup>-1</sup>;  $\mu_{H_2O} = 18$  г·моль<sup>-1</sup>;  $\mu_{Ca(OH)_2} = 74$  г·моль<sup>-1</sup>;  $\mu_{C_2H_2} = 26$  г·моль<sup>-1</sup>.

Для протікання реакцій I і II у стехіометричному співвідношенні необхідна наявність наступної кількості води:

$$m_{H_2O}(ст) = 18 \cdot 2 \cdot \frac{750}{64} + 18 \cdot \frac{200}{56} = 486 \text{ г.}$$

З урахуванням надлишку води, що потрапляє до зони реакції:

$$m_{H_2O} = 486 \cdot 1,3 = 632 \text{ г.}$$

Маса гашеного вапна  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , що утворюється у процесі реакцій I і II:

$$m_{\text{Ca}(\text{OH})_2} = 74 \cdot \frac{750}{64} + 74 \cdot \frac{200}{56} = 1132 \text{ г.}$$

Маса ацетилену, що утворюється у процесі реакції I:

$$m_{\text{C}_2\text{H}_2} = 26 \cdot \frac{750}{64} = 304 \text{ г.}$$

2. Розраховуємо тепловий баланс реакції.

2.1. Розраховуємо сумарну кількість теплоти, що виділяється внаслідок реакції технічного карбиду з водою, за формулою (2.14). Стандартні теплові ефекти реакцій I і II розраховуємо за законом Гесса (1.51). Теплоти утворення реагуючих речовин та продуктів реакції визначаємо за довідником [9].

$$Q_{\text{xp I}} = \left| n_{\text{C}_2\text{H}_2} \Delta H_{f_{\text{C}_2\text{H}_2}}^{\circ} + n_{\text{Ca}(\text{OH})_2} \Delta H_{f_{\text{Ca}(\text{OH})_2}}^{\circ} - (n_{\text{H}_2\text{O}} \Delta H_{f_{\text{H}_2\text{O}(\text{p})}}^{\circ} + n_{\text{CaC}_2} \Delta H_{f_{\text{CaC}_2}}^{\circ}) \right| =$$

$$= |226,8 + (-986,6) - 2 \cdot (-285,8) - (-62,7)| = 125,5 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$Q_{\text{xp II}} = \left| n_{\text{Ca}(\text{OH})_2} \Delta H_{f_{\text{Ca}(\text{OH})_2}}^{\circ} - (n_{\text{H}_2\text{O}} \Delta H_{f_{\text{H}_2\text{O}(\text{p})}}^{\circ} + n_{\text{CaO}} \Delta H_{f_{\text{CaO}}}^{\circ}) \right| =$$

$$= |(-986,6) - (-285,8) - (-635,5)| = 65,3 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$Q_{\Sigma \text{xp}} = 125,5 \frac{750}{64} + 65,3 \frac{200}{56} = 1704 \text{ кДж.}$$

2.2. Розраховуємо кількість тепла, що витрачається на нагрівання води та продуктів реакції, за формулами (2.15)–(2.17). Із довідника [9] виписуємо теплофізичні характеристики вихідних речовин та продуктів реакції:

$$c_{\text{p H}_2\text{O}} = 4,18 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}; \Delta H_{\text{вип. H}_2\text{O}} = 2258,4 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1};$$

$$c_{\text{p Ca}(\text{OH})_2} = 1,18 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}; c_{\text{p C}_2\text{H}_2} = 1,69 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}; t_{\text{cc C}_2\text{H}_2} = 335 \text{ }^{\circ}\text{C} (608 \text{ K}).$$

$$Q_{\text{H}_2\text{O}} = 0,632 \cdot 4,18 \cdot (100 - 20) + 0,5 \cdot 0,632 \cdot 2258,4 = 925,0 \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{C}_2\text{H}_2} = 0,304 \cdot 1,69 \cdot (335 - 20) = 161,8 \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{Ca}(\text{OH})_2} = 1,132 \cdot 1,18 \cdot (t_{\text{зр}} - 20).$$

2.3. Розраховуємо тепловтрати від зони реакції у навколишнє середовище за формулою (2.19):  $Q_{\text{втр.}} = 0,1 \cdot 1704 = 170,4 \text{ кДж.}$

3. Розраховуємо температуру зони реакції за формулою (2.22):

$$T_{\text{зр}} = 293 + \frac{1704 - (925,0 + 161,8 + 170,4)}{1,132 \cdot 1,18} = 627,5 \text{ K.}$$

4. Висновок: температура зони реакції  $T_{\text{зр}} = 627,5 \text{ K}$  є більшою, ніж температура самоспалахування ацетилену  $T_{\text{cc}} = 608 \text{ K}$ , отже, під час реакції технічного карбиду з водою (за умови наявності надлишку води не більше 30 %) відбудеться самоспалахування горючого газу – ацетилену.

**Приклад розв'язання задачі**

При сумісному транспортуванні реактивів сталася розгерметизація ємності з гліцерином. Визначити можливість самозаймання тирси, яку було використано для ущільнення ємності з гліцерином при транспортуванні у контейнері, просоченої 1 л гліцерину, за умови її контакту з 10 кг перманганату калію. Початкова температура системи дорівнює 0 °С.

*Розв'язання*

1. Розраховуємо маси початкових реагентів і продуктів реакції на підставі матеріального балансу реакції.

1.1. Складаємо рівняння реакції 1 моля гліцерину з перманганатом калію:



1.2. Розраховуємо за формулою (2.12) масу перманганату калію, що вступає в реакцію з гліцерином, та масу продуктів, що утворюються в результаті реакції. Молярні маси реагуючих речовин, продуктів реакції і густину гліцерину визначаємо за довідником [9]:  $\mu_{\text{KMnO}_4} = 158 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$ ;  $\mu_{\text{KOH}} = 46,1 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$ ;  $\mu_{\text{MnO}} = 70,9 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$ ;  $\mu_{\text{CO}_2} = 44 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$ ;  $\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$ ;  $\mu_{\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3} = 92 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$ ;  $\rho_{\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3} = 1260,4 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ .

Визначаємо масу 1 л гліцерину:

$$m_{\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3} = 1260,4 \cdot 10^{-3} = 1,26 \text{ кг (1260,4 г)}.$$

Для протікання реакції у стехіометричному співвідношенні необхідно перманганату калію:

$$m_{\text{KMnO}_4} (\text{ст.}) = 158 \cdot 2,8 \cdot \frac{1260,4}{92} = 6058 \text{ г}.$$

За умовою загальна кількість перманганату калію становить 10 кг, тобто надлишкова маса реагенту, що не вступає в реакцію, але забирає на власне нагрівання частку теплоти хімічної реакції, дорівнює:

$$m_{\text{KMnO}_4} (\text{надл.}) = 10000 - 6058 = 3942 \text{ г}.$$

За умови повного протікання реакції утворюються продукти у кількості:

$$m_{\text{KOH}} = 46,1 \cdot 2,8 \cdot \frac{1260,4}{92} = 1768 \text{ г};$$

$$m_{\text{MnO}} = 70,9 \cdot 2,8 \cdot \frac{1260,4}{92} = 2719 \text{ г};$$

$$m_{\text{CO}_2} = 44 \cdot 3 \cdot \frac{1260,4}{92} = 1808 \text{ г};$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \cdot 2,6 \cdot \frac{1260,4}{92} = 640,9 \text{ г}.$$

2. Розраховуємо тепловий баланс реакції.

2.1. Розраховуємо сумарну кількість теплоти, що виділяється внаслідок реакції гліцерину з перманганатом калію, за формулою (2.14). Стандартний тепловий ефект реакції розраховуємо за законом Гесса (1.51). Теплоти утворення реагуючих речовин та продуктів реакції визначаємо за довідником [9].

$$Q_{xp} = \left| \begin{array}{l} n_{\text{кон}} \Delta H_{f_{\text{кон}}}^{\circ} + n_{\text{MnO}} \Delta H_{f_{\text{MnO}}}^{\circ} + n_{\text{CO}_2} \Delta H_{f_{\text{CO}_2}}^{\circ} + \\ + n_{\text{H}_2\text{O}} \Delta H_{f_{\text{H}_2\text{O}}}^{\circ} - n_{\text{KMnO}_4} \Delta H_{f_{\text{KMnO}_4}}^{\circ} - n_{\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3} \Delta H_{f_{\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3}}^{\circ} \end{array} \right| =$$

$$= \left| \begin{array}{l} 2,8 \cdot (-425,9) + 2,8 \cdot (-384,9) + 3 \cdot (-393,8) + \\ + 2,6 \cdot (-285,8) - 2,8 \cdot (-813,4) - (-659,9) \end{array} \right| = 1257,3 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

Загальний тепловий ефект реакції з урахуванням повної маси гліцерину, що бере участь у реакції, становить:

$$Q_{\Sigma xp} = 1257,3 \frac{1260,4}{92} = 17225 \text{ кДж}.$$

2.2. Розраховуємо кількість тепла, що витрачається на нагрівання продуктів реакції, за формулами (2.15), (2.17). Із довідника [9] виписуємо теплофізичні характеристики вихідних речовин і продуктів реакції:  $c_{p_{\text{кон}}} = 1,3 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{K}^{-1}$ ;  $c_{p_{\text{MnO}}} = 0,63 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{K}^{-1}$ ;  $c_{p_{\text{CO}_2}} = 0,84 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{K}^{-1}$ ;  $c_{p_{\text{KMnO}_4}} = 0,75 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{K}^{-1}$ ;  $c_{p_{\text{H}_2\text{O}(\text{рід})}} = 4,19 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{K}^{-1}$ ;  $c_{p_{\text{H}_2\text{O}(\text{пар})}} = 2,2 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{K}^{-1}$ ;  $\Delta H_{\text{винH}_2\text{O}} = 2258,4 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ .

Вода, яка утворюється під час реакції, нагріється від початкової температури до температури кипіння, після чого починає випаровуватися, а її пара та інші негорючі продукти реакції, нагріваються до температури зони реакції:

$$Q_{\text{H}_2\text{O}(\text{рід})} = 0,64 \cdot (4,18 \cdot (100 - 0) + 2258,4) = 1713,5 \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{H}_2\text{O}(\text{пар})} = 0,64 \cdot 2,2 \cdot (t_{\text{зр}} - 100) = 1,41 \cdot (t_{\text{зр}} - 100) \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{кон}} = 1,77 \cdot 1,3 \cdot (t_{\text{зр}} - 0) = 2,3 \cdot (t_{\text{зр}} - 0) \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{MnO}} = 2,72 \cdot 0,63 \cdot (t_{\text{зр}} - 0) = 1,7 \cdot (t_{\text{зр}} - 0) \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{CO}_2} = 1,81 \cdot 0,84 \cdot (t_{\text{зр}} - 0) = 1,5 \cdot (t_{\text{зр}} - 0) \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{KMnO}_4} = 3,94 \cdot 0,75 \cdot (t_{\text{зр}} - 0) = 2,95 \cdot (t_{\text{зр}} - 0) \text{ кДж}.$$

2.3. Розраховуємо тепловтрати від зони реакції у навколишнє середовище за формулою (2.19):  $Q_{\text{втр}} = 0,1 \cdot 17225 = 1722,5 \text{ кДж}$ .

3. Розраховуємо температуру зони реакції за формулою (2.22):

$$T_{\text{зр}} = 273 + \frac{17225 - (1713,5 + 1722,5)}{1,41 + 2,3 + 1,7 + 1,5 + 2,95} = 1671 \text{ К}.$$

Висновок: температура зони реакції  $T_{\text{зр}} = 1671 \text{ К}$  є більшою, ніж температура самоспалахування гліцерину  $T_{\text{cc}} = 673 \text{ К}$  та температура тління тирси  $420 \div 430 \text{ К}$  [7], отже, під час реакції гліцерину з перманганатом калію можливе самоспалахування пари гліцерину та самозаймання тирси, просоченої гліцерином, за рахунок тепла хімічної реакції.

## § 2. Теплове самозаймання

Вихідним моментом теплового самозаймання твердих речовин є їх зберігання за такої температури, за якої відбувається їх термічне розкладання на газоподібні продукти і твердий вуглецевий залишок. Газоподібні продукти розкладання вступають в екзотермічну реакцію окиснення з киснем повітря. Тепло цієї реакції не встигає повністю розсіюватися. Внаслідок накопичення тепла виникає *самонагрівання*, яке, у свою чергу, зумовлює підвищення температури матеріалу та прискорення процесів розкладання й окиснення. Поступове підвищення температури матеріалу призводить до окиснення твердого вуглецевого залишку, яке, за сприятливих умов акумуляції тепла, може перейти у самозаймання спочатку у вигляді тління твердого вуглецевого залишку, а потім і з появою полум'яного горіння.

Необхідними умовами виникнення теплового самозаймання є: 1) підвищена температура навколишнього середовища; 2) знаходження матеріалу у вигляді скупчення, що зумовлює малу площу тепловтрат; 3) легкість термічного розкладання матеріалу з утворенням достатньої кількості газоподібних продуктів, які активно вступають у реакцію окиснення; 4) горючий матеріал є пористим або роздрібненим, нещільно утрамбованим, внаслідок чого є достатній доступ кисню углиб речовини.

Для розробки й організації комплексу профілактичних заходів, що виключають можливість виникнення теплового самозаймання, передусім потрібно знати характеристики (параметри) матеріалів, що застосовуються в технологічних процесах, та умови, в яких знаходяться ці матеріали [5], [8], [25].

Першим показником схильності твердих систем до самозаймання є *температура самонагрівання*  $t_{\text{сн}}$  – мінімальна температура середовища, за якої можливе теплове самозаймання певного об'єму (маси) матеріалу. Це та умовна температурна межа, вище за яку за сприятливих умов можливий розвиток екзотермічного процесу самонагрівання, пов'язаний із термічним розкладанням речовин та окисненням продуктів розкладання.

Другим показником є *період індукції*  $\tau_{\text{інд}}$  – час з моменту, коли температура матеріалу стане рівною температурі самонагрівання, до моменту виникнення горіння у найбільш “гарячій” точці скупчення матеріалу.

Третій показник, що визначає схильність речовин до теплового самозаймання, – це *питома поверхня тепловіддачі*  $S_{\text{пит}}$ , яка, у свою чергу, визначається розмірами й формою скупчення матеріалу. Знаючи цей показник, можна у кожному конкретному випадку визначити безпечні розміри об'ємів матеріалу та їх геометричну форму для даної температури середовища.

*Температуру самонагрівання* можна вважати мінімальною температурою, за якої можливе самозаймання даного матеріалу *за найбільш сприятливих умов*. Температури тління або самоспалахування є температурами, вище

Розділ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння за які самозаймання можливе навіть за несприятливих умов – малі розміри зразка, короткочасність нагрівання тощо. В інтервалі між цими критичними температурами можливість самозаймання залежить від умов акумуляції тепла та накопичення проміжних продуктів, які впливають на швидкість процесу окиснення. У роботі [13] було показано, що в цьому інтервалі температур залежність температури середовища, за якої виникає самозаймання, від питомої поверхні тепловіддачі та часу нагрівання матеріалу із прийнятною для практики точністю можна виразити емпіричними формулами:

$$\lg t_c = A_p + n_p \lg S_{\text{пит}}, \quad (2.24)$$

$$\lg t_c = A_b - n_b \lg \tau_{\text{інд}}, \quad (2.25)$$

де  $t_c$  – температура середовища, за якої виникає теплове самозаймання, °C;  $S_{\text{пит}}$  – питома поверхня матеріалу,  $\text{м}^{-1}$ ;  $\tau_{\text{інд}}$  – час теплового впливу до моменту виникнення самозаймання, години;  $A_p$ ,  $n_p$ ,  $A_b$ ,  $n_b$  – емпіричні коефіцієнти, які визначають за серією дослідів для даної горючої речовини; наведені у довідниках [7], [33] та у таблиці 7 додатків.

Питома поверхня зразка визначається як відношення повної поверхні тепловіддачі до об'єму матеріалу, в якому відбуваються екзотермічні процеси:

$$S_{\text{пит}} = \frac{S_{\text{повн}}}{V}, \text{ м}^{-1}, \quad (2.26)$$

де  $S_{\text{повн}}$  – повна зовнішня поверхня зразка,  $\text{м}^2$ ;  $V$  – об'єм зразка,  $\text{м}^3$ .

Питому поверхню паралелепіпеда можна визначити за формулою:

$$S_{\text{пит}} = 2 \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{h} \right), \text{ м}^{-1}, \quad (2.27)$$

де  $a$ ,  $b$ ,  $h$  – розміри зразка,  $\text{м}$ .

Якщо основа паралелепіпеда ( $a \cdot b$ ) є теплоізолюваною, то:

$$S_{\text{пит}} = 2 \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) + \frac{1}{h}, \text{ м}^{-1}. \quad (2.28)$$

Для тіла циліндричної форми питома поверхня може бути визначена як:

$$S_{\text{пит}} = 2 \left( \frac{1}{H} + \frac{1}{R} \right), \text{ м}^{-1}, \quad (2.29)$$

для циліндра з теплоізолюваною основою ( $\pi R^2$ ):  $S_{\text{пит}} = \frac{1}{H} + \frac{2}{R}$ ,  $\text{м}^{-1}$ . (2.30)

де  $H$  – висота циліндра,  $\text{м}$ ;  $R$  – радіус циліндра,  $\text{м}$ .

Для тіла конічної форми питома поверхня визначається за формулою:

$$S_{\text{пит}} = 3 \frac{R + \sqrt{H^2 + R^2}}{HR}, \text{ м}^{-1}, \quad (2.31)$$

де  $H$  – висота конуса,  $\text{м}$ ;  $R$  – радіус основи конуса,  $\text{м}$ .

Якщо основа конуса ( $\pi R^2$ ) є теплоізолюваною, то:

$$S_{\text{пит}} = 3 \frac{\sqrt{H^2 + R^2}}{HR}, \text{ м}^{-1}. \quad (2.32)$$

*Безпечною температурою нагрівання зразка заданого розміру у виробничому процесі вважають температуру, яка не перевищує 80 % від критичної температури середовища, за якої виникає теплове самозаймання:*

$$t_{\text{без}} = 0,8t_c, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.33)$$

Для визначення температури самонагрівання проводяться експериментальні дослідження, в яких зразок означених розмірів витримують у термостаті за заданих температур. При цьому проводиться контроль температури всередині зразка. За температуру самонагрівання приймають мінімальну температуру термостата, за якої спостерігається різке підвищення температури матеріалу, що закінчується тлінням або полум'яним горінням.

Якщо відомі коефіцієнти формули (2.24), то приблизне значення температури самонагрівання  $t_{\text{сн}}$  можна розрахувати, припускаючи величину питомої поверхні зразка  $S_{\text{пит}} = 1 \text{ м}^{-1}$  (наприклад, куб з гранню 6 м)

$$\lg t_{\text{сн}} = A_p. \quad (2.34)$$

Аналогічно можна розрахувати і температуру тління матеріалу  $t_{\text{тл}}$ , припускаючи величину питомої поверхні зразка  $S_{\text{пит}} = 150 \text{ м}^{-1}$  (саме таку питому поверхню має зразок, що використовується для експериментального визначення температури тління речовин та матеріалів згідно [30]):

$$\lg t_{\text{тл}} = A_p + 2,18n_p. \quad (2.35)$$

Якщо відсутні експериментальні дані, за якими можна визначити емпіричні константи залежності (2.24), але відомі температури самонагрівання та тління, то за рівняннями (2.34) та (2.35) можливо вирішити зворотню задачу –

розрахувати константи  $A_p = \lg t_{\text{сн}}$ ,  $n_p = 0,4571g \frac{t_{\text{тл}}}{t_{\text{сн}}}$  та визначити критичну

температуру середовища, за якої може виникнути самозаймання скупчення матеріалу заданих розмірів, за формулою (2.24).

Знаючи температуру самонагрівання речовин та матеріалів, можна визначити умови безпечного тривалого нагрівання речовин. *Безпечною вважають температуру постійного нагрівання речовини або матеріалу незалежно від розміру зразка, яка не перевищує 90 % температури самонагрівання:*

$$t_{\text{без}} = 0,9t_{\text{сн}}. \quad (2.36)$$

Використовуючи наведені рівняння, можна визначити параметри теплового самозаймання, такі як температура самонагрівання, температура тління, період індукції теплового самозаймання, критичні температури середовища та час нагрівання скупчення матеріалу заданих розмірів.



**Методика визначення параметрів теплового самозаймання**

1. Визначити для даної горючої речовини емпіричні коефіцієнти  $A_p$ ,  $n_p$ ,  $A_b$ ,  $n_b$  за довідником [7] або за таблицею 7 додатків.
2. Розрахувати температуру самонагрівання горючого матеріалу за формулою (2.34).
3. Розрахувати температуру тління горючого матеріалу за формулою (2.35).
4. Розрахувати питому поверхню тепловіддачі залежно від форми скупчення горючого матеріалу за формулою (2.26).
5. Розрахувати за формулою (2.24) критичну температуру середовища скупчення горючого матеріалу заданих розмірів, за якої може виникнути самонагрівання та розвинутися теплове самозаймання.
6. Розрахувати за формулою (2.24) час зберігання скупчення горючого матеріалу заданих розмірів за критичної температури середовища через який може виникнути теплове самозаймання.
7. Розрахувати безпечну температуру нагріву горючого матеріалу під час його експлуатації за формулами (2.33) або (2.34).

**Приклад розв'язання задачі**

Визначити критичні температуру середовища та час нагрівання, за яких може виникнути теплове самозаймання тирси соснової у контейнері з розмірами  $1 \times 1,5 \times 2$  м, а також безпечну температуру зберігання цього матеріалу. Вважати, що всі стінки контейнера нетеплоізолювані.

*Розв'язання*

1. Визначаємо константи теплового самозаймання для соснової тирси за таблицею 7 додатків:  $A_p = 1,855$ ;  $n_p = 0,219$ ;  $A_b = 2,296$ ;  $n_b = 0,096$ .
2. Розраховуємо питому поверхню контейнера даних розмірів за формулою для форми паралелепіпеда (2.27):

$$S_{\text{пит}} = 2 \left( \frac{1}{1} + \frac{1}{1,5} + \frac{1}{2} \right) = 4,3 \text{ м}^{-1}.$$

3. Розраховуємо критичну температуру скупчення тирси заданих розмірів, за якої може виникнути самонагрівання, за формулою (2.24):

$$\lg t_c = 1,855 + 0,219 \lg 4,3 = 1,99,$$

$$t_c = 10^{1,99} = 98,6 \text{ }^\circ\text{C}.$$

4. Розраховуємо час зберігання даного скупчення тирси за критичної температури, через який може виникнути самозаймання, за формулою (2.24):

$$\lg t_c = 2,296 - 0,096 \lg \tau_{\text{инд}}, \text{ тобто } \lg \tau_{\text{инд}} = \frac{2,296 - 1,99}{0,096} = 3,19;$$

$$\tau_{\text{инд}} = 10^{3,19} = 1540 \text{ годин}.$$

4. Визначаємо температуру безпечного зберігання тирси соснової у контейнері означеного розміру за формулою (2.33):

$$t_{без} = 0,8 \cdot 98,6 = 79 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Висновок: при зберіганні тирси соснової у контейнері з питомою поверхнею  $4,3 \text{ м}^{-1}$  самонагрівання виникне за температури  $98,6 \text{ }^\circ\text{C}$ , яке закінчиться самозайманням через 1540 годин. Максимальна безпечна температура при зберіганні тирси соснової в означених умовах дорівнює  $79 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### Приклад розв'язання задачі

Визначити критичну температуру середовища та час, за який може виникнути самозаймання тюка бавовни циліндричної форми розмірами  $H = 1,8 \text{ м}$ ,  $R = 0,8 \text{ м}$ , якщо температура самонагрівання бавовни  $t_{сн} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ , а температура тління  $t_{тл} = 205 \text{ }^\circ\text{C}$ . Вважати, що основа тюка бавовни нетеплоізольована.

#### Розв'язання

1. Визначаємо за формулами (2.34) та (2.35) параметри  $A_p$ ,  $n_p$ :

$$A_p = \lg t_{сн} = \lg 120 = 2,079,$$

$$n_p = 0,4571 \lg \frac{t_{тл}}{t_{сн}} = 0,4571 \lg \frac{205}{120} = 0,106.$$

2. Визначаємо питому поверхню тюка бавовни, якщо його основа нетеплоізольована, за формулою (2.29):

$$S_{пит} = 2 \left( \frac{1}{1,8} + \frac{1}{0,8} \right) = 3,6 \text{ м}^{-1}.$$

3. Визначаємо критичну температуру середовища, за якої можливе виникнення самозаймання тюка бавовни заданих розмірів, за формулою (2.24):

$$\lg t_c = 2,079 + 0,106 \lg 3,6 = 2,138;$$

$$t_c = 10^{2,138} = 137 \text{ }^\circ\text{C}.$$

4. Визначаємо час до виникнення теплового самозаймання за температури  $137 \text{ }^\circ\text{C}$  відповідно до формули (2.25), якщо константи процесу самозаймання для бавовни за табл. 7 додатків становлять  $A_b = 2,332$ ;  $n_b = 0,057$ .

$$\lg \tau_{инд} = \frac{A_b - \lg t_c}{n_b} = \frac{2,332 - 2,138}{0,057} = 2,02;$$

$$\tau_{инд} = 10^{2,02} = 105 \text{ годин}.$$

5. Визначаємо максимальну безпечну температуру середовища для тривалого зберігання кипи бавовни означеного розміру:

$$t_{без} = 0,8 \cdot t_c = 0,8 \cdot 137 = 109,6 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Висновок: при зберіганні тюка бавовни з питомою поверхнею  $3,6 \text{ м}^{-1}$  за температури середовища  $137 \text{ }^\circ\text{C}$  через 105 годин виникне самозаймання. Максимальна безпечна температура при зберіганні тюка бавовни за означених умов дорівнює  $109,6 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Приклад розв'язання задачі**

У технологічному процесі борошно кормове збирається у бункері-накопичувачі й утворює купу конічної форми розмірами  $H = 1,5$  м,  $R = 1,9$  м. Днище апарата має теплоізоляцію. Визначити критичні та безпечні умови його зберігання. Визначити, чи може виникнути горіння, якщо борошно кормове зберігається у бункері-накопичувачі за температури  $40$  °С протягом 10 годин.

*Розв'язання*

1. Визначаємо константи теплового самозаймання для борошна кормового за таблицею 7 додатків:  $A_p = 1,507$ ,  $n_p = 0,322$ ,  $A_b = 2,103$ ,  $n_b = 0,244$ .

2. Розраховуємо температуру самонагрівання борошна за формулою (2.34):

$$\lg t_{\text{сн}} = 1,507; \quad t_{\text{сн}} = 10^{1,507} = 32 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

3. Розраховуємо температуру тління борошна за формулою (2.35):

$$\lg t_{\text{тл}} = 1,507 + 2,18 \cdot 0,322 = 2,209;$$

$$t_{\text{тл}} = 10^{2,209} = 162 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

4. Розраховуємо питому поверхню тепловіддачі за формулою (2.32) з урахуванням, що основа конуса теплоізольована:

$$S_{\text{пит}} = 3 \frac{\sqrt{1,5^2 + 1,9^2}}{1,5 \cdot 1,9} = 2,55 \text{ м}^{-1}.$$

5. Розраховуємо критичну температуру скупчення борошна заданих розмірів, за якої може виникнути самонагрівання, за формулою (2.24):

$$\lg t_c = 1,507 + 0,322 \lg 2,55 = 1,638; \quad t_c = 10^{1,638} = 43,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

4. Розраховуємо час зберігання скупчення борошна кормового заданих розмірів за критичної температури середовища, через який може виникнути теплове самозаймання, за формулою (2.24):

$$\lg t_c = 2,103 - 0,244 \lg \tau_{\text{инд}}; \text{ тобто } \lg \tau_{\text{инд}} = \frac{2,103 - 1,638}{0,244} = 1,906;$$

$$\tau_{\text{инд}} = 10^{1,906} = 80,5 \text{ годин}.$$

6. Розраховуємо безпечну температуру нагрівання скупчення борошна кормового заданих розмірів під час його експлуатації за формулою (2.33):

$$t_{\text{без}} = 0,8 \cdot 43,5 = 34,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Безпечна температура тривалого зберігання борошна незалежно від розміру зразка визначається за формулою (2.36):

$$t_{\text{без}} = 0,9 \cdot 32 = 28,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Висновок: через те що критична температура середовища та час нагрівання, за яких може виникнути теплове самозаймання скупчення борошна кормового заданих розмірів, є більшими, ніж температура та час зберігання матеріалу, горіння у бункері-накопичувачі за даних умов не виникне.

## ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Визначити схильність до самозаймання:

а) олії, що складається із суміші тригліцеридів карбонових кислот, представлених у таблиці;

б) олії, що складається із суміші дигліцеридів карбонових кислот, представлених у таблиці.

№	Олія (суміш гліцеридів карбонових кислот)	лауринова	лінолева	тетрадецева	нізойна	міристинова	пальмітинова	каприлова	стеаринова	ліноленова	олеїнова	гадолейнова	маргарінова	ерукова
1	олія какао	50				20	23			4	3			
2	пальмоядрова	50	3			20	16			4	5			
3	перилова		65				5			16	14			
4	соняшникова		55						10		35			
5	бавовняна		33				17		6		44			
6	конопляна		40							26	16			
7	вершкова	27					17		5		41		10	
8	гірчична		20				4				28			48
9	китовий жир			15	17		25				36	32		
10	свинячий жир		7				30		18	3	42			
11	яловичий жир		2	3			31		23		41			
12	баранячий жир		5			3	24		32		36			
13	кунжутна		40				8		6		45			
14	кукурудзяна		50			6					40		4	
15	кокосова	47		1		17		20		1	8			
16	пальмова			2			40			8	50			
17	тунгова		2							10	6			
18	ойтисикова		1				11				6	80		
19	льняна		33				10			45	12			
20	соєва		52			5	10			8	25			

2. Розрахувати можливість виникнення хімічного самозаймання при контакті з водою технічного продукту заданого складу за умов, наведених у таблиці (маса вихідного продукту, надлишок води, початкова температура та тепловий ефект реакції взаємодії вихідних компонентів із водою).

Теплоємності газоподібних горючих та твердих негорючих продуктів реакції надані в додатковій таблиці.

## Розділ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння

№	Технічна назва продукту	Маса, кг	Склад продукту		Надлишок води, %	Тепловий ефект реакції, кДж·моль <sup>-1</sup>	Початкова температура, °С
			речовина	вміст, мас. %			
1	карбід кальцію	3,0	CaC <sub>2</sub> CaO	80 15	15	125,5 65,3	20
2	карбід кальцію	4,0	CaC <sub>2</sub> CaO	75 23	40	125,5 65,3	25
3	карбід кальцію	5,0	CaC <sub>2</sub> CaO	78 20	25	125,5 65,3	30
4	карбід стронцію	2,5	SrC <sub>2</sub> SrO	85 13	50	145,8 79,76	35
5	карбід барію	3,0	BaC <sub>2</sub> BaO	90 8	45	171,30 104,1	40
6	карбід барію	1,0	BaC <sub>2</sub> BaO	87 10	20	171,3 104,1	45
7	карбід барію	3,5	BaC <sub>2</sub> BaO	92 5	35	171,3 104,1	50
8	нітрид кальцію	1,5	Ca <sub>3</sub> N <sub>2</sub> CaO	98 2	10	902 65,3	30
9	нітрид кальцію	2,0	Ca <sub>3</sub> N <sub>2</sub> CaO	97 2	45	902 65,3	35
10	нітрид кальцію	5,0	Ca <sub>3</sub> N <sub>2</sub> CaO	95 3	50	902 64,2	25
11	нітрид стронцію	1,0	Sr <sub>3</sub> N <sub>2</sub> SrO	90 5	45	891 79,8	20
12	нітрид барію	4,5	Ba <sub>3</sub> N <sub>2</sub> BaO	89 7	60	891 104,1	30
13	нітрид барію	3,0	Ba <sub>3</sub> N <sub>2</sub> BaO	91 5	55	891 104,1	25
14	нітрид магнію	2,0	Mg <sub>3</sub> N <sub>2</sub> MgO	90 7	20	689,2 36,9	15
15	гідрид кальцію	1,5	CaH <sub>2</sub> CaO	98 1	35	218,55 65,3	35
16	гідрид кальцію	2,0	CaH <sub>2</sub> CaO	95 3	20	218,55 65,3	20
17	гідрид стронцію	1,0	SrH <sub>2</sub> SrO	97 2	25	209,47 79,8	10
18	гідрид стронцію	3,5	SrH <sub>2</sub> SrO	95 4	35	209,47 79,8	15
19	гідрид барію	5,0	BaH <sub>2</sub> BaO	87 7	30	200,45 104,1	25
20	гідрид барію	4,0	BaH <sub>2</sub> BaO	79 11	20	200,45 104,1	30

## Ізобарна питома масова теплоємність речовин за стандартних умов

№	Речовина	Теплоємність с <sub>p</sub> , Дж·кг <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>	№	Речовина	Теплоємність с <sub>p</sub> , Дж·кг <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>
1	Mg(OH) <sub>2</sub>	1,33	5	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1,69
2	Ca(OH) <sub>2</sub>	1,18	6	NH <sub>3</sub>	2,09
3	Sr(OH) <sub>2</sub>	0,78	7	H <sub>2</sub>	14,4
4	Ba(OH) <sub>2</sub>	0,57			

3. Для речовин, наведених у таблиці, розрахувати: температуру самонагрівання; температуру тління; безпечну температуру тривалого нагрівання; критичну температуру середовища і період індукції до виникнення теплового самозаймання при зберіганні речовини в контейнері з наведеними розмірами:

а) контейнер у вигляді паралелепіпеда:

№	Найменування речовини або матеріалу	a, м	b, м	h, м
1	бавовна	0,5	1,2	1,5
2	бавовна об'ємна 2-й сорт	1,5	0,8	1,1
3.	барвник 4,8-діаміно 1,5-діоксиатрахінон	0,7	1,4	0,4
4	картон покрівельний	1,3	1,7	1,0
5	барвник азокпігмент яскраво-червоний	0,7	0,4	0,8
6	плита деревоволокниста ізоляційна	1,1	0,9	0,8
7	барвник дисперсний бордо 2С	2,0	1,0	1,8
8	барвник дисперсний фіолетовий 4К	1,2	1,5	1,4
9	плита деревоволокниста напівтверда	2,5	3,0	1,2
10	барвник дисперсний червоно-коричневий	2,1	2,8	2,0

б) контейнер у вигляді паралелепіпеда з теплоізолюваною основою:

№	Найменування речовини або матеріалу	a, м	b, м	h, м
1	барвник диспергатор НФ	3,2	2,5	3,5
2	барвник зелений пігмент	2,0	0,2	1,0
3	плита мінераловатна	1,6	2,6	2,0
4	плита торф'яна	1,4	2,3	1,9
5	барвник кубазол „Сірій С,,	3,0	4,0	3,5
6	тирса соснова	1,3	3,2	2,1
7	барвник цианол блакитний 4 „3,,	0,6	1,2	0,9
8	бітум нафтовий окиснений	4,0	6,0	2,0
9	брикетоване трав'яне різання	5,0	4,5	4,0
10	вітамін В <sub>2</sub>	1,2	1,3	1,4

в) контейнер циліндричної форми:

№	Найменування речовини або матеріалу	d, м	h, м
1	гіпсотермін у вигляді крихти	1,5	1,1
2	гудрон нафтовий	1,9	2,6
3	дерматин	2,1	2,5
4	дріжджі кормові	1,5	1,8
5	добриво для теплиць	2,0	1,2
6	ізіп (бактеріальний препарат)	4,3	3,1
7	іонообмінна смола СТ № 30 (порошок)	3,8	3,0
8	барвник азокпігмент бордо ЖВ	3,3	2,6
9	нітроамофоска з кубовими залишками амінів в індустріальній олії НАФК КОА (1:1:1)	3,6	1,5
10	барвник дисперсний червоний Ж (основної речовини 6 %)	4,0	2,2

г) контейнер циліндричної форми з теплоізолюваною основою циліндра:

№	Найменування речовини або матеріалу	d, м	h, м
1	ледерин (шкірозамінник)	4,1	2,5
2	тютюн неферментований	2,6	3,6
3	борошно вітамінне з листя	0,5	2,4
4	борошно вітамінне хвойне	0,8	1,5
5	борошно житнє	1,5	2,2
6	борошно шламове фосфорне	2,4	3,9
7	нітроамофос НАФ, марка А (1:1)	1,5	1,5
8	нітроамофоска НАФК, марка А (1:1:1)	1,4	2,5
9	нітроамофоска із сечовиною	2,5	1,5
10	барвник бутиловий ксантогенат калію	2,5	2,0

д) контейнер конічної форми:

№	Найменування речовини або матеріалу	d, м	h, м
1	кордний пил	4,5	2,2
2	силос	7,4	4,6
3	сіно	5,6	3,4
4	сланцевий пил	1,5	1,1
5	солома пшениці	3,8	2,8
6	тирса соснова	1,7	2,6
7	тізолін	2,9	1,0
8	товарні дріжджі, вологість 8 %	4,2	3,1
9	торф	2,3	2,5
10	торф фрезерний	1,5	1,6

е) контейнер конічної форми з теплоізолюваною основою конуса:

№	Найменування речовини або матеріалу	d, м	h, м
1	цинеб 80 %	2,5	1,3
2	полінак	3,4	1,2
3	шевелін	1,2	0,5
4	кормарин	2,5	1,5
5	барвник кислотний зелений (основної речовини 30 %)	3,5	0,5
6	миючий засіб „Лотос-7„	3,0	1,5
7	борошно кормове	2,6	1,0
8	каталізатор К-14	0,8	0,5
9	барвник азопігмент червоний 4ЖВ (основної речовини 40 %)	1,5	0,8
10	тютюн ферментований (2-й сорт)	2,3	1,8

Розділ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння

4. Для матеріалів, представлених у таблиці, визначити, чи може виникнути горіння, якщо матеріал у вигляді скупчення певної форми зберігається у технологічному обладнанні за фактичної температури  $t_{\text{факт}}$ , °С протягом часу  $\tau_{\text{нагр}}$ , указанного в таблиці. Визначити безпечну температуру зберігання скупчення матеріалу заданих розмірів.

а) контейнер у вигляді паралелепіпеда:

№	Найменування матеріалу	a, м	b, м	h, м	$t_{\text{факт}}$ , °С	$\tau_{\text{нагр}}$ , ГОД.
1	вугілля активоване марки АП-14	4,0	5,0	3,0	120	5
2	вугілля активоване марки Б	3,5	7,0	4,0	80	12
3	повість будівельна	1,7	3,0	2,0	75	100
4	повість мінеральна по бітумній основі	2,7	3,3	4,1	100	50
5	гранітоль	1,4	0,9	1,9	150	24

б) контейнер циліндричної форми:

№	Найменування матеріалу	d, м	h, м	$t_{\text{факт}}$ , °С	$\tau_{\text{нагр}}$ , ГОД.
1	полінак (смола поліакрилонітрильна)	3	2,5	100	25
2	шевелін	1,7	2,3	120	7
3	кормогрезин 10	0,5	3	90	30
4	поліміцин	2,2	1,9	60	48
5	препарат № 30"М", нанесений на бавовну (1:1)	1,8	1,2	95	10

в) контейнер конічної форми:

№	Найменування матеріалу	d, м	h, м	$t_{\text{факт}}$ , °С	$\tau_{\text{нагр}}$ , ГОД.
1	барвник нігрозин спирторозчинний	3,4	2,5	60	12
2	фітобактеріоміцин	3,7	1,7	95	100
3	целолігнін карбонізований ЦБК	4,0	2,3	120	8
4	цинеб 80 % у суміші із ТНГД-80 (17:3)	2,5	4,7	80	5
5	тютюн ферментований 2-й сорт	3,0	2,8	85	50



5. Для матеріалів, представлених у таблиці, розрахувати мінімальну температуру середовища, за якої вони можуть самозайматися при зберіганні у контейнері з наведеними у таблиці розмірами, якщо відомі температура самонагрівання  $t_{сн}$  та температура тління  $t_{тл}$  матеріалу. Визначити безпечні температури тривалого зберігання матеріалу та зберігання скупчення матеріалу даних розмірів.

№	Матеріал	$t_{сн}, ^\circ\text{C}$	$t_{тл}, ^\circ\text{C}$	Розміри контейнера,		
				а, м	в, м	h, м
1.	бавовна	120	205	0,6	1,6	0,8
2.	бавовна	120	205	1,2	1,8	2,0
3.	бавовна сирець	60	190	0,8	1,8	0,9
4.	бавовна сирець	60	190	0,6	2,2	2,5
5.	борошно вітамінне листяне	95	170	0,5	0,8	1,5
6.	борошно вітамінне листяне	95	170	1,8	0,9	0,4
7.	борошно вітамінне хвойне	60	190	0,8	0,6	0,7
8.	борошно вітамінне хвойне	60	190	1,1	1,2	1,3
9.	борошно кормове	35	170	1,0	1,2	1,4
10.	борошно кормове	35	170	1,5	2,0	2,5
11.	вугілля буре	50	150	0,5	1,0	1,5
12.	вугілля буре	65	250	1,5	2,0	2,5
13.	папір фотографічний	120	324	1,0	2,0	3,0
14.	тирса дубова	100	229	1,0	0,8	0,6
15.	тирса соснова	80	230	1,5	1,3	1,1
16.	тирса соснова	80	230	0,9	2,0	1,5
17.	тирса ялинова	100	220	1,5	1,2	0,9
18.	тирса ялинова	100	220	1,5	1,8	2,1
19.	пюпон ферментований	70	210	2,1	2,0	0,5
20.	пюпон ферментований	70	210	0,8	1,2	1,9

### ГЛАВА 3. ВИМУШЕНЕ ЗАПАЛЮВАННЯ

**Вимушене запалювання** – це виникнення горіння внаслідок дії джерела запалювання на малу частку холодної горючої суміші [1–3, 5, 10].

На виробництві, в якому обертаються горючі речовини в атмосфері окисника (повітря), горюче середовище наявне постійно, отже, для попередження виникнення горіння необхідно виключити можливість виникнення саме джерел запалювання.

**Джерело запалювання** – це тіло, що горить, або розжарене тіло, а також електричний розряд, які мають енергію і температуру, достатні для запалювання (виникнення горіння) інших речовин. Безумовними джерелами запалювання є прямі удари блискавки, потужні електричні дуги, полум'я газових пальників.

Залежно від походження усі джерела запалювання класифікують на групи теплових проявів різних видів енергії: електричної; механічної; ядерної; енергії сонячних променів, енергії хімічних реакцій, а також відкрите полум'я, розжарені продукти горіння й нагріті ними поверхні.

При проведенні експертизи пожежі, особливо при визначенні ймовірних джерел запалювання, необхідно знати причини й умови запалювання певних речовин тими або іншими тепловими проявами [25].

#### § 1. Визначення спроможності електричних розрядів до підпалювання

Майже 25 % усіх пожеж виникають внаслідок теплових проявів електричної енергії, серед яких основними є: короткі замикання (43 %), перегрів горючих матеріалів від залишених без нагляду електронагрівальних приладів (33 %), струмові перевантаження (12 %), іскріння й електричні дуги (3 %), наявність великих перехідних опорів (5 %) та інші причини (4 %).

За умови запалювання горючої системи електричним розрядом, як параметр, що характеризує пожежонебезпечні властивості системи, приймають найменше значення енергії розряду  $E_{\min}$ , починаючи з якого суміш здатна запалюватися з подальшим поширенням полум'я на весь об'єм [5, 8, 10].

**Мінімальною енергією запалювання  $E_{\min}$**  газу, пари або аерозолу даної речовини в повітрі називають найменшу енергію конденсатора, при розряді якого через повітряний проміжок виникає іскра, що запалює стехіометричну суміш даної речовини з повітрям із ймовірністю 0,01.

Горіння виникне, якщо енергія електричного розряду  $E_{\text{ел.р}}$  прогріє певний об'єм горючої суміші, розташований у холодному горючому середовищі, від  $T_0$  до  $T_{\text{гор}}$ . Розрахунки показують, що такий об'єм набуває властивостей незгасаючого елемента полум'я у випадку, коли його розміри мають порядок ширини фронту полум'я  $\delta_{\text{фп}}$  ( $r_{\min} = 3,7\delta_{\text{фп}}$ ).

Співвідношення між критичною кількістю тепла, що необхідно для

Розділ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння підпалювання сферичного об'єму горючої суміші з критичним розміром  $r_{\min}$ , і мінімальною енергією електричної іскри можна виразити у вигляді:

$$E_{\min} \sim \frac{\lambda^3 (T_{\text{гор}} - T_0)}{u_n^3 \rho^2 c_p^2},$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності горючої суміші;  $c_p$  – теплоємність горючої суміші за сталого тиску;  $\rho$  – густина горючої суміші;  $u_n$  – нормальна швидкість поширення полум'я;  $T_0$  – початкова температура горючої суміші;  $T_{\text{гор}}$  – температура горіння суміші.

Якщо енергія електричного розряду є меншою, ніж  $E_{\min}$ , необхідний об'єм газового середовища, нагрітий до критичної температури, не утворюється через те, що тепловиділення хімічної реакції у такому об'ємі менше тепловіддачі у холодну суміш. Горюче середовище при цьому буде прогресивно охолоджуватися, і реакція, яка почалася в місці дії електричного розряду, припиниться.

Розрахунок мінімальної енергії запалювання горючої речовини можливий на основі порівняльного методу з використанням такого параметра як нормальна швидкість поширення горіння за співвідношенням:

$$\frac{E_{\min_1}}{E_{\min_2}} = \frac{u_{n_2}^2}{u_{n_1}^2},$$

де  $E_{\min_1}$ ,  $E_{\min_2}$  – мінімальна енергія запалювання відповідно речовин 1 і 2;  $u_{n_1}$ ,  $u_{n_2}$  – нормальна швидкість поширення горіння відповідно речовин 1 і 2.

Ця формула є тим точнішою, чим ближчими за будовою є речовини, які порівнюються. Прийнято як стандартну речовину використовувати нормальний бутан, у якого  $E_{\min} = 0,25$  мДж, а  $u_n = 0,379$  м·с<sup>-1</sup>, тоді мінімальну енергію запалювання інших газів і парів у повітрі за стандартних умов можна розрахувати за формулою:

$$E_{\min} = \frac{0,036}{u_n^2}, \text{ мДж}, \quad (2.37)$$

де  $u_n$  – нормальна швидкість поширення горіння, м·с<sup>-1</sup>.

Якщо швидкість поширення горіння  $u_n$  є невідомою, то мінімальну енергію запалювання визначають експериментально за допомогою достатньо складного обладнання [30]. Значення мінімальної енергії запалювання деяких речовин наведені в таблицях 9, 11 додатків.

Для орієнтовного розрахунку  $E_{\min}$  парів та газів у повітрі можна використовувати значення критичного діаметра трубки  $d_{\text{кр}}$  (критичного зазору), за якого не можливе поширення полум'я в горючій суміші, за формулою:

$$E_{\min} = \frac{\pi}{6} d_{\text{кр}}^3 q_{\text{Гс}}, \text{ Дж}, \quad (2.38)$$

де  $d_{\text{кр}}$  – величина критичного зазору, м;  $q_{\text{Гс}}$  – питома кількість тепла, необхідна для нагрівання горючої суміші від початкової температури до температури самоспалахування, Дж·м<sup>-3</sup>.

Через незначний вміст горючої речовини у стехіометричній суміші з повітрям (таку суміш найлегше підпалити), питому кількість тепла, що необхідне для нагріву горючої суміші від початкової температури до температури самоспалахування, розраховують як тепло, що витрачається на такий саме нагрів повітря:  $q_{\text{Гс}} = q_{\text{пов}}$ . Значення  $q_{\text{пов}}$  можна розрахувати за формулою:

$$q_{\text{пов}} = \int_{t_{\text{поч}}}^{t_{\text{с}}} c_{\text{пов}}'' dt, \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-3}, \quad (2.39)$$

де  $c_{\text{пов}}''$  – ізобарна питома об'ємна теплоємність повітря, Дж·м<sup>-3</sup>·К<sup>-1</sup>.

Для того щоб розрахувати тепло  $q_{\text{пов}}$ , яке витрачається на нагрівання повітря, необхідно урахувати залежність ізобарної питомої об'ємної теплоємності від температури та вологості повітря або скористатися даними, наведеними у табл. 2.7.

Таблиця 2.7 – Залежність об'ємної теплоємності вологого повітря та тепла, що витрачається на нагрівання 1м<sup>3</sup> повітря від 20 °С, від температури

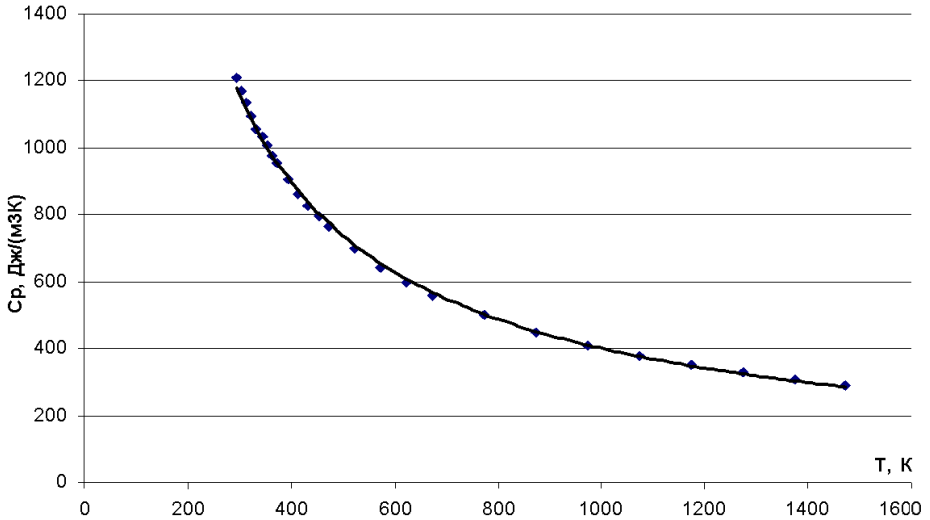
t, °С	$c_{\text{пов}}''$ , Дж·м <sup>-3</sup> ·К <sup>-1</sup>	$q_{\text{пов}}$ , кДж·м <sup>-3</sup>	t, °С	$c_{\text{пов}}''$ , Дж·м <sup>-3</sup> ·К <sup>-1</sup>	$q_{\text{пов}}$ , кДж·м <sup>-3</sup>
20	1211		200	765	169,1
30	1171	11,9	250	700	204
40	1134	23,4	300	644	236,3
50	1098	34,6	350	600	266,3
60	1055	45,4	400	560	294,3
70	1034	55,8	500	501	344,4
80	1009	66,2	600	450	384,4
90	977	75,9	700	411	430,5
100	955	85,56	800	380	468,5
120	906	103,6	900	353	503,8
140	865	121,3	1000	328	536,6
160	829	137,9	1100	308	567,4
180	796	153,8	1200	290	596,4

Математична обробка даних, представлених у табл. 2.7, дозволяє отримати апроксимаційну залежність об'ємної теплоємності вологого повітря від температури (див. рис. 2.1) у вигляді формули:

$$c_{\text{пов}}'' = 173,8T^{-0,88}, \text{ кДж}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{К}^{-1}. \quad (2.40)$$

Тоді рівняння (2.39) з урахуванням (2.40) можна представити у вигляді:

$$q_{\text{пов}} = \int_{T_{\text{поч}}}^{T_{\text{сс}}} c_{\text{пов}}'' dT = 1,45 \cdot 10^6 \left( T_{\text{сс}}^{0,12} - T_{\text{поч}}^{0,12} \right), \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3}. \quad (2.41)$$



**Рис. 2.1 – Залежність об'ємної теплоємності вологого повітря від температури**

Значення мінімальної енергії запалювання використовують при розробці заходів для забезпечення вибухобезпечних умов переробки горючих речовин та електростатичної безпеки технологічних процесів відповідно до вимог [31]. Безпечним вважають розряд електрики, який має енергію, меншу, ніж 40 %  $E_{\text{мін}}$ :

$$E_{\text{без}} = 0,4 E_{\text{мін}}. \quad (2.42)$$

### **Методика розрахунку мінімальної енергії запалювання**

1. Для горючої речовини за довідником [7] або таблицею 11 додатків визначити нормальну швидкість поширення горіння  $u_n$  та розрахувати мінімальну енергію запалювання горючої речовини у повітрі за формулою (2.37).

За відсутності значення нормальної швидкості поширення горіння  $u_n$ , за довідником [7] для даної горючої речовини визначити величину критичного зазору  $d_{\text{кр}}$  ( $d_{\text{кр}} = 2 \cdot \text{БЕМЗ}$ , де БЕМЗ – безпечний експериментальний максимальний зазор) та температуру самоспалахування  $t_{\text{сс}}$ .

2. Розрахувати тепло, що витрачається на нагрівання повітря від початкової температури до температури самоспалахування, за формулою (2.41).

3. Розрахувати мінімальну енергію запалювання горючої речовини у повітрі за формулою (2.38).

4. Розрахувати безпечну енергію розряду електрики за формулою (2.42).

**Приклад розв'язання задачі**

Розрахувати безпечну енергію розряду статичної електрики у технологічному процесі, в якому обертається пароповітряна суміш метилового спирту. Порівняти розраховане значення енергії запалювання з експериментально визначеною величиною  $E_{\min} = 0,14$  МДж.

*Розв'язання*

1. Визначаємо за довідником [7] нормальну швидкість поширення горіння метилового спирту:  $u_n = 0,572$  м·с<sup>-1</sup>.

2. Розраховуємо мінімальну енергію запалювання метилового спирту в повітрі за формулою (2.37):

$$E_{\min} = \frac{0,036}{0,572^2} = 0,11 \text{ МДж.}$$

3. Розраховуємо безпечну енергію розряду статичної електрики у технологічному процесі, в якому обертається повітряна суміш метилового спирту, за формулою (2.42):

$$E_{\text{без}} = 0,4 \cdot 0,11 = 0,044 \text{ МДж.}$$

4. Визначаємо похибку розрахунку:

$$\Delta = \frac{0,14 - 0,11}{0,14} 100\% = 21,4\%.$$

**Приклад розв'язання задачі**

Розрахувати мінімальні енергії запалювання повітряних сумішей тетрагідрофурану та бутилхлориду за стандартних умов (початкова температура 25 °С) і за початкової температури вихідної суміші 70 °С. Визначити безпечні енергії розряду електрики для даних сумішей.

*Розв'язання*

1. Визначаємо за довідником [7] для тетрагідрофурану та бутилхлориду безпечний експериментальний максимальний зазор та температуру самоспалахування:

1) тетрагідрофуран  $C_4H_8O$ : БЕМЗ = 0,87 мм =  $0,87 \cdot 10^{-3}$  м,  $t_{cc} = 250^\circ\text{C} = 523$  К;

2) бутилхлорид  $C_4H_9Cl$ : БЕМЗ = 1,06 мм =  $1,06 \cdot 10^{-3}$  м,  $t_{cc} = 460^\circ\text{C} = 733$  К.

2. Розраховуємо тепло, що витрачається на нагрівання повітря від початкової температури до температури самоспалахування, за формулою (2.41):

$$Q_{\text{пов}C_4H_8O}^{25} = 1,45 \cdot 10^6 (523^{0,12} - 298^{0,12}) = 0,20 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q_{\text{пов}C_4H_8O}^{70} = 1,45 \cdot 10^6 (523^{0,12} - 343^{0,12}) = 0,15 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q_{\text{пов}C_4H_9Cl}^{25} = 1,45 \cdot 10^6 (733^{0,12} - 298^{0,12}) = 0,33 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q_{\text{пов}C_4H_9Cl}^{70} = 1,45 \cdot 10^6 (733^{0,12} - 343^{0,12}) = 0,28 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

3. Розраховуємо мінімальну енергію запалювання сумішей горючих речовин у повітрі за формулою (2.38) з урахуванням, що  $d_{кр} = 2 \cdot \text{БЕМЗ}$ :

$$E_{\min C_4H_8O}^{25} = 0,5 \cdot 0,20 \cdot 10^6 \cdot (0,87 \cdot 2 \cdot 10^{-3})^3 = 0,53 \cdot 10^{-3} \text{ Дж};$$

$$E_{\min C_4H_8O}^{70} = 0,5 \cdot 0,15 \cdot 10^6 \cdot (0,87 \cdot 2 \cdot 10^{-3})^3 = 0,39 \cdot 10^{-3} \text{ Дж};$$

$$E_{\min C_4H_9Cl}^{25} = 0,5 \cdot 0,33 \cdot 10^6 \cdot (1,06 \cdot 2 \cdot 10^{-3})^3 = 1,57 \cdot 10^{-3} \text{ Дж};$$

$$E_{\min C_4H_9Cl}^{70} = 0,5 \cdot 0,28 \cdot 10^6 \cdot (1,06 \cdot 2 \cdot 10^{-3})^3 = 1,33 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}.$$

4. Розраховуємо безпечну енергію розряду електрики за формулою (2.42):

$$E_{без C_4H_8O}^{25} = 0,4 \cdot 0,53 \cdot 10^{-3} = 0,21 \cdot 10^{-3} \text{ Дж};$$

$$E_{без C_4H_8O}^{70} = 0,4 \cdot 0,39 \cdot 10^{-3} = 0,16 \cdot 10^{-3} \text{ Дж};$$

$$E_{без C_4H_9Cl}^{25} = 0,4 \cdot 1,57 \cdot 10^{-3} = 0,63 \cdot 10^{-3} \text{ Дж};$$

$$E_{без C_4H_9Cl}^{70} = 0,4 \cdot 1,33 \cdot 10^{-3} = 0,53 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}.$$

Висновок: розраховані мінімальні енергії запалювання повітряних сумішей тетрагідрофурану і бутилхлориду за стандартних умов дорівнюють відповідно 0,53 мДж і 1,57 мДж, що відрізняється від дослідних значень відповідно на 1,8 % ( $E_{\min C_4H_8O} = 0,54$  мДж) і на 26,6 % ( $E_{\min C_4H_9Cl} = 1,24$  мДж). За умови підвищення початкової температури горючих сумішей їх мінімальна енергія запалювання зменшується.

## § 2. Визначення спроможності розжарених тіл до підпалювання

Дуже часто в технологічних процесах виробництва джерелом запалювання виступають розжарені тіла, нагріті до температури, достатньої для підпалювання інших горючих речовин та матеріалів [1, 3, 11, 25].

**Температура запалювання** – це критична температура нагрітого тіла, за якої досягається рівновага між тепловиділенням при окисненні горючої речовини у пристінному шарі горючої суміші і тепловіддачею в навколишню холодну суміш [26].

Розжарені тіла можуть виникати внаслідок нагрівання певних частин технологічного обладнання чи конструкцій відкритим полум'ям, тепловими проявами механічної енергії (*фрикційні іскри*, що являють собою шматочки металу, відірвані, нагріті і частково окиснені при механічному ударі; поверхні, нагріті внаслідок тертя), тепловими проявами електричної енергії (нагріті поверхні ламп накалювання, розжарені краплі металу електрозварювальних робіт, короткого замикання тощо). Джерелом запалювання можуть виступати також розжарені продукти горіння – іскри топок та двигунів.

Запалювання газоповітряної суміші розжареним тілом у вигляді металеві кулі радіусом  $r$  можливе, якщо:

$$r_{\text{дз}} \geq \sqrt{\frac{E_{\text{акт}} \lambda (T_{\text{зап}} - T_0)^2}{2Q_{\text{н}} \omega_{\text{хр}} R T_{\text{зап}}^2}},$$

де  $E_{\text{акт}}$  – енергія активації реакції горіння;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності газової суміші;  $T_{\text{зап}}$  – температура запалювання;  $T_0$  – початкова температура газової суміші;  $Q_{\text{н}}$  – нижча теплота згоряння горючої речовини;  $R$  – універсальна газова стала;  $\omega_{\text{хр}}$  – швидкість хімічної реакції окиснення.

Температура запалювання (температура розжареного тіла) повинна забезпечити необхідний початковий запас тепла у прогрітому шарі горючого газу [26]. На  $T_{\text{зап}}$  впливають фактори, які характеризують:

- 1) вид горючої речовини: теплотворна здатність ( $Q_{\text{н}} \uparrow T_{\text{зап}} \downarrow$ ); агрегатний стан (найменшу  $T_{\text{зап}}$  мають горючі гази, найбільшу – твердих горючі матеріали);
- 2) склад горючої суміші: концентрація кисню в окисному середовищі ( $\varphi_{\text{O}_2} \uparrow T_{\text{зап}} \downarrow$ ); негорючих газів ( $\varphi_{\text{нг}} \uparrow T_{\text{зап}} \uparrow$ ); горючої речовини ( $\varphi_{\text{гр}} = \varphi_{\text{стм}}, T_{\text{зап}_{\text{мін}}}$ );
- 3) умови у горючій суміші: початкова температура ( $T_0 \uparrow T_{\text{зап}} \downarrow$ ); тиск у суміші ( $P \uparrow T_{\text{зап}} \downarrow$ ); швидкість руху газової суміші ( $v_{\text{руху}} \uparrow T_{\text{зап}} \uparrow$ );
- 4) властивості джерела запалювання: теплоємність матеріалу ( $c_p \downarrow T_{\text{зап}} \uparrow$ ); розміри ( $d_{\text{дз}} \uparrow T_{\text{зап}} \downarrow$ ) та загальна площа поверхні нагрітого тіла ( $S \downarrow T_{\text{зап}} \uparrow$ ).

Збільшення часу контакту джерела запалювання з горючою системою знижує температуру запалювання аж до температури самоспалахування.

Іскри різного походження мають різні початкові температури та характерні розміри (табл. 2.8).

Таблиця 2.8 – Характерні температура та діаметр іскор різного походження

Тип іскри	Температура іскри, °С	Діаметр іскри, мм
електрозварювальних робіт	4000	5
короткого замкнення	2500	3
механічного походження	$t_{\text{пл}}$ , більш легкоплавкого металу	0,5÷1

Теплофізичні характеристики металів, що є найбільш поширеними у техніці, наведені у таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Фізичні константи деяких металів

Метал	$t_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta H_{\text{кр}}, \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\lambda, \text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$c_p, \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\rho, \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
чавун	1200	225	52	420	7270
сталь	1375	318	58	678	7860
залізо	1539	277	67,5	577	7600
алюміній	660	397	210	1140	2550
мідь	1083	205	396	456	8700

Виходячи з достатньо великих початкових температур *фрикційних іскор*



Розділ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння або *крапель розплавленого металу*, що утворюються під час електрозварювальних робіт чи короткого замикання електропроводки, можна було б припустити, що вони можуть запалити будь-які горючі системи, але на практиці це відбувається не завжди, а тільки у тих випадках, коли іскра, що утворилася, має достатній запас енергії.

Запалювальна здатність фрикційних іскор залежить від хімічного складу матеріалів, що беруть участь у терті, від режиму їх механічної взаємодії, а також від властивостей горючої системи, в якій можуть виникати такі іскри.

Спроможність іскор різного походження до підпалювання визначають за стандартом [31]. Визначення імовірності запалювання розжареними тілами зводиться до порівняння кількості тепла, що віддається іскрою для нагрівання горючої суміші від початкової температури до температури самоспалахування, з мінімальною енергією запалювання даної горючої системи.

Запас енергії іскри  $E_i$  залежить від її маси (діаметру  $d_i$  та густини металу) та від температури, з якою іскра потрапляє в горюче середовище. Але якщо температура іскри буде меншою за температуру самоспалахування горючого матеріалу, то запалювання не буде. Тому ефективна кількість тепла, що віддається розжареною іскрою до горючій системі, визначають із рівняння:

$$E_i = m_i c_p (T_i - T_{cc}), \quad (2.43)$$

де  $m_i$  – маса іскри;  $c_p$  – теплоємність металу, з якого утворилася іскра;  $T_i$  – температура іскри, з якою вона потрапляє в горюче середовище;  $T_{cc}$  – температура самоспалахування горючої речовини.

На практиці геометричні розміри розжарених крапель визначаються дослідним шляхом. За неможливості практичного визначення розмірів крапель допускається приймати їх відповідно до табл. 2.8.

Для визначення температури, з якою іскра потрапляє в горюче середовище, необхідно враховувати, що спочатку іскра пролітає крізь холодне навколишнє середовище і буде остигати за рахунок конвекційної тепловіддачі. Ступінь охолодження іскри визначається загальним часом її польоту, теплофізичними характеристиками металу та умовами теплообміну.

Час польоту іскри залежить від її швидкості і траєкторії польоту. Якщо розглядати вільне падіння іскри, то час польоту іскри дорівнює:

$$\tau_{\text{пол}} = \frac{H}{v_i} = \frac{H}{0,5\sqrt{2gH}}, \quad (2.44)$$

де  $H$  – відстань, яку пролітає іскра до моменту потрапляння у горючу систему;  $v_i = 0,5\sqrt{2gH}$  – середня швидкість польоту іскри;  $g$  – прискорення вільного падіння.

Коефіцієнт конвекційної тепловіддачі під час руху сферичного тіла у повітрі визначають за формулою:

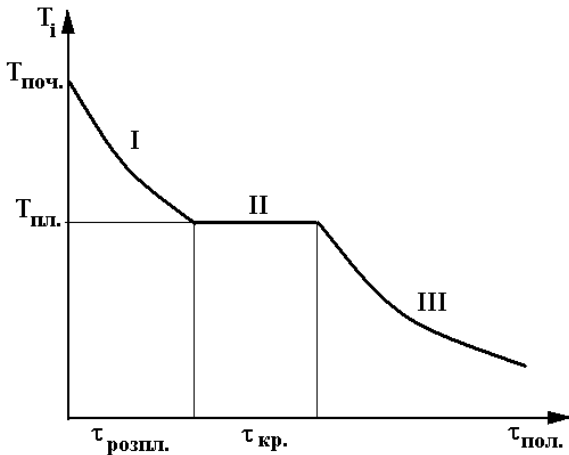
$$\alpha_k = Nu \frac{\lambda_{пов}}{d_i} = 0,62\sqrt{Re} \frac{\lambda_{пов}}{d_i},$$

де  $Nu$  – критерій Нуссельта;  $\lambda_{пов}=22\cdot 10^{-3}$  Вт·м<sup>-1</sup>К<sup>-1</sup> – коефіцієнт теплопровідності повітря, м;  $Re = \frac{v_i d_i}{\nu_{пов}}$  – число Рейнольдса;  $\nu_{пов}=15,1\cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>с<sup>-1</sup> – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря за температури 20 °С;  $d_i$  – діаметр іскри.

Після підстановки чисельних значень коефіцієнт конвекційної тепловіддачі можна визначити за формулою:

$$\alpha_k = 3,52\sqrt{\frac{v_i}{d_i}}, \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\text{К}^{-1}. \quad (2.45)$$

Якщо прийняти, що в момент утворення іскри метал знаходиться в розплавленому стані, то під час польоту будуть проходити процеси охолодження іскри від початкової температури до температури кристалізації (плавлення), а потім ще деякий час буде відбуватися процес фазового переходу – кристалізації, після чого відбувається остигання вже твердої іскри. Зміну температури іскри у часі представлено на графіку (рис. 2.2).



**Рис. 2.2 – Зміна температури іскри (краплі металу) з часом:**

I – іскра знаходиться у розплавленому стані; II – перехід з розплавленого стану у твердий (кристалізація); III – іскра знаходиться у твердому стані

Час перебування іскри в розплавленому стані визначають за формулою:

$$\tau_{розпл} = \frac{c_p^{розпл} m_i}{\alpha_k S_i} \ln \frac{T_{поч} - T_0}{T_{пл} - T_0}, \text{ с}, \quad (2.46)$$

де  $S_i$  – площа поверхні іскри,  $m^2$ ; для сферичної форми  $S_i = \pi d^2$ ;  $c_p^{розпл}$  – питома теплоємність матеріалу іскри у розплавленому стані,  $Дж \cdot кг^{-1} \cdot K^{-1}$ ;  $T_{поч}$  – початкова температура іскри,  $K$ ;  $T_{пл}$  – температура плавлення матеріалу іскри,  $K$ ;  $T_o$  – температура повітря,  $K$ .

Час, за який відбудеться кристалізація, дорівнює:

$$\tau_{кр} = \frac{m_i \Delta H_{пл}}{\alpha_k S_i (T_{пл} - T_o)}, \text{ с}, \quad (2.47)$$

де  $\Delta H_{пл}$  – питома теплота плавлення,  $кДж \cdot кг^{-1}$ .

Залежно від часу польоту іскри можна визначити її кінцеву температуру, з якою іскра потрапить в горючу систему. Для цього необхідно порівняти час польоту іскри з часом її перебування у розплавленому стані та періодом кристалізації.

Якщо іскра досягла горючої речовини в розплавленому стані ( $\tau_{пол} < \tau_{розпл}$ ), її температуру визначають за формулою:

$$T_i = T_o + (T_{поч} - T_o) \exp\left(-\frac{\tau_{пол} \alpha_k S_i}{c_p^{розпл} m_i}\right). \quad (2.48)$$

Під час кристалізації ( $\tau_{кр} > \tau_{пол} > \tau_{розпл}$ ) температура іскри залишається незмінною і дорівнює температурі плавлення металу, з якого її отримано:

$$T_i = T_{пл}. \quad (2.49)$$

Після кристалізації ( $\tau_{пол} > \tau_{кр} + \tau_{розпл}$ ) відбувається охолодження іскри у твердому стані; температуру іскри в кінці польоту визначають за формулою:

$$T_i = T_o + (T_{пл} - T_o) \exp\left(-\frac{(\tau_{пол} - (\tau_{кр} + \tau_{розпл})) \alpha_k S_i}{c_p^{тв} m_i}\right), \quad (2.50)$$

де  $c_p^{тв}$  – питома теплоємність іскри у твердому стані,  $Дж \cdot кг^{-1} \cdot K^{-1}$ .

Якщо енергія іскри, визначена за формулою (2.43), буде перевищувати мінімальну енергію запалювання для даної горючої речовини, вважають, що горюча система може бути запалена й іскра є джерелом запалювання.

При визначенні пожежонебезпеки іскор топок та вихлопних труб двигунів слід враховувати, що джерелом запалювання можуть бути іскри, які за діаметра 2 мм мають температуру 1000 °С, 3 мм – 800 °С, 5 мм – 600 °С.

Для визначення спроможності *нагрітих поверхонь технологічного обладнання* до запалювання необхідно порівняти температуру поверхні обладнання з температурою самоспалахування речовини, що використовується, відповідно до стандарту [31].

*Температуру нагрівання електричного дроту* при виникненні перевантаження розраховують за формулою:

$$t_{e,l} = t_{c_H} + \left( \frac{I_{\Phi}}{I_{\text{доп}}} \right) (t_{e,l_H} - t_{c_H}), \quad (2.51)$$

де  $t_{e,l}$  – фактична температура електричного дроту, °C;  $t_{c_H}$  – нормативна температура середовища для прокладки електричного дроту, °C [32];  $t_{e,l_H}$  – нормативна температура електричного дроту, °C;  $I_{\Phi}$ ,  $I_{\text{доп}}$  – фактичний та допустимий струм в електричному дроті, А.

Температуру нагрівання підшипника ковзання за відсутності мастила та примусового охолодження, нагрівання стрічки транспортера при пробуксовуванні, нагрівання електричних контактів розраховують за формулою:

$$t_{\text{нагр}} = t_c + \frac{P}{\alpha_{\text{заг}} S} \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_{\text{ст.нагр}}}} \right), \quad (2.52)$$

де  $t_{\text{нагр}}$  – температура нагрівання поверхні, °C;  $t_c$  – температура середовища, °C;  $S$  – площа поверхні теплообміну, м<sup>2</sup>;  $P$  – потужність нагрівання, Вт:

- при нагріванні електричних контактів:  $P = I_{\Phi} \sum U_i$ ; (2.53)

- при нагріванні підшипника ковзання:  $P = \pi \cdot d \cdot f \cdot N \cdot n$ ; (2.54)

де  $I_{\Phi}$  – фактичний електричний струм через контакт, А;  $U_i$  – падіння напруги на кожному електричному контакті, В;  $f$  – коефіцієнт тертя ковзання;  $N$  – радіальна сила, що діє на підшипник, або сила натягу стрічки, Н;  $d$  – діаметр вала або діаметр барабана транспортера, м;  $n$  – частота обертання вала, с<sup>-1</sup>;  $\alpha_{\text{заг}}$  – загальний коефіцієнт тепловіддачі, Вт м<sup>-2</sup> К<sup>-1</sup>:

- якщо  $t_{\text{нагр}} \leq 60$  °C:  $\alpha_{\text{заг}} = 4,07 \cdot \sqrt[3]{t_{\text{нагр}} - t_c}$ , (2.55)

- якщо  $t_{\text{нагр}} > 60$  °C:  $\alpha_{\text{заг}} = 11,63 e^{0,023 t_{\text{нагр}}}$ , (2.56)

температуру  $t_{\text{нагр}}$  беруть у першому наближенні для циклічного розрахунку методом послідовних наближень, поки різниця між прийнятою і розрахованою величинами не перевищуватиме 5 %;  $\tau$  – фактичний час роботи, с;

$\tau_{\text{ст.нагр}} = \frac{c_p m}{\alpha_{\text{заг}} S}$  – стала часу нагрівання, с, де  $c_p$  – питома масова теплоємність

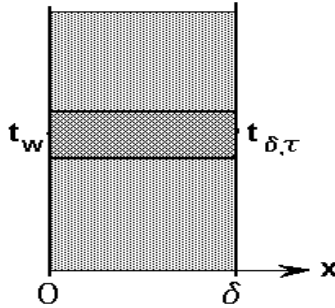
металу, Дж кг<sup>-1</sup> К<sup>-1</sup>;  $m$  – маса металу, кг.

Практично, при  $\tau = 5\tau_{\text{ст.нагр}}$  температура нагрівання поверхні досягає максимального значення, яке розраховують за формулою:

$$t_{\text{max}} \approx t_c + \frac{P}{\alpha_{\text{заг}} S}. \quad (2.57)$$

У деяких випадках джерелом запалювання при контакті з горючими матеріалами можуть виступати тіла, нагріті відкритим полум'ям чи продук-

Розділ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння *та ми горіння*. Особливо небезпечними є електрогазоварювальні ремонтні роботи металевих конструкцій. У цьому випадку температура тіла буде зростати не тільки в місці, на яке впливає тепловий імпульс, але і на певній відстані за рахунок високої теплопровідності металу (див. рис. 2.3).



**Рис. 2.3 – Зміна температури тіла, що проходить через шар теплоізоляції**

Як відомо [11], температуру тіла на відстані  $\delta$  від місця впливу теплового імпульсу через час  $\tau$  можна розрахувати за формулою:

$$\frac{t_w - t_{\delta, \tau}}{t_w - t_0} = \text{erf}(A), \text{ або } t_{\delta, \tau} = t_w - (t_w - t_0) \cdot \text{erf}(A), \quad (2.58)$$

де  $t_{\delta, \tau}$  – температура тіла на відстані  $\delta$  через час  $\tau$ ;  $t_w$  – стала температура поверхні тіла, на яку діє тепловий імпульс;  $t_0$  – початкова температура тіла;  $\text{erf}(A)$  – функція Крампа, що визначають за таблицею 8 додатків.

Аргумент функції Крампа  $A$  визначається співвідношенням:

$$A = \frac{\delta}{2\sqrt{a_t \tau}}, \quad (2.59)$$

де  $a_t = \frac{\lambda}{\rho c_p}$  – коефіцієнт температуропровідності.

Виходячи з рівнянь (2.58) та (2.59), можна визначити критичний час  $\tau_{кр}$ , через який температура тіла на заданій відстані досягне критичного значення. Для цього спочатку необхідно розрахувати функцію Крампа, що відповідає критичній температурі, визначити критичне значення аргументу  $A_{кр}$  за таблицею 8 додатків і розрахувати критичний час:

$$\tau_{кр} = \frac{\delta^2}{4a_t A_{кр}^2}. \quad (2.60)$$

### **Методика визначення спроможності електричних і фрикційних іскор до підпалювання**

1. Визначити критичну температуру виникнення горіння (температуру самоспалахування  $t_{cc}$  газо- чи пароповітряної суміші або температуру тління  $t_{тл}$  твердих горючих матеріалів) та мінімальну енергію запалювання  $E_{\min}$  горючого матеріалу за довідником [7] або за таблицями 9, 12, 13 додатків.

2. За видом іскри визначити її максимальну температуру, діаметр, теплофізичні параметри (таблиці 2.8, 2.9).

3. Розрахувати масу іскри за формулою:  $m_i = \frac{\pi}{6} d_i^3 \rho_i$ .

4. Розрахувати час польоту іскри за формулою (2.44).

5. Розрахувати коефіцієнт конвекційної тепловіддачі за формулою (2.45).

6. Розрахувати площу поверхні іскри, час, який іскра знаходиться у розплавленому стані, час на процес кристалізації за формулами (2.46), (2.47).

7. Залежно від співвідношення між часом польоту іскри  $\tau_{\text{пол}}$  та часом її перебування у розплавленому стані  $\tau_{\text{розпл}}$  і періодом кристалізації  $\tau_{\text{кр}}$  розрахувати температуру іскри за однією із формул (2.48), (2.49) або (2.50).

8. Розрахувати кількість тепла, що виділяється при охолодженні іскри, за формулою (2.43).

9. Порівняти енергію іскри з мінімальною енергією запалювання горючої речовини та зробити висновок щодо можливості запалювання матеріалу.

### **Приклад розв'язання задачі**

Визначити можливість запалювання сіна при короткому замиканні алюмінієвих дротів, що проходять на висоті 2 м.

#### *Розв'язання*

1. Визначаємо параметри запалювання сіна за довідником [7]:  $t_{тл} = 204$  °С,  $E_{\min} = 260$  мДж.

2. Визначаємо максимальну температуру і діаметр для іскри короткого замкнення, теплофізичні характеристики алюмінію:  $t_{\text{пoc}} = 2500$  °С = 2773 К;  $d_i = 3$  мм =  $3 \cdot 10^{-3}$  м;  $t_{\text{пл}} = 660$  °С;  $\rho_i = 2550$  кг·м<sup>-3</sup>;  $c_{\text{p,розпл}} = 1140$  Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>.

3. Розраховуємо масу іскри:

$$m_i = \frac{3,14}{6} (3 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 2550 = 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ кг.}$$

4. Розраховуємо час польоту іскри:

$$v_i = 0,5 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 2} = 3,16 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}; \tau_{\text{пол}} = \frac{2}{3,16} = 0,6 \text{ с.}$$

5. Розраховуємо коефіцієнт конвекційної тепловіддачі:

$$\alpha = 3,52 \sqrt{\frac{3,16}{3 \cdot 10^{-3}}} = 114,2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}.$$

б. Розраховуємо площу поверхні іскри та час, який іскра знаходиться у розплавленому стані:

$$S_i = 3,14 \cdot 9 \cdot 10^{-6} = 28 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

$$\tau_{\text{розпл}} = \frac{1140 \cdot 3,6 \cdot 10^{-5}}{114,2 \cdot 28 \cdot 10^{-6}} \ln \frac{2500 - 20}{660 - 20} = 17,3 \text{ с.}$$

7. Оскільки  $\tau_{\text{пол}} < \tau_{\text{розпл}}$ , кристалізація металу під час польоту не відбудеться. Розраховуємо температуру іскри за формулою (2.48):

$$T_i = 293 + (2773 - 293) \exp\left(-\frac{0,6 \cdot 114,2 \cdot 28 \cdot 10^{-6}}{1140 \cdot 3,6 \cdot 10^{-5}}\right) = 2744 \text{ К};$$

$$t_i = 2744 - 273 = 2471 \text{ }^\circ\text{C}.$$

8. Розраховуємо ефективну кількість тепла, що виділяється під час охолодження іскри, за формулою (2.43):

$$E_i = 3,6 \cdot 10^{-5} \cdot 1140 \cdot (2471 - 204) = 93 \text{ Дж}.$$

9. Оскільки  $E_i = 93 \text{ Дж} > E_{\text{пін}} = 0,26 \text{ Дж}$ , запалювання сіна іскрою короткого замикання дротів з алюмінію можливе.

### *Методика визначення спроможності розжарених поверхонь технологічного обладнання до підпалювання*

1. Визначити критичну температуру виникнення горіння горючого матеріалу (температура самоспалахування  $t_{\text{сс}}$  або температура тління  $t_{\text{тл}}$ ) за довідником [7] або за таблицями 9, 12, 13 додатків.

2. Розрахувати потужність нагрівання за формулою (2.53) або (2.54).

3. Прийняти температуру нагрівання поверхні у першому наближенні та розрахувати коефіцієнт тепловіддачі за формулою (2.55) або (2.56).

4. Розрахувати сталу часу нагрівання за формулою:  $\tau_{\text{ст.нагр}} = \frac{c_p m}{\alpha_{\text{заг}} S}$ , с.

5. Порівняти сталу часу нагрівання з фактичним часом роботи та розрахувати максимальну температуру нагрівання поверхні за формулою (2.52) або (2.57).

6. Порівняти розраховане значення температури нагрівання поверхні з величиною, прийнятою у першому наближенні: якщо вона відрізняється більше, ніж на 5 % від узятій у першому наближенні, повторити розрахунок, узявши отриману температуру для розрахунку у другому наближенні.

7. Порівняти розраховану температуру нагрівання поверхні з температурою самоспалахування матеріалу, що використовується, та зробити висновок щодо можливості запалювання горючої речовини.

**Приклад розв'язання задачі**

Розрахувати температуру сталевого підшипника ковзання масою 100 г при аварійній роботі насоса у випадку порушення процедури змащення поверхонь протягом 300 с. Зробити висновок, чи може даний підшипник стати джерелом запалювання для пароповітряної суміші бензину АІ–93 за температури повітря  $t_c = 20^\circ\text{C}$ , якщо частота обертання вала  $n = 20\text{ с}^{-1}$ , діаметр вала  $d = 0,04\text{ м}$ , коефіцієнт тертя сталь-сталь без оливи  $f = 0,15$ , поверхня теплообміну підшипника з повітрям  $S = 0,1\text{ м}^2$ , радіальна сила, що діє на підшипник,  $N = 3600\text{ Н}$ .

*Розв'язання*

1. Визначаємо температуру самоспалахування бензину за довідником [7]:  $t_{cc\text{АІ-93}} = 380^\circ\text{C}$ .

2. Розраховуємо потужність нагрівання підшипника за рахунок тертя за формулою (2.54):

$$P = 3,14 \cdot 0,04 \cdot 0,15 \cdot 3600 \cdot 20 = 1356,5\text{ Вт.}$$

3. Визначаємо загальний коефіцієнт тепловіддачі у першому наближенні. Прийmemo  $t_{\text{нагр}} = 440^\circ\text{C}$ , отже, оскільки  $t_{\text{нагр}} > 60^\circ\text{C}$ , коефіцієнт тепловіддачі розраховуємо за формулою (2.56):

$$\alpha_{\text{заг}} = 11,63e^{0,023 \cdot 440} = 32\text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}.$$

4. Розраховуємо сталу часу нагрівання підшипника, враховуючи, що питома масова теплоємність сталі  $c_p = 678\text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ :

$$\tau_{\text{ст.нагр}} = \frac{678 \cdot 0,1}{32 \cdot 0,1} = 21\text{ с.}$$

5. Оскільки час аварійної роботи насоса дорівнює 300 с, це більше, ніж  $5 \cdot 21 = 105\text{ с}$ , отже розраховуємо максимальну температуру підшипника за формулою (2.57):

$$t_{\text{max}} \approx 20 + \frac{1356,5}{32 \cdot 0,1} = 443,9^\circ\text{C}.$$

6. Розрахована температура нагрівання підшипника не відрізняється більше, ніж на 5 % від взятого у першому наближенні значення, отже похибка розрахунку лежить у допустимих межах.

7. Визначаємо спроможність підшипника до запалювання пари бензину у суміші з повітрям:

$$t_{cc\text{АІ-93}} = 380^\circ\text{C} < t_{\text{нагр}} = 443,9^\circ\text{C}.$$

Отже за даних умов перегрів підшипника може викликати запалювання пари бензину.



### **Методика визначення спроможності до підпалювання тіл, нагрітих продуктами згорання**

1. Визначити критичну температуру виникнення горіння горючого матеріалу (температура самоспалахування  $t_{cc}$  або температура тління  $t_{пл}$ ) за довідником [7] або за таблицями 9, 12, 13 додатків.

2. Визначити за табл. 2.9 або довідником [9] теплофізичні характеристики металу, який нагрівають: густину  $\rho$ , питому масову теплоємність  $c_p$ , коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$ , температуру плавлення  $t_{пл}$ .

3. Розрахувати коефіцієнт температуропровідності металу за формулою:

$$a_t = \frac{\lambda}{\rho c_p} . \quad (2.61)$$

4. Розрахувати аргумент функції Крампа за формулою (2.59).

5. Визначити функцію Крампа  $erf(A)$  за таблицею 8 додатків.

6. Розрахувати температуру тіла, що нагрівається, на відстані  $\delta$  через час  $\tau$  за формулою (2.58).

7. Порівняти розраховану температуру нагрівання поверхні з критичною температурою виникнення горіння матеріалу, що знаходиться в контакті з нагрітим тілом; зробити висновок щодо можливості запалювання горючої речовини.

8. Розрахувати функцію Крампа, що відповідає критичній температурі виникнення горіння горючого матеріалу, визначити критичне значення аргументу  $A_{кр}$  за табл. 8 додатків і розрахувати критичний час, через який температура тіла на заданій відстані досягне критичного значення, за формулою (2.60).

### **Приклад розв'язання задачі**

У приміщенні проводяться вогневі роботи з різання каналізаційної труби із сірого чавуну, яка проходить через стіну товщиною 0,2 м в суміжне приміщення і стикається з дерев'яними конструкціями. Визначити температуру металевої труби на виході зі стіни у суміжне приміщення через 20 хв. теплового впливу, якщо її початкова температура становила 20 °С. З'ясувати, чи може нагрівання труби призвести до виникнення горіння дерев'яного переkritтя. Визначити час, через який у сусідньому приміщенні за даної товщини стіни стає можливим виникнення горіння.

#### *Розв'язання*

1. Визначаємо за довідником [7] температуру тління деревини:  $t_{пл} = 265$  °С.

2. Визначаємо за табл. 2.9 теплофізичні характеристики сірого чавуну:  $c_p = 420$  Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>;  $\rho = 7200$  кг·м<sup>-3</sup>;  $t_{пл} = 1200$  С;  $\lambda = 52$  Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>.

3. Розраховуємо коефіцієнт температуропровідності сірого чавуну за формулою (2.61):

$$a_t = \frac{52}{7200 \cdot 420} = 1,72 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}.$$

4. Розраховуємо аргумент функції Крампа за формулою (2.59):

$$A = \frac{0,2}{2\sqrt{1,72 \cdot 10^{-5} \cdot 1200}} = 0,696.$$

5. Визначаємо функцію Крампа  $\operatorname{erf}(A)$  за табл.8 додатків:  $\operatorname{erf}(0,696)=0,6778$ .

6. Розраховуємо за формулою (2.58) температуру труби на відстані 0,2 м через 20 хв. вогневих робіт, якщо температура нагрівання труби в місці дії газового різача дорівнює температурі плавлення сірого чавуну  $t_w = 1200$  °C:

$$t_{\delta,\tau} = 1200 - 0,6778 \cdot (1200 - 20) = 400 \text{ °C}.$$

7. Оскільки розрахована температура нагріву труби 400 °C є вищою за температуру тління деревини 265 °C, запалювання дерев'яного перекриття, через яке проходить труба, після 20 хв. проведення вогневих робіт можливе.

8. Розраховуємо час, через який температура труби із сірого чавуну на відстані 0,2 м досягне критичного значення 265 °C, за формулою (2.60):

$$\frac{t_w - t_{кр}}{t_w - t_0} = \frac{1200 - 265}{1200 - 20} = 0,792; \quad \operatorname{erf}(A_{кр}) = 0,792, \quad A_{кр} = 0,89;$$

$$\tau_{кр} = \frac{0,20^2}{4 \cdot 1,72 \cdot 10^{-5} \cdot 0,89^2} = 734 \text{ с}.$$

Висновок: під час проведення вогневих робіт із різання каналізаційної труби, яка стикається з дерев'яними конструкціями в суміжному приміщенні, нагрівання труби може призвести до виникнення горіння вже через 734 с.

### § 3. Визначення можливості підпалювання горючих речовин променистим потоком тепла від полум'я

У самостійну групу джерел запалювання виділяють відкрите полум'я та розжарені продукти горіння, які є небезпечними не тільки під час безпосереднього контакту з горючою системою, через те що температура полум'я завжди є вищою за температуру самоспалахування більшості горючих речовин, але і внаслідок випромінювання тепла, що може нагріти горючу систему до критичної температури (самоспалахування або тління) [11, 22, 25].

Пожежна небезпека полум'я зумовлена інтенсивністю теплового впливу (густиною теплового потоку), який визначається температурою зони горіння, площею теплосприйяття горючої речовини (взаємним розташуванням) та часом впливу на горючу систему.

Густина теплового потоку визначають за формулою:

$$q = \varepsilon \sigma (T_{\text{пол}}^4 - T_{\text{гр}}^4) \cdot \Psi, \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}, \quad (2.62)$$

де  $\varepsilon$  – приведений ступінь чорноти системи «полум'я – поверхня горючої речовини» (відносний коефіцієнт теплового випромінювання);  $\sigma$  – стала випромінювання Больцмана;  $T_{\text{пол}}$  – температура полум'я;  $T_{\text{гр}}$  – температура поверхні горючої речовини;  $\Psi$  – кутовий коефіцієнт опромінювання.

У загальному випадку приведений ступінь чорноти системи  $\varepsilon$  залежить від ступеня чорноти поверхонь факела ( $\varepsilon_1$ ) і тіла, що опромінюється, ( $\varepsilon_2$ ), та від взаємного розташування цих тіл. У більшості ситуацій (за умови просторового рознесення тіл) приведений ступінь чорноти такої системи дорівнює:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \varepsilon_2. \quad (2.63)$$

Типові значення ступеня чорноти деяких матеріалів та полум'я при горінні різних речовин наведені у табл. 2.10.

Таблиця 2.10 – Ступінь чорноти деяких матеріалів та полум'я при горінні різних речовин

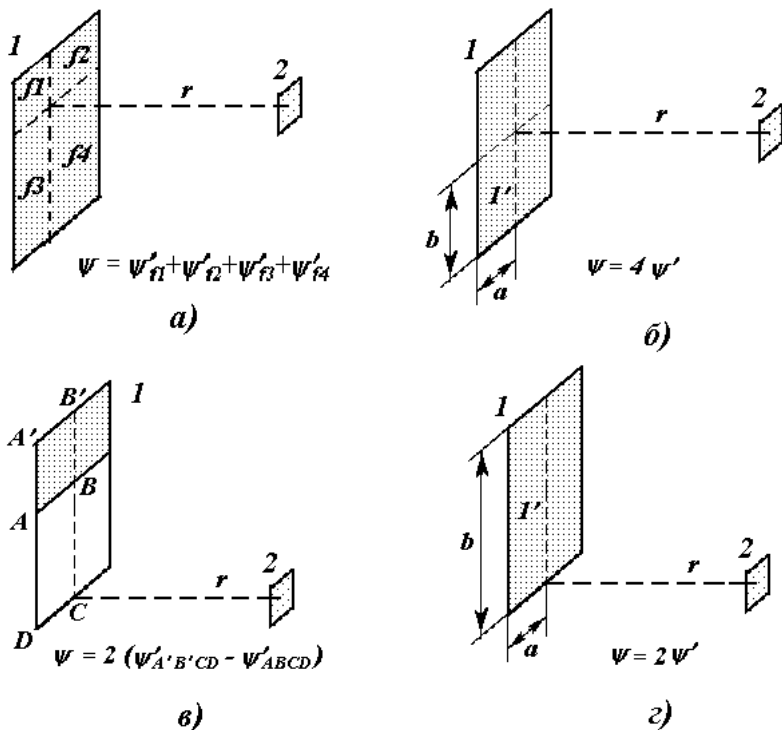
Матеріали	Ступінь чорноти
сталь (за температури 200–600 °С)	0,8
сталь (за температури 900–1100 °С)	0,56
чавун (за температури 200–600 °С)	0,7
бетон (за температури 1000 °С)	0,63
цегла (за температури 11000 °С)	0,8
деревина (за температури 20 °С)	0,85
папір (за температури 20 °С)	0,85
гума (за температури 20 °С)	0,9
Види полум'я	
безбарвне полум'я газів	0,3
полум'я газових фонтанів	0,4
полум'я вугілля	0,5
полум'я деревини, торфу	0,7
полум'я мазуту	0,85
полум'я бензину	0,95 – 0,99

У табл. 2.11 наведені типові середні температури дифузійного полум'я деяких матеріалів.

Таблиця 2.11 – Температури полум'я деяких матеріалів або пожежонебезпечних операцій

Матеріал, що горить; пожежонебезпечна дія	Температура полум'я (*тління), °С
горючі рідини	880 – 1000
деревина, пиломатеріали	1000 – 1100
природні та зріджені гази	1200 – 1500
газова зварка	3150
газова різка металу	1350
цигарка, сигарета	320 – 460*
сірник	620 – 640

Кутовий коефіцієнт опромінювання  $\Psi$  визначають з припущення, що поверхня випромінювача (полум'я) є прямокутною, площа якого є паралельною площині опромінювання. Цю площину випромінювача розбивають на базові прямокутники, і представляють шуканий коефіцієнт опромінювання як суму базових коефіцієнтів опромінювання  $\psi'$  (рис. 2.4).



**Рис. 2.4 – Схема базової задачі променистого теплообміну**

а) – г) – варіанти взаємного розташування випромінювача (1) та об'єкта, що опромінюється (2)

Базовий коефіцієнт  $\psi'$  розраховують за формулою:

$$\psi' = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{a}{\sqrt{a^2 + r^2}} \arctg \frac{b}{\sqrt{a^2 + r^2}} + \frac{b}{\sqrt{b^2 + r^2}} \arctg \frac{a}{\sqrt{b^2 + r^2}} \right], \quad (2.64)$$

де  $a, b$  – розміри базового прямокутника, на які розбивають площину випромінювача (рис. 2.4);  $r$  – відстань між площинами 1 та 2; арктангенс вимірюють у радіанах. За великих відстаней між поверхнями 1 та 2, тобто за умов  $r \gg a$  та  $r \gg b$ , з відносною точністю функцію  $\psi'$  можна розрахувати за формулою:

$$\psi' = \frac{ab}{\pi r^2}. \quad (2.65)$$

За величиною теплового потоку за формулою (2.62), можна знайти температуру на поверхні тіла, що опромінюється, через певний проміжок часу:

$$t(\tau) = t_0 + 2 \frac{q}{\lambda} \sqrt{\frac{a_t \tau}{\pi}}. \quad (2.66)$$

Існує взаємозв'язок між значенням густини теплового потоку і часом, через який може виникнути горіння речовин (температура поверхні тіла досягне критичного значення):

$$\tau_{\text{кр}} = \frac{\pi \lambda^2 (t_{\text{кр}} - t_0)^2}{4a_1 q^2}. \quad (2.67)$$

Дослідні значення критичної густини теплового потоку  $q_{\text{кр}}$  за певного часу опромінювання для деяких горючих матеріалів наведені у таблиці 2.12.

Таблиця 2.12 – Критична густина теплового потоку  $q_{\text{кр}}$  залежно від часу опромінювання для різних речовин

Речовина	$q_{\text{кр}}$ за тривалості опромінювання, кВт·м <sup>-2</sup>		
	3 хв.	5 хв.	15 хв.
деревина	18,8	16,9	13,9
торф	16,6	14,3	9,8
бавовна	11,0	9,7	7,5
пластик	21,6	19,1	15,4
гума	22,6	19,2	14,8
вугілля	–	35,0	35,0

### ***Методика визначення спроможності теплового потоку полум'я до підпалювання горючих речовин***

1. Визначити критичну температуру виникнення горіння матеріалу (температуру самоспалахування  $t_{\text{св}}$  або температуру тління) за довідником [7] або за таблицями 9, 12, 13 додатків.

2. Визначити температуру факела полум'я за табл. 2.11 або за розрахунком (див. розділ I, глава 2, §3).

3. Розрахувати приведений ступінь чорноти за формулою (2.63) з урахуванням даних табл. 2.10.

4. Розрахувати базовий коефіцієнт опромінювання елементарної частини факела полум'я  $\psi'$  за формулами (2.64) або (2.65).

5. Залежно від схеми взаємного розташування випромінювача та об'єкта, що опромінюється, розрахувати коефіцієнт опромінення всього факела.

6. Розрахувати густину теплового потоку за формулою (2.62).

7. Розрахувати коефіцієнт температуропровідності матеріалу, що опромінюється, за формулою (2.61).

8. Розрахувати температуру на поверхні тіла, що опромінюється, через заданий проміжок часу за формулою (2.66). Порівняти розраховану температуру тіла з критичною температурою виникнення горіння матеріалу та зробити висновок щодо можливості запалювання.

9. Розрахувати час, через який температура поверхні тіла досягне критичного значення за даних умов, за формулою (2.67).

**Приклад розв'язання задачі**

На відстані 30 м від факела газового фонтана знаходиться дерев'яна будівля. Визначити, чи може виникнути горіння будівлі через 30 хв., якщо поверхня факела має форму прямокутника розмірами 4×40 м, ступінь чорноти газового фонтана  $\varepsilon = 0,4$ , для деревини  $\varepsilon = 0,85$ ,  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ .

**Розв'язання**

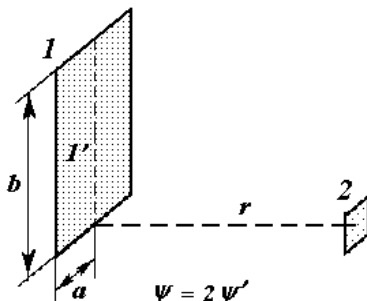
1. Визначаємо за довідником [7] температуру тління деревини:  $t_{\text{тл}} = 250^\circ\text{C}$  (523 К).

2. Визначаємо за табл. 2.10 температуру факела полум'я газового фонтана:  $t_{\text{пол}} = 1400^\circ\text{C} = 1673\text{ К}$ .

3. Розраховуємо приведенний ступінь чорноти системи «газовий фонтан – деревина» за формулою (2.63) з урахуванням значень ступеня чорноти деревини та полум'я фонтана (табл. 2.10):

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \varepsilon_2 = 0,4 \cdot 0,85 = 0,34.$$

4. Складаємо схему взаємного розташування факела газового фонтана і будівлі, що опромінюється, розраховуємо базовий коефіцієнт опромінювання елементарної частини факела полум'я  $\psi'$  за формулою (2.64). Розміри базового прямокутника:  $a \times b = 2 \times 40$  м.



$$\psi' = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \left[ \frac{2}{\sqrt{2^2 + 30^2}} \arctg \frac{40}{\sqrt{2^2 + 30^2}} + \frac{40}{\sqrt{40^2 + 30^2}} \arctg \frac{2}{\sqrt{40^2 + 30^2}} \right] = 0,015.$$

5. Розраховуємо коефіцієнт опромінювання всього факела:

$$\psi = 2\psi' = 2 \cdot 0,015 = 0,03.$$

6. Розраховуємо густину теплового потоку на дерев'яну будівлю за формулою (2.62):  $q = 0,34 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (1673^4 - 523^4) \cdot 0,03 = 4733 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ .

7. Розраховуємо коефіцієнт температуропровідності деревини за формулою (2.61) з урахуванням теплофізичних характеристик деревини:

$$\lambda_{\text{дерев}} = 0,17 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}; \rho_{\text{дерев}} = 500 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}; c_{\text{р дерев}} = 2,8 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1};$$

$$a_t = \frac{0,17}{500 \cdot 2,8 \cdot 10^3} = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}.$$

8. Розраховуємо температуру на поверхні будівлі через 30 хвилин теплового впливу факела за формулою (2.66):

$$t(30) = 20 + 2 \frac{4733}{0,17} \sqrt{\frac{1,2 \cdot 10^{-7} \cdot 30 \cdot 60}{3,14}} = 482^\circ\text{C}.$$

Таким чином, через 30 хв. теплового впливу полум'я газового фонтана

Розділ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння  
 температура поверхні дерев'яної будівлі досягне 482 °С, що перевищує критичну температуру тління деревини, отже займання будівлі є можливим.

9. Розраховуємо час, через який температура поверхні будівлі досягне температури тління, за формулою (2.67):

$$\tau_{кр} = \frac{3,14 \cdot 0,17^2 (250 - 20)^2}{4 \cdot 1,2 \cdot 10^{-7} \cdot 4733^2} = 446 \text{ с.}$$

Висновок: температура на поверхні дерев'яної будівлі досягне критичного значення для виникнення горіння через 446 с теплового впливу факела газового фонтана.

### **Приклад розв'язання задачі**

Металеву піч встановлено на відстані 0,5 м від дощатої дерев'яної стіни. Бокова поверхня печі має розміри 0,8 мх0,6 м. Температура на зовнішній поверхні печі дорівнює 400 °С, температура повітря – 25 °С. Визначити, чи можливе виникнення горіння деревини за 2 год. теплового впливу

#### *Розв'язання*

1. Визначаємо за довідником [7] температуру тління деревини:  $t_{тл} = 250 \text{ °С}$  (523 К).

2. Розраховуємо приведені ступінь чорноти системи з урахуванням даних табл. 2.7 за формулою (2.63):  $\varepsilon = \varepsilon_1 \varepsilon_2 = 0,8 \cdot 0,85 = 0,68$ .

3. Розраховуємо коефіцієнт опромінювання за формулою (2.64).. Схема взаємного розташування розжареної поверхні печі та дощатої дерев'яної стіни відповідає зображеній на рис. 2.4, б. Розміри базового прямокутника:  $a = 0,6/2 = 0,3 \text{ м}$ ;  $b = 0,8/2 = 0,4 \text{ м}$ .

$$\psi' = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \left[ \frac{0,3}{\sqrt{0,3^2 + 0,5^2}} \arctg \frac{0,4}{\sqrt{0,3^2 + 0,5^2}} + \frac{0,4}{\sqrt{0,4^2 + 0,5^2}} \arctg \frac{0,3}{\sqrt{0,4^2 + 0,5^2}} \right] = 0,09;$$

$$\psi = 4 \cdot \psi' = 4 \cdot 0,09 = 0,36.$$

4. Розраховуємо густину теплового потоку на дощату стіну за формулою (2.62):  $q = 0,68 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (673^4 - 523^4) \cdot 0,36 = 1809 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ .

5. Розраховуємо температуру на поверхні дощатої стіни через 2 години (7200 с) за формулою (2.66), враховуючи, що коефіцієнт теплопровідності деревини дорівнює  $1,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  (див. попередню задачу):

$$t = 25 + 2 \frac{1809}{0,17} \sqrt{\frac{1,2 \cdot 10^{-7} \cdot 7200}{3,14}} = 378 \text{ °С.}$$

Таким чином, через 2 години теплового впливу розжареної поверхні печі на дощату дерев'яну стіну температура поверхні стіни досягне 378 °С, що перевищує критичну температуру тління, отже займання стіни є можливим.

**ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ**

1. Для речовин, представлених у таблиці, розрахувати мінімальну енергію запалювання та безпечну енергію розряду електрики: а) за нормальною швидкістю поширення горіння; б) за величиною критичного діаметра зазору.

№	Речовина	$u_{н}, \text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	БЕМЗ, мм	$t_{cc}, ^\circ\text{C}$	$t_0, ^\circ\text{C}$
1	пропанол	0,49	0,99	371	0
2	хлорбутан	0,34	1,06	460	-5
3	етилен	0,73	0,59	435	20
4	бензин	0,45	0,96	269	-15
5	діетиленоксид	0,52	0,87	250	-10
6	моноетиловий ефір етиленгліколю	0,47	0,64	235	25
7	пентан	0,385	0,93	286	-25
8	пропан	0,39	0,92	470	10
9	пропілен	0,51	0,7	455	5
10	пропіленоксид	0,67	0,7	430	10
11	сірководень	0,41	0,89	246	15
12	сірковуглець	0,59	0,23	102	-30
13	тетрагідрофуран	0,52	0,87	250	0
14	фуран	0,63	0,68	510	-5
15	фуранальдегід	0,87	0,41	298	20
16	фурфурол	0,41	0,87	298	10
17	циклогексан	0,44	0,94	260	25
18	етан	0,48	0,91	515	-15
19	етилацетат	0,39	0,99	446	15
20	етиленоксид	0,9	0,59	430	20

2. Для речовин, що представлені у таблиці, визначити можливість запалювання під час короткого замкнення електричних дротів.

№	Метал дротів	Висота дротів, м	Горючий матеріал	$E_{\min}, \text{мДж}$	$t_0, ^\circ\text{C}$
1	алюміній	9,0	сіно	260,0	20
2	- / -	4,5	казеїн	60	25
3	- / -	2,0	какао	100,0	35
4	- / -	1,0	крохмаль картопляний	45,0	40
5	- / -	3,0	крохмаль пшеничний	25,0	30
6	- / -	1,5	лгнін	20,0	28
7	- / -	2,5	лікоподій	40,0	18
8	- / -	7,0	келлін	4,6	20
9	- / -	6,0	ванадій (порошок)	8,0	23
10	- / -	2,5	гума	50,0	32
11	- / -	3,0	метилцелюлоза	20,0	25
12	- / -	5,0	пшеничне борошно	29,0	35
13	мідь	7,0	полуретан	15,0	30
14	- / -	9,0	сірка	15,0	20
15	- / -	4,5	бавовна	25,0	23
16	- / -	3,0	целюлоза	25,0	38
17	- / -	3,8	шеллак	10,0	40
18	- / -	4,0	етилцелюлоза	10,0	25
19	- / -	2,0	шрот соняшниковий	13,8	28
20	- / -	1,0	борошно ячне	85,0	30



Розділ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння

3. Визначити можливість виникнення горіння газо- або пароповітряної горючої суміші при контакті з підшипником ковзання, що працював без оливи та примусового охолодження протягом заданого часу. Площа поверхні підшипника, що омивається повітрям,  $S = 0,07 \text{ м}^2$ ; маса – 100 г, діаметр шийки вала  $d = 0,02 \text{ м}$ . Умови роботи підшипника, наведені в таблиці.

№	Горюча речовина	Метали, що труться у підшипнику	Час аварійної роботи, с	Радіальна сила, кН	Частота обертання, $\text{с}^{-1}$	Коефіцієнт тертя $f$	$t_c, ^\circ\text{C}$
1	метан	сталь–сталь	100	2,5	24	0,15	20
2	водень	–//–	120	3,0	27	0,16	25
3	сірководень	–//–	200	3,5	30	0,17	35
4	етилен	–//–	360	4,0	22	0,18	40
5	бензин	сталь–чавун	250	2,8	24	0,19	30
6	стирол	–//–	90	3,8	28	0,20	28
7	толуол	–//–	180	3,1	31	0,15	18
8	сірковуглець	–//–	240	4,2	23	0,16	20
9	ізооктан	сталь–бронза	300	2,2	23	0,17	23
10	н-гексан	–//–	120	2,7	26	0,18	32
11	н-гептан	–//–	60	3,4	29	0,19	25
12	н-бутан	–//–	200	3,6	21	0,20	35
13	ацетон	чавун–бронза	350	4,1	25	0,15	30
14	п-ксилол	–//–	150	3,2	27	0,16	20
15	диетилловий ефір	–//–	100	2,8	32	0,17	23
16	етилцеллозольв	–//–	140	3,3	22	0,18	38
17	етилацетат	чавун–чавун	250	2,1	25	0,19	40
18	уайт-спірит	–//–	120	4,3	34	0,20	25
19	циклогексан	–//–	340	2,9	24	0,15	28
20	пропан	–//–	200	3,7	26	0,16	30

4. Для пароповітряної суміші або горючого матеріалу, що під час газозварювальних робіт знаходиться у суміжному приміщенні в контакті з трубою, яка проходить через стінку заданої товщини, визначити за даних умов:

- можливість виникнення горіння за час проведення вогневих робіт;
- критичний час, через який у сусідньому приміщенні стане можливим виникнення горіння.

## Розділ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння

№	Горючий матеріал	Матеріал труби	Час теплового впливу, хв	Товщина стінки, м	$t_0$ , °C
1	бавовна	чавун	20	0,20	10
2	пентан	-/-	5	0,05	15
3	повсть будівельна	-/-	12	0,10	20
4	фуран	-/-	10	0,15	25
5	плита деревоволокниста	-/-	15	0,25	0
6	етилнітрат	-/-	7	0,07	5
7	тирса соснова	-/-	3	0,20	10
8	циклогексан	сталь	14	0,05	15
9	етилкарбінол	-/-	25	0,10	20
10	сіно	-/-	20	0,15	25
11	уайт-спірит	-/-	15	0,25	0
12	дріжджі кормові	-/-	10	0,07	5
13	сірковуглець	-/-	7	0,20	10
14	сланцевий піл	-/-	12	0,05	15
15	пропанол	мідь	22	0,10	20
16	плита мінераловатна	-/-	8	0,15	25
17	мука деревна	-/-	15	0,25	0
18	добриво для теплиць	-/-	17	0,07	5
19	ундекан	-/-	20	0,12	10
20	картон покрівельний	-/-	15	0,30	30

5. Для наведених горючих матеріалів, що опромінюються заданим тепловим потоком, визначити за даних умов: а) можливість виникнення горіння через заданий час; б) критичний час, через який можливе виникнення горіння.

№	Горючий матеріал	Густина потоку тепла, Вт·м <sup>-2</sup>	Час теплового впливу, хв	Температура, °C		$\rho$ , кг·м <sup>-3</sup>	$\lambda$ , Вт·м <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>	$c_p$ , кДж·кг <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>
				$t_0$	$t_{г.л.}$			
1	деревинностружкова вогнетривка плита	2500	50	20	375	750	0,14	3,2
2	повсть будівельна	1850	20	0	285	300	0,05	1,9
3	деревина соснова	1300	35	10	280	500	0,5	2,7
4	суміш полістиролу з каучуком	3200	15	15	325	1050	0,16	2,0
5	текстиль	7500	7	30	455	250	0,05	1,7
6	фанера березова	4200	25	25	300	450	0,3	2,8
7	тирса дубова	2800	40	17	229	200	0,08	2,7
8	пінопласт	1500	55	5	265	125	0,06	1,5
9	пробкова плита	5500	10	22	250	175	0,04	1,75
10	гума пориста	8900	15	15	312	250	0,05	1,5
11	гума технічна	12000	30	35	325	1550	0,15	1,6
12	шкіра	2700	5	7	250	700	0,14	2,5
13	текстоліт	9200	20	12	355	1350	0,24	1,45
14	плита торф'яна	1300	45	25	225	425	0,07	1,9
15	бавовна	2500	25	20	205	50	0,06	1,4

### 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 окислювальної 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,  $\varphi_n$ )** – найменша концентрація горючої речовини в суміші з повітрям, за якої вже можливе виникнення та поширення горіння.

**Верхня концентраційна межа поширення полум'я (ВКМПП,  $\varphi_v$ )** – 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 вище верхньої КМПП можливе виникнення дифузійного горіння за умови виходу газу або пари 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 окисному середовищі ( $\varphi_{O_2} \uparrow \varphi_{н\downarrow}, \varphi_{в\uparrow}$ ); домішки негорючих газів ( $\varphi_{нг} \uparrow \varphi_{н\uparrow}, \varphi_{в\downarrow}$ ); початкова температура системи ( $t_{поч} \uparrow \varphi_{н\downarrow}, \varphi_{в\uparrow}$ ); швидкість руху горючої суміші ( $v_{гс} \uparrow \varphi_{н\uparrow}, \varphi_{в\downarrow}$ ); потужність джерела запалювання ( $E_{дз} \uparrow \varphi_{н\downarrow}, \varphi_{в\uparrow}$ ).

Для забезпечення пожежної безпеки технологічних процесів, в яких обертуються 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:

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

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

де  $\varphi_{нб}, \varphi_{вб}$  – відповідно нижня та верхня безпечні КМПП, %;  $\varphi_{н}, \varphi_{в}$  – відповідно нижня та верхня КМПП, %.

Отже, для горючих газо- або пароповітряних сумішей характерними є області концентрацій, що відображені на рис. 3.1.



**Рис. 3.1 – Концентраційна шкала пожежовибухонебезпеки горючих газоповітряних сумішей:**

БК – область безпечних концентрацій; НК – небезпечних концентрацій; ВНК – вибухонебезпечних концентрацій; ВБК, ПНК – 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  $г \cdot м^{-3}$  або  $кг \cdot м^{-3}$ ; вона

Розділ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння

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  $\varphi^0$  та масовою  $\varphi'$  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 значень атмосферного тиску і температури ( $P_{\text{атм}} = 101,3 \text{ кПа}$ ,  $T_{\text{поч}} = 298 \text{ К}$ ) 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 безпеки речовин у будь-якому агрегатному стані. Навіть якщо речовина знаходиться у конденсованому стані, перш ніж виникне горіння, у більшості випадків відбувається перехід таких речовин у газоподібний стан шляхом випаровування або розкладання з можливістю подальшого запалювання утворених газів.

КМПП застосовують: 1) для порівняльної оцінки пожежної безпеки декількох речовин; 2) для оцінки пожежної безпеки 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 за умови  $\varphi_{\text{факт}} > \varphi_{\text{нб}}$  можна використовувати горючу речовину у технологічному процесі лише за умови гарантованої відсутності доступу повітря, тобто у герметичних умовах; 4) при розробці заходів щодо забезпечення пожежної безпеки вентиляційних систем, для розрахунку області безпечних концентрацій газів ( $\varphi^0_{\text{без}} < \varphi^0_{\text{нб}}$ ).

### ***Приклад розв'язання задачі***

Визначити ступінь безпеки фактичної концентрації та можливість проведення відкритих вогневих робіт за стандартних умов, якщо в повітряному просторі приміщення міститься 2,2 % пропану  $\text{C}_3\text{H}_8$ .

#### *Розв'язання*

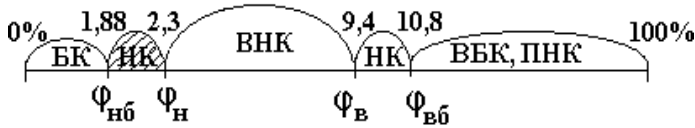
1. Визначаємо нижню та верхню КМПП пропану за довідником [7]:  $\varphi_{\text{н}} = 2,3 \%$ ,  $\varphi_{\text{в}} = 9,4 \%$ .

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

$$\varphi^{\circ}_{\text{нб}} = 0,9(2,3 - 0,21) = 1,88 \%,$$

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

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



Висновок: фактична концентрація пропану 2,2 % потрапляє в область між  $\varphi^{\circ}_{\text{нб}}$  та  $\varphi^{\circ}_{\text{н}}$  (1,88÷2,3 %), тобто є 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 теплою згоряння

Нижню КМПП можна визначити з урахуванням мінімальної енергії, необхідної для підтримання процесу горіння. Встановлено, що кількість тепла  $Q_{\text{кр}}$ , 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:

$$\begin{aligned} Q''_{\text{н}} & - 100 \% \\ Q''_{\text{кр}} & - \varphi^{\circ}_{\text{н}}, \% \\ \varphi_{\text{н.}} & = 100 \frac{Q''_{\text{гр}}}{Q''_{\text{н}}} = 100 \frac{1830}{Q''_{\text{н}}}; \% . \end{aligned} \quad (3.4)$$

#### *Методика розрахунку НКМПП горючої речовини за її теплою згоряння*

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

2. Визначити нижчу об'ємну теплоту згоряння за стандартних умов ( $V_{\text{н}} = 24,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ) за формулою (1.53):

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

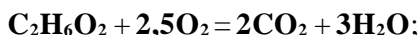
4. Визначити нижню безпечну КМПП за формулою (3.1).

**Приклад розв'язання задачі**

Розрахувати нижню концентраційну межу поширення полум'я етиленгліколю  $C_2H_6O_2$  за стандартних умов, виходячи з теплоти згорання. Результат розрахунку порівняти зі дослідно встановленим значенням  $\varphi_n = 4,3 \%$ .

*Розв'язання*

1. Визначаємо нижчу молярну теплоту згорання етиленгліколю за законом Гесса, за довідником [7] теплота утворення етиленгліколю дорівнює  $\Delta H_{\text{f}}^{\circ} = -453,8 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ .



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

2. Визначаємо нижчу об'ємну теплоту згорання етиленгліколю за стандартних умов за формулою (1.53):

$$Q_n'' = 1059,3 \frac{1000}{24,5} = 43414 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

3. Визначаємо нижню КМПП за формулою (3.4):

$$\varphi_n = 100 \frac{1830}{43414} = 4,2; \%$$

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

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

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

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

Нижню об'ємну КМПП індивідуальних речовин, що складаються з атомів С, Н, О, N, S, Si, P, Cl, F, можна розрахувати за формулою:

$$\varphi_n = \frac{100}{1 + h_f \Delta H_f^{\circ} + \sum_{j=1}^n h_j n_j + \sum_{s=1}^q h_s n_s}, \% \quad (3.5)$$

де  $h_f$  – параметр теплоти утворення горючої речовини,  $\text{моль} \cdot \text{кДж}^{-1}$ ;  $\Delta H_f^{\circ}$  – теплота утворення речовини у газоподібному стані,  $\text{кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ ;  $h_j$  – параметр енергетичного внеску  $j$ -го елемента в молекулі горючої речовини;  $n_j$  – число атомів  $j$ -го елемента в молекулі горючої речовини;  $h_s$  – параметр енергетичного внеску  $s$ -го типу хімічного зв'язку в молекулі горючої речовини;  $n_s$  – число хімічних зв'язків  $s$ -го типу в молекулі горючої речовини.

Параметри  $h_f$ ,  $h_j$  і  $h_s$  передбачають, що адіабатична температура горіння бідних сумішей є для речовин одного класу величиною приблизно однаковою

Таблиця 3.1 – Значення коефіцієнтів  $h_f$ ,  $h_j$ ,  $h_s$ , моль·кДж<sup>-1</sup>, для визначення нижньої КМПП за хімічним складом горючої речовини

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

Якщо молекула горючої речовини має у своєму складі тільки атоми С, Н, О, N, Cl, то краще розраховувати її нижню КМПП за формулою (3.5) з урахуванням значень коефіцієнтів  $h_f$  і  $h_j$ , представлених у таблиці 3.2, що забезпечує відносне середнє квадратичне відхилення до 9 %.

Таблиця 3.2 – Значення коефіцієнтів  $h_f$ ,  $h_j$ ,  $h_s$ , моль·кДж<sup>-1</sup>, 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

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

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

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	–

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

$$\varphi_H = \frac{100}{\sum_{j=1}^n h_j m_j + \sum_{s=1}^q h_s \ell_s}, \% \quad (3.6)$$

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;  $\ell_s$  – число хімічних зв'язків s-го типу в молекулі речовини.



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

$h_j$									$h_s$
$h_C$	$h_H$	$h_O$	$h_N$	$h_S$	$h_{Si}$	$h_F$	$h_{Cl}$	$h_J, h_{Br}$	$h_{C \equiv C}$
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, для яких працює окрема формула:

$$\varphi_H = \frac{88,3 + 226 \cdot n_{Br} / n_C}{\sum_{j=1}^n h_j m_j}, \% \quad (3.7)$$

де  $n_{Br}$ ,  $n_C$  – відповідно число атомів «Br» та «C» в молекулі горючої речовини.

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 адиабатична 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 (для розрахунку НКМПП за формулою (5)).

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  $\begin{matrix} -C \\ \diagdown \\ O \\ \diagup \\ C- \end{matrix}$ ).

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 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:  $\Delta H_f^\circ = -437,3 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ .

2. Особливих розрахункових типів хімічних зв'язків у будові оцтової кислоти немає. Визначаємо тип та число атомів у хімічній будові речовини. До складу оцтової кислоти входять атоми С, Н, О, виписуємо відповідні значення  $h_j$  із табл. 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):

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

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

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

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 ( $\varphi_{без} < \varphi_{нб}$ ).

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

2. *O*-ксилол є ароматичним вуглеводнем, тому розрахунок нижньої КМПП проводимо за формулою (3.5) з використанням коефіцієнтів табл. 3.3:

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

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

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

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*

Внаслідок вмісту атомів бром у молекулі, 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, для зручності складаємо таблицю.

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

2. Розраховуємо нижню КМПП 1-бромбутану за формулою (3.7):

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

Висновок: розраховане значення нижньої концентраційної межі поширення полум'я 1-бромбутану дорівнює 2,69 % (за дослідом – 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:

$$\varphi_{n(v)} = \frac{100}{a \cdot \beta + b}, \% \quad (3.8)$$

де  $\beta$  – 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  $\beta$ .

Таблиця 3.5 – Коефіцієнти  $a, b$  для визначення концентраційних меж поширення полум'я за формулою (3.8)

Область застосування		$a$	$b$
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  $\beta$ .
2. Визначити коефіцієнти  $a$  та  $b$  для нижньої та верхньої КМПП за табл. 3.5.
3. Розрахувати об'ємні безпечні КМПП за формулами (3.1), (3.2).
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 КМПП 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:



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

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

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

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

$$\Phi_{н.б} = 0,9(2,85 - 0,21) = 2,38 \%,$$

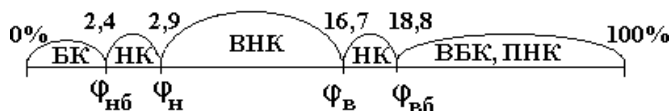
$$\Phi_{в.б} = 1,1(16,71 + 0,42) = 18,84 \%.$$

4. Визначаємо масові КМПП за формулою (3.3) з урахуванням молярної маси етилформиату та молярного об'єму газу за стандартних умов  $V_{\mu} = 24,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$ :  $\mu = 3 \cdot 12 + 6 \cdot 1 + 2 \cdot 16 = 74 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ,

$$\Phi'_{н} = 10\Phi_{н} \frac{\mu}{V_{\mu}} = 10 \cdot 2,85 \frac{74}{24,5} = 86,08 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$\Phi'_{в} = 10\Phi_{в} \frac{\mu}{V_{\mu}} = 10 \cdot 16,71 \frac{74}{24,5} = 504,7 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}.$$

5. Для визначення вибухобезпечних концентрацій будемо шкалу:



Висновок: концентраційні межі поширення полум'я етилформиату становлять 2,85–16,71 % або 86,1–504,7 г·м<sup>-3</sup>. Пара етилформиату в суміші з повітрям буде вибухобезпечною за концентрацій менше 2,4 % та більше 18,8 %.

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

Для більш точного визначення концентраційних меж поширення полум'я враховують вплив хімічної будови на схильність горючої речовини до окиснення; наступна формула працює з похибкою до 9 %:

$$\Phi_{н(в)} = \frac{100}{\sum_{\mu=1}^s h_s m_s}, \% \quad (3.9)$$

де  $\Phi_{н(в)}$  – нижня або верхня КМПП;  $\ell_s$  – число s-их структурних груп у хімічній формулі речовини;  $h_s$  – внесок s-ої структурної групи, що визначають для нижньої і верхньої КМПП із табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Коефіцієнти  $h_s$  для визначення концентраційних меж поширення полум'я за хімічною будовою горючої речовини

Вид структурної групи	$h_s$ для НКМПП	$h_s$ для 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 <sup>3</sup>	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

#### Методика розрахунку КМПП горючої речовини за хімічною будовою

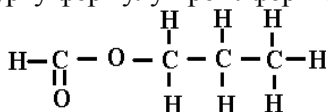
1. Записати структурну формулу горючої речовини (додаток 20).
2. Визначити вид та число структурних груп  $m_s$  в будові речовини. Для нижньої і верхньої КМПП виписати значення  $h_s$  для кожного встановленого типу хімічного зв'язку із таблиці 3.6.
3. Визначити нижню та верхню КМПП.

#### 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  $\ell_s$  в будові речовини. Для нижньої і верхньої КМПП виписуємо значення  $h_s$  із таблиці 3.6 для кожного типу зв'язку. Для спрощення розрахунків складаємо таблицю:

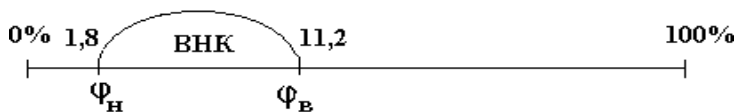
Вид структурної групи	Число груп, $\ell_s$	$h_s$	
		НКМПП	ВКМПП
C – C	2	3,75	-0,84
C – H	8	4,47	1,39
C – O	2	0,90	-1,40
C = O	1	3,12	1,31

3. Визначаємо нижню і верхню концентраційну межу поширення полум'я:

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

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

Для визначення області вибухонебезпечних концентрацій будуємо шкалу концентрацій:



Висновок: пара етилформиату утворює вибухонебезпечне середовище з повітрям 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 випадках, коли на виробництві використовують 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 складної суміші адитивні:

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

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

Розділ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння  
 ністю або можуть взаємодіяти між собою. Відносне 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 КМПП горючих компонентів 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 КМПП і область вибухонебезпечних концентрацій суміші парів, яка містить 20 об. % пропанолу  $C_3H_8O$  і 80 об. % етанолу  $C_2H_6O$ .

#### *Розв'язання*

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

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



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

$$\varphi_{H_{C_3H_8O}} = \frac{100}{8,684 \cdot 4,5 + 4,679} = 2,29 \%, \quad \varphi_{V_{C_3H_8O}} = \frac{100}{1,55 \cdot 4,5 + 0,56} = 13,27 \%,$$

$$\varphi_{H_{C_2H_6O}} = \frac{100}{8,684 \cdot 3 + 4,679} = 3,25 \%, \quad \varphi_{V_{C_2H_6O}} = \frac{100}{1,55 \cdot 3 + 0,56} = 19,19 \%.$$

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

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

$$\varphi_{V_{\text{сум.}}} = \frac{20 + 80}{\frac{20}{13,27} + \frac{80}{19,19}} = 17,6 \% .$$

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:

$$\varphi_{н(в)сум} = \frac{100\varphi_{н(в)гор} \left( 1 + \frac{\varphi_{\Sigma нг}}{100 - \varphi_{\Sigma нг}} \right)}{100 + \frac{\varphi_{н(в)гор}}{100 - \varphi_{\Sigma нг}}}, \% , \quad (3.11)$$

де  $\varphi_{н(в)гор}$  – нижня (верхня) КМПП горючої складової газової суміші за формулою (3.10), %;  $\varphi_{\Sigma нг}$  – сумарний вміст негорючих компонентів у 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:

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

де  $n_{пов}$  – питома дійсне число моль повітря, що відповідає 1 молу вихідної суміші за нижньої КМПП; визначають за формулою:

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

де  $l, m$  – число горючих ( $k$ ) та негорючих ( $j$ ) компонентів суміші відповідно;  $\varphi_k, \varphi_j$  – вміст  $k$ -го горючого та  $j$ -го негорючого компонента у суміші, %;  $\varphi_{нk}$  – нижня КМПП  $k$ -го горючого компонента суміші;  $c_j$  – коефіцієнт, що характеризує  $j$ -ий негорючий компонент ( $c_{CO_2} = 0,988, c_{H_2O} = 1,59, c_{N_2} = 1,247$ ).

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 початкової температури  $25^\circ C$  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:

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



Розділ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння  
де  $l, m$  – число горючих ( $k$ ) та негорючих ( $j$ ) компонентів суміші відповідно;  
 $\varphi_k, \varphi_j$  – вміст  $k$ -го горючого та  $j$ -го негорючого компонента у суміші, %;  $\varphi_{в_k}$  –  
верхня КМПП  $k$ -го горючого компонента суміші, %;  $\varphi_{в_j}$  – умовна верхня КМПП  
 $j$ -го негорючого компонента суміші, %, яку розраховують за формулою:

$$\varphi_{в_j} = \frac{\varphi_{фл}}{\left\{ \left[ \frac{\sum_{k=1}^l \frac{\varphi_k}{\varphi_{в_k}}}{1 - \frac{\sum_{k=1}^l \frac{\varphi_k}{\varphi_{н_k}}} \right] (1 - K_{фл}) \right\}}, \quad (3.15)$$

де  $K_{фл}$  – коефіцієнт флегматизації;  $\varphi_{н_k}, \varphi_{в_k}$  – нижня та верхня КМПП  $k$ -го го-  
рючого компонента суміші, %;  $\varphi_{фл}$  – мінімальна флегматизуюча концентрація  
 $j$ -го негорючого компонента у суміші, яку розраховують за формулою:

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

де  $\Delta H_{f,сер}^{\circ}$  – середня стандартна теплота утворення горючих складових суміші,  
кДж моль<sup>-1</sup>;  $m_{i,сер}$  – середнє число атомів даного  $i$ -го типу у горючих компо-  
нентах суміші;  $h_f, h'_{ф}, h_i$  – коефіцієнти для атомів горючих речовин зі складу су-  
міші, які відповідають даному негорючому газу; табл. 3.7.

Таблиця 3.7 – Коефіцієнти для визначення мінімальної флегматизуючої кон-  
центрації негорючих компонентів

Коефіцієнти	Значення коефіцієнтів при розведенні		
	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O (пара)	CO <sub>2</sub>
$h'_f$ , моль·кДж <sup>-1</sup>	$0,865 \cdot 10^{-2}$	$0,802 \cdot 10^{-2}$	$0,736 \cdot 10^{-2}$
$h'_{ф}$	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

Для даної суміші горючих газів розраховують середню теплоту утво-  
рення горючих складових суміші та середнє число атомів даного типу:

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

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

де  $\Delta H_{fk}^{\circ}$  – стандартна теплота утворення k-го горючого компонента суміші, кДж моль<sup>-1</sup>;  $m_{ik}$  – число атомів i-го типу в k-му горючому компоненті.

Коефіцієнти флегматизації  $K_{фл}$  різними розріджувачами для сумішей органічних речовин, водню та оксиду карбону (II) наведені в табл. 3.8.

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

Флегматизатор	Флегматизація процесу горіння		
	органічних речовин	H <sub>2</sub>	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:

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

де  $K_{флк}$  – 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*

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

Горючий компонент суміші	$\varphi_n, \%$	$\varphi_v, \%$
$H_2$	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  $N_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$  і становить:

$$\varphi_{\Sigma_{нг}} = 7,7 + 3,7 + 2,3 = 13,7 \%$$

Перераховуємо склад коксового газу на 100 % горючих компонентів:

$$\varphi_{H_2} = \frac{57 \cdot 100}{100 - 13,7} = 66,05 \%; \quad \varphi_{CH_4} = \frac{6,8 \cdot 100}{100 - 13,7} = 7,88 \%;$$

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

3. Розраховуємо КМПП горючої складової суміші за формулою (3.10):

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

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

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

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

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

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

### **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 молю 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 КМПП 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  $m_{i_{\text{сер}}}$ , що містять усі горючі компоненти, 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).
  - 2.4. Розрахувати умовну верхню КМПП  $\varphi_{v_j}$  для негорючого компонента суміші за формулою (3.15).
  - 2.5. Розрахувати верхню КМПП суміші  $\varphi_{v_{\text{сум}}}$  за формулою (3.14).

### **Приклад розв'язання задачі**

Розрахувати концентраційні межі поширення полум'я газової суміші складу: 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 за довідником [7]:  $\varphi_{nC_2H_6} = 2,9$  %;  $\varphi_{nC_4H_{10}} = 1,8$  %.
  - 1.2. Розраховуємо питоме дійсне число молів повітря, що відповідає 1 молю вихідної суміші за нижньої концентраційної межі поширення полум'я, за формулою (3.13) з урахуванням, що  $c_{H_2O} = 1,6$ ,  $c_{CO_2} = 0,99$ :

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

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

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

2. Розраховуємо верхню КМПП суміші горючих газів з негорючими.

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

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

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

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

$$\Delta H_{\text{f} \text{сеп}}^{\circ} = \frac{(-84,7) \cdot 70 + (-126) \cdot 20}{70 + 20} = -93,9 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

2.2.3. Розраховуємо середнє число атомів  $i$ -го типу  $m_{i \text{сеп}}$ , що містять усі горючі компоненти, за формулою (3.18).

Атомів карбону в молекулі етану 2, а в молекулі бутану – 4. Атомів гідрогену в молекулі етану 6, а в молекулі бутану – 10. Отже середнє число атомів карбону та гідрогену у суміші газів:

$$m_{\text{C}} = \frac{2 \cdot 70 + 4 \cdot 20}{70 + 20} = 2,4, \quad m_{\text{H}} = \frac{6 \cdot 70 + 10 \cdot 20}{70 + 20} = 6,9.$$

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  $\varphi_{\text{в}}$  води та оксиду карбону (IV) для даної суміші за формулою (3.15):

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

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

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

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

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  $2,68 \div 14,1$  %.

### Приклад розв'язання задачі

Розрахувати верхню концентраційну межу поширення полум'я коксового газу 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	$\Delta H_f^\circ$ , кДж·моль <sup>-1</sup>	$\varphi_{\text{н}}$ , %	$\varphi_{\text{в}}$ , %
H <sub>2</sub>	0	4,1	75
CH <sub>4</sub>	-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  $\Delta H_{f \text{ сеп}}^\circ$  суміші горючих компонентів за формулою (3.17):

$$\Delta H_{f \text{ сеп}}^\circ = \frac{0 \cdot 20 + (-74,85) \cdot 53 + (-110,5) \cdot 8}{20 + 53 + 8} = -59,9 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

2.2. Розраховуємо середнє число атомів  $i$ -го типу  $m_{i, \text{сеп}}$  (гідроген та карбон), що містять усі горючі компоненти, за формулою (3.18):

$$m_{\text{C}} = \frac{1 \cdot 53 + 1 \cdot 8}{20 + 53 + 8} = 0,75, \quad m_{\text{H}} = \frac{2 \cdot 20 + 4 \cdot 53}{20 + 53 + 8} = 3,1.$$

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

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

3. У складі горючої суміші наявні водень і оксид карбону, тому 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  $\varphi_{\text{в}}$  азоту за формулою (3.15):

$$\varphi_{\text{в}_{\text{N}_2}} = \frac{39,4}{\left\{ 1 - \frac{\frac{20}{75} + \frac{53}{14,1} + \frac{8}{74}}{\frac{20}{4,1} + \frac{53}{5,3} + \frac{8}{12,5}} (1 - 0,011) \right\}} = 54,35\%.$$

5. Розраховуємо верхню КМПП суміші  $\varphi_{\text{в}_{\text{сум}}}$  за формулою (3.14):

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

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 °C), на КМПП враховується рівнянням:

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

де  $\varphi_{\text{н(в)}}$  – значення нижньої або верхньої КМПП за стандартних умов, %;  $Z$  – константа меж: для нижньої КМПП  $Z = 1250$ , для верхньої  $Z = -800$ ;  $t$  – температура середовища, °C.

**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 зросла 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):

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

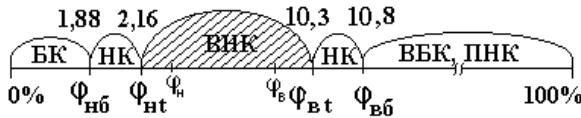
$$\varphi_{v(t=100^\circ C)} = 9,4 \left( 1 - \frac{100 - 25}{(-800)} \right) = 10,28 \%$$

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

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

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

4. Для оцінки ступеня небезпеки пропану за підвищеної температури будемо 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 (для 100 °С область вибухонебезпечних концентрацій становить 2,16–10,3 %), тому експлуатація технологічного процесу за даних умов забороняється.

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

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 аерозолі приймають КМПП. Оскільки великі концентрації пилу, які дорівнюють верхній КМПП, не можуть довго утримуватися у повітрі, пожежовибухонебезпека аерозолі 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 поширенням горіння на весь об'єм аерозолі.



Пил в осілому стані (аерогель) горить подібно до подрібненого твердого матеріалу, може самоспалахувати і самозайматися, для оцінки його пожежо-небезпечних властивостей 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 пожежовибухонебезпеку характеризується середньодисперсний пил (з розміром частинок близько 40÷50 мкм), часточки якого відносно швидко прогріваються 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 значно впливають на пожежовибухонебезпеку таких систем. Орієнтовно масову нижню КМПП пилу залежно від його дисперсності можна розрахувати за формулами [5]:

$$\text{дрібнодисперсний аерозоль (< 10 мкм): } \varphi'_n = 0,41\mu\varphi_n, \text{г} \cdot \text{м}^{-3}; \quad (3.21)$$

$$\text{середньодисперсний аерозоль (40–50 мкм): } \varphi'_n = 0,164\mu\varphi_n, \text{г} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (3.22)$$

де  $\mu$  – молярна маса речовини,  $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ;  $\varphi_n$  – об'ємна нижня КМПП даної речовини у газоподібному стані, %.

Але у 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 аерозолу можна розрахувати за формулою Шоневальда:

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

де  $Q'_n$  – нижча масова теплота згоряння,  $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ ;  $a$ ,  $b$  – коефіцієнти, які залежать від типу горючої речовини (табл. 3.9).

Таблиця 3.9 – Значення коефіцієнтів  $a$  і  $b$  для визначення нижньої КМПП 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 обертється горючий пил, зумовлюється підтриманням робочої концентрації аерозолу нижче **нижньої безпечної концентраційної межі поширення полум'я аерозолу** [5], яку можна розрахувати за формулою:

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

За ступенем пожежовибухобезпеки горючий пил поділяють на дві групи і чотири класи залежно від значення нижньої масової КМПП пилу у стані аерозолу з врахуванням температури самоспалахування (табл. 3.10).

Таблиця 3.10 – Класифікація горючого пилу за ступенем пожежовибухобезпеки

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

### *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 пожежовибухобезпеки даного пилу за таблицею 3.10.

### *Приклад розв'язання задачі*

Розрахувати нижню КМПП дрібно- та середньодисперсного пилу нафталіну  $C_{10}H_8$ , якщо його стандартна теплота утворення:  $152 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ . Визначити ступінь пожежовибухобезпеки аерозолу 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 будові горючої речовини немає. Випишуємо значення  $h_j$  із табл. 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

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

2. Розраховуємо нижню масову КМПП пилу за формулами (3.21), (3.22), враховуємо молярну масу нафталіну:  $\mu = 10 \cdot 12 + 8 \cdot 1 = 128$  кг·кмоль<sup>-1</sup>;

середньодисперсний пил:  $\varphi'_n = 0,164 \cdot 128 \cdot 0,85 = 17,8$  г·м<sup>-3</sup>;

дрібнодисперсний пил:  $\varphi'_n = 0,41 \cdot 128 \cdot 0,85 = 44,6$  г·м<sup>-3</sup>.

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

середньодисперсний пил:  $\varphi'_{нб} = 0,53 \cdot 17,8 = 9,5$  г·м<sup>-3</sup>;

дрібнодисперсний пил:  $\varphi'_{нб} = 0,53 \cdot 44,6 = 23,6$  г·м<sup>-3</sup>.

Висновок: оскільки значення  $\varphi'_n$  лежать у межах від 15 г·м<sup>-3</sup> до 65 г·м<sup>-3</sup>, і середньодисперсний, і дрібнодисперсний 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 (1.52).

1.2. Для речовин і матеріалів складного складу розрахувати нижчу масову теплоту згоряння за формулою Менделєєва (1.56):

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<sub>4</sub>H<sub>6</sub>O<sub>6</sub> ( $\Delta H_f^\circ = -836$  кДж·моль<sup>-1</sup>,  $\mu = 150$  кг·кмоль<sup>-1</sup>) 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:



1.2. Визначаємо молярну теплоту згоряння речовини за законом Гесса:

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

1.3. Перераховуємо молярну теплоту згоряння в масову:

$$Q'_n = \frac{1465 \cdot 1000}{150} = 97643 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

2. Розраховуємо нижню масову КМПП винної кислоти за формулою Шоневальда. Оскільки винна кислота є органічною речовиною, вибираємо за табл. 3.9 сталі рівняння  $a = -2,524$ ,  $b = 1,235$ .

$$\varphi'_n = -2,524 + \frac{1,235 \cdot 10^6}{97643} = 123,9 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}.$$

3. Розраховуємо нижню безпечну КМПП винної кислоти, формула (3.24):

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

Висновок: оскільки полідисперсний пил винної кислоти має  $\varphi'_n > 65 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$ , він відноситься до другої групи пожежонебезпечних пилів. За довідником [7] визначаємо температуру самоспалахування винної кислоти:  $t_{cc} = 411 \text{ }^\circ\text{C}$ . Оскільки  $t_{cc} > 250 \text{ }^\circ\text{C}$ , даний 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 (1.56):

$$Q'_n = 339,4 \cdot 78,0 + 1256,8 \cdot 5,3 + 108,9(2,82 - 10,3 - 1,4) - 25,1(9 \cdot 5,3 + 0,78) = 25650,4 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

2. Розраховуємо нижню масову КМПП аерозолі вугільного пилу за формулою Шоневальда. Оскільки вугільний пил є пилом палива, вибираємо з табл. 3.9 сталі рівняння:  $a = -7,952$ ,  $b = 1,394$ .

$$\varphi'_n = -7,952 + \frac{1,394 \cdot 10^6}{256504} = 46,4 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}.$$

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

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

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  $\text{г} \cdot \text{м}^{-3}$ .

## 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;      в) за апроксимаційною формулою;  
б) за хімічною будовою речовини;      г) за хімічним складом речовини.

№	Речовина		№	Речовина	
	назва	формула		назва	формула
1	амілметилкетон	$C_7H_{14}O$	14	пропіонова кислота	$C_3H_6O_2$
2	аміловий спирт	$C_5H_{12}O$	15	ноніловий спирт	$C_9H_{20}O$
3	амілциклогексан	$C_{11}H_{22}$	16	метилацетат	$C_3H_6O_2$
4	ацетон	$C_3H_6O$	17	метилгексан	$C_7H_{16}$
5	акрилова кислота	$C_3H_4O_2$	18	октаналь	$C_8H_{16}O$
6	бутанова кислота	$C_4H_8O_2$	19	бутанол	$C_4H_8O$
7	бутилфенол	$C_{10}H_{14}O$	20	пiperидин	$C_5H_{11}N$
8	бутаналь	$C_4H_8O$	21	пропіленгліколь	$C_3H_8O_2$
9	валеролактон	$C_5H_8O_2$	22	етилацетат	$C_4H_8O_2$
10	гексилметилкетон	$C_8H_{16}O$	23	етиленгліколь	$C_2H_6O_2$
11	диацетоновий спирт	$C_6H_{12}O_2$	24	ізоаміловий спирт	$C_5H_{12}O$
12	детиламін	$C_4H_{11}N$	25	фенілетіловий ефір	$C_8H_{10}O$
13	ксилідин	$C_8H_{11}N$	26	октанол	$C_8H_{18}O$

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	$\Phi^{\circ}$ ф акт, %	$\Phi^{\prime}$ ф акт, г·м <sup>-3</sup>	№	Речовина	$\Phi^{\circ}$ ф акт, %	$\Phi^{\prime}$ ф акт, г·м <sup>-3</sup>
1	метан $CH_4$	5,0	45	16	діетиловий ефір $C_4H_{10}O$	5,9	185
2	етан $C_2H_6$	4,0	55	17	етилен $C_2H_4$	4,9	195
3	метилацетат $C_3H_6O_2$	3,0	65	18	метанол $CH_4O$	3,9	205
4	пропан $C_3H_8$	2,0	75	19	детиламін $C_4H_{11}N$	2,9	215
5	бутан $C_4H_{10}$	1,0	85	20	ксилідин $C_8H_{11}N$	1,9	225
6	пентан $C_5H_{12}$	4,5	95	21	етанол $C_2H_6O$	0,9	235
7	декан $C_{10}H_{22}$	3,5	105	22	акролеїн $C_3H_4O$	1,4	245
8	метилгексан $C_7H_{16}$	2,5	115	23	бутанол $C_4H_8O$	2,4	255
9	бутанол $C_4H_{10}O$	1,5	125	24	пропаналь $C_3H_6O$	4,4	265
10	октанол $C_8H_{18}O$	0,5	135	25	пропіламін $C_3H_9N$	6,4	275
11	мурашина к-та $CH_2O_2$	9,9	145	26	гексанол $C_6H_{14}O$	8,4	285
12	бутанова к-та $C_4H_8O_2$	8,9	165	27	метилциклопентан $C_6H_{12}$	10,4	295
13	циклопентан $C_5H_{10}$	7,9	155	28	детиламін $C_4H_{11}N$	16,4	25
14	метилацетат $C_3H_6O_2$	6,9	175	29	пропілформіат $C_4H_8O_2$	14,4	315
15	дипропіловий ефір $C_3H_{14}O$	18,4	35	30	салциловий альдегід $C_7H_6O_2$	12,4	305

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	t, °C	№	Речовина	Формула	t, °C
1	бутилметилкетон	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	50	14	метилциклопентан	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	100
2	бутилформіат	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	70	15	метоксиетилацетат	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	120
3	валеріанова к-та	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	100	16	октаналь	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	150
4	гексилметилкетон	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	120	17	октиловий спирт	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	200
5	дибутиловий ефір	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	150	18	піридин	C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N	60
6	діоксан	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	200	19	пропаналь	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	80
7	діетиламін	C <sub>4</sub> H <sub>11</sub> N	60	20	пропіламін	C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> N	110
8	метилциклогексан	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	80	21	пропіонова кислота	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	140
9	m-кілол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	110	22	стирол	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	190
10	тетраметилбензол	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	140	23	толуол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	90
11	пропіленгліколь	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	190	24	триметиламін	C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> N	130
12	октанова кислота	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	50	25	триметилгексан	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	210
13	пентанол-2	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	70	26	пропілформіат	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	170

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 <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	11	метилциклогексан	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
2	етилтолуол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	12	фенілетиловий ефір	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O
3	триметилгексан	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	13	ксилідин	C <sub>8</sub> H <sub>11</sub> N
4	оцтова кислота	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	14	метилпентальдегід	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O
5	додекан	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	15	пропілциклогексан	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
6	метанол	CH <sub>4</sub> O	16	ізопропілбензол	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub>
7	метилформіат	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	17	метилбутират	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>
8	пентанол-2	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	18	метоксиетилацетат	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>
9	октан	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	19	тетраметилбензол	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>
10	крезол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	20	ноніловий спирт	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> 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 <sub>10</sub> H <sub>8</sub> O	11	фенол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O
2	фурадонін	C <sub>8</sub> H <sub>6</sub> O <sub>5</sub> N <sub>4</sub>	12	антрацен	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>
3	фталева кислота	C <sub>8</sub> H <sub>6</sub> O <sub>4</sub>	13	сечовина	CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O
4	дифеніл	C <sub>12</sub> H <sub>16</sub>	14	дихлорнафтохінон	C <sub>10</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>
5	нітроацетофенон	C <sub>8</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>3</sub>	15	сахароза	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub>
6	фенілнафтламін	C <sub>16</sub> H <sub>13</sub> N	16	бензофенон	C <sub>13</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>
7	нітратдіетиламін	C <sub>4</sub> H <sub>12</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17	ацетанлід	C <sub>8</sub> H <sub>9</sub> ON
8	дифенілкарбінол	C <sub>13</sub> H <sub>12</sub> O	18	малеїнова кислота	C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>4</sub>
9	кратонова кислота	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	19	салцілова кислота	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>
10	амінооцтова кислота	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>	20	нітрат етаноламіну	C <sub>2</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>

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

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

7. Для речовин, наведених у таблиці, визначити ступінь небезпеки фактичних концентрацій  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$ .

№	Речовина	Формула	Фактична концентрація, %		№	Речовина	Формула	Фактична концентрація, %	
			$\varphi_1$	$\varphi_2$				$\varphi_1$	$\varphi_2$
1	акролеїн	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O	1,5	18,0	16	дітиленгліколь	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	0,5	15,1
2	аліловий спирт	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	1,0	11,0	17	ізопрен	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	1,0	14,1
3	амілацетат	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	0,5	7,0	18	ксиленол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	1,5	13,1
4	ацетон	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	2,0	8,0	19	лімонен	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	2,0	12,1
5	ацетоніприл	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> N	3,3	4,0	20	масляна к-та	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	2,5	11,1
6	бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	0,9	6,0	21	ізопропіламін	C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> N	1,8	11,0
7	бутанон	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	8,0	12,0	22	нафтол	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> O	3,5	9,1
8	валеріановий альдегід	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	0,5	2,0	23	метилетилловий ефір	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	1,2	5,8
9	гексильовий спирт	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	0,4	4,0	24	нонільовий спирт	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> O	4,5	7,1
10	гексилметакрилат	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	2,0	16,0	25	олеїнова к-та	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	6,0	0,1
11	гексадієн	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	0,8	6,0	26	етилацетат	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	6,5	1,6
12	діоксан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	1,0	10,0	27	пірол	C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> N	7,0	4,1
13	метиламін	CH <sub>5</sub> N	4,0	13,0	28	пропілен	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	7,5	3,1
14	нітробензол	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NO	4,0	8,1	29	формальдегід	CH <sub>2</sub> O	8,0	2,1
15	толуол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	3,5	20,0	30	циклопентадієн	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub>	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			V <sub>прим</sub> , м <sup>3</sup>	№	Горюча рідина			V <sub>прим</sub> , м <sup>3</sup>
	назва	формула	маса, кг			назва	формула	маса, кг	
1	октан	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	20,0	150	14	пропілбутират	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	40,0	50
2	ацетон	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	100,0	500	15	пропілетилкетон	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	20,0	144
3	бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	30,0	500	16	пропілметилкетон	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	35,0	250
4	бутанон	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	30,0	175	17	дипропілкетон	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	25,0	200
5	гексан	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	14,0	150	18	тетрагідрофуран	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	10,0	150
6	пропаналь	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	15,0	144	19	мурашина к-та	CN <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	50,0	200
7	пропіламін	C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> N	15,0	144	20	триметиламін	C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> N	25,0	50
8	діетиламін	C <sub>4</sub> H <sub>11</sub> N	10,0	144	21	циклогексан	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	20,0	250
9	етилформіат	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	30,0	200	22	метоксиетилацетат	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	30,0	150
10	етилацетат	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	5,0	200	23	метициклогексан	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	20,0	175
11	метилбензол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	20,0	144	24	аліловий спирт	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	10,0	150
12	етилнітрат	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O <sub>3</sub> N	30,0	320	25	діетиленгліколь	C <sub>3</sub> H <sub>10</sub> O	50,0	150
13	м-толуїдін	C <sub>7</sub> H <sub>9</sub> N	15,0	100	26	циклопентадієн	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub>	20,0	500

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

№	Склад горючого газу, %										
	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> 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



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 <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> 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		

11\*. Розрахувати температуру і тиск під час вибуху пилу дифенілу (C<sub>12</sub>H<sub>10</sub>) стехіометричної концентрації. Внутрішня енергія вибухової суміші за стандартних умов дорівнює 8,36 кДж·моль<sup>-1</sup>. Початковий тиск – 101,3 кПа, теплота згорання дифенілу – 6239 кДж·моль<sup>-1</sup>. У процесі вибуху бере участь 90 % пилу.

## ГЛАВА 2. ПАРАМЕТРИ ПОЖЕЖОВИБУХОНЕБЕЗПЕКИ 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 безпеку горючої рідини можна оцінювати не за концентрацією її пари, а за температурою самої рідини.

Для встановлення пожежної безпеки насиченої пари рідини замість концентраційних меж можна вказати температури рідини, за яких ці концентрації 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 окисному середовищі ( $\varphi_{O_2} \uparrow t_n \downarrow, t_b \uparrow$ ); домішки негорючих рідин або негорючих газів у повітрі ( $\varphi_{нр}, \varphi_{нг} \uparrow t_n \uparrow, t_b \downarrow$ ); загальний тиск системи ( $P_{заг} \uparrow t_n \uparrow, t_b \uparrow$ ); потужність джерела запалювання ( $E_{дз} \uparrow t_n \downarrow, t_b \uparrow$ ).

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 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 – небезпечних концентрацій пари; ВНК – вибухонебезпечних концентрацій пари; ВБК, ПНК – 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; 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** мають бути нижче нижньої безпечної або вище верхньої безпечної ТМПП:  $t_{роб\ без} < t_{нб}$  або  $t_{роб\ без} > t_{вб}$ ; 4) визначити найбільш пожежовибухонебезпечний час року для використання даної горючої речовини.

За тієї самої температури концентрація пари над рідиною у відкритому просторі є меншою, ніж у закритому, внаслідок втрат пари шляхом дифузії у навколишнє середовище. Тому для досягнення концентрації пари, рівної нижній КМПП, необхідна більша температура рідини. Таку температуру рідини називають **температурою спалаху**, яка є важливим параметром визначення ступеня пожежовибухонебезпеки рідини на відкритому просторі.

**Температура спалаху ( $t_{сн}$ )** – 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.

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 ( $t_z$ )** – 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 окислювальному 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 легкозаймісті рідини. До **горючих (ГР)** відносять 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 **легкозаймістих рідин (ЛЗР)**. Легкозаймісті рідини з температурою спалаху 28 °С і нижче відносять до **особливо небезпечних 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 водопіпних засобів гасіння під час пожежі.

### **§ 1. Розрахунок тиску насиченої пари**

Залежність між тиском і концентрацією насиченої пари показує співвідношення:

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

Звідси взаємозв'язок між концентрацією і тиском насиченої пари:

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

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

де  $\varphi_{нп}$  – об'ємна концентрація насиченої пари в пароповітряній суміші над поверхнею рідини, %;  $P_{нп}$  – тиск насиченої пари, кПа;  $P_{заг}$  – загальний тиск

Розділ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння пароповітряної суміші над поверхнею рідини, кПа.

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

Фазовий перехід речовини з рідкого стану в газоподібний описується *рівнянням Клапейрона-Клаузіуса*, яке визначає залежність тиску насиченої пари від температури рідини та її виду (теплоти випаровування):

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

де  $\Delta H_{\text{випрід}}$  – молярна теплота випаровування  $i$ -го горючого компонента; кДж·моль<sup>-1</sup>;  $T_{\text{рід}}$  – 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:

$$\ln \frac{P_{\text{нп}}(T_2)}{P_{\text{нп}}(T_1)} = \frac{\Delta H_{\text{випрід}}}{R} \left( \frac{1}{T_{\text{рід1}}} - \frac{1}{T_{\text{рід2}}} \right). \quad (3.27)$$

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 наведні для кожної рідини у довідниках [7], [9] та у табл. 14 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. 15 додатків). У цьому випадку розрахувати тиск насиченої пари за визначеної температури рідини можна методом *лінійної інтерполяції*, використовуючи схему:

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

де  $t_{\phi}$  – 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  $t_{\phi}$ , °С;  $P_{\text{нп}}(t_1)$ ,  $P_{\text{нп}}(t_2)$  – тиск насиченої пари за відповідних температур рідини за довідковими даними або табл. 15 додатків.

У такому разі розрахунок тиску насиченої пари за даної температури проводять методом інтерполяції:

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

Під час визначення ступеня пожежної небезпеки *суміші рідин* слід мати на увазі, що взаємна розчинність двох рідин змінюється в широких межах: від повної нерозчинності до змішуваності у будь-яких співвідношеннях з утворенням однорідного розчину [12]. Тому суміші 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 тощо. 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 КМПП 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 взаєморозчинних рідин визначають як суму тисків насиченої пари компонентів відповідно до їх мольного вмісту:

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

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

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

або

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

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

Фактична концентрація пари суміші визначається подібно до формули

Розділ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння (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 КМПП, 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 14 додатків (для розрахунку за формулою (3.28));

2.2. два значення температури  $t_1$  і  $t_2$ , найближчі до даної температури  $t_f$ , та відповідні до них значення тиску насиченої пари  $P_{\text{нп}(t_1)}$ ,  $P_{\text{нп}(t_2)}$  за довідником [9] або за таблицею 15 додатків (для розрахунку за формулою (3.29)).

3. Розрахувати фактичну концентрацію насиченої 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. Визначасмо КМПП етилацетату за довідником [7]:  $\varphi_n = 2\%$ ;  $\varphi_v = 11,4\%$ .

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

За таблицею 14 додатків визначасмо константи Антуана етилацетату:  $A = 6,2267$ ;  $B = 1244,95$ ;  $C_a = 217,88$ .

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

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

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

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

4. Визначаємо ступінь пожежної небезпеки насиченої пари етилацетату за даних умов: висновок: через те що фактична концентрація насиченої пари етилацетату за даних умов знаходиться у межах від нижньої до верхньої КМПП ( $\varphi_{\text{н}} = 2 \text{ \%} < \varphi_{\text{ф}} = 9,37 \text{ \%} < \varphi_{\text{в}} = 11,4 \text{ \%}$ ), 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  $5^\circ\text{C}$  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]:  $\varphi_{\text{н}} = 2,85 \text{ \%}$ ;  $\varphi_{\text{в}} = 16,71 \text{ \%}$ .

2. Розраховуємо тиск насиченої пари за даної температури за формулою (3.29). За табл. 15 додатків визначаємо дві температури  $t_1$  і  $t_2$ , значення яких є найближчими до заданої  $t_{\text{ф}} = 5^\circ\text{C}$  та відповідні їм тиски насиченої пари:

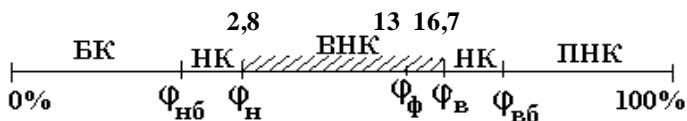
$$t_{\text{ф}} = 5^\circ\text{C} \begin{cases} t_1 = -11,5^\circ\text{C} \rightarrow P_{\text{нп}}(t_1) = 5,33 \text{ кПа} \\ t_2 = 5,4^\circ\text{C} \rightarrow P_{\text{нп}}(t_2) = 13,33 \text{ кПа} \end{cases} \cdot P_{\text{нп}}(t_{\text{ф}}) = ?$$

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

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

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

4. Визначаємо ступінь пожежної небезпеки насиченої пари етилформиату за даних умов: будуємо концентраційну шкалу, позначаємо на ній  $\varphi_{\text{ф}}$ .



Висновок: фактична концентрація насиченої пари етил формиату за даних умов знаходиться у межах від нижньої до верхньої КМПП ( $\varphi_{\text{н}} = 2,85 \text{ \%} < \varphi_{\text{ф}} = 13,0 \text{ \%} < \varphi_{\text{в}} = 16,71 \text{ \%}$ ), 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  $\mu_i$ .

3. Для взаєморозчинних рідин розрахувати мольні частки компонентів  $r_{\mu_i}$  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:

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

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

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 КМПП даної суміші, зробити висновок щодо ступеня її пожежної небезпеки.

**Приклад розв'язання задачі**

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

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

$$\lg P_{\text{нп1}} = 6,252 - \frac{1430,418}{210,745 + 20} = 0,053;$$

$$P_{\text{нп1}} = 10^{0,053} = 1,13 \text{ кПа};$$

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

$$\lg P_{\text{нп2}} = 7,812 - \frac{1918,508}{252,125 + 20} = 0,76;$$

$$P_{\text{нп2}} = 10^{0,76} = 5,75 \text{ кПа};$$

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

$$\lg P_{\text{нп3}} = 8,922 - \frac{2664,684}{279,64 + 20} = 0,029;$$

$$P_{\text{нп3}} = 10^{0,029} = 1,06 \text{ кПа};$$

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

$$\lg P_{\text{нп4}} = 6,051 - \frac{1328,171}{217,713 + 20} = 0,46;$$

$$P_{\text{нп4}} = 10^{0,46} = 2,88 \text{ кПа}.$$

2. Визначаємо за довідником [7] молярні маси компонентів суміші  $\mu_i$ : бутилацетат  $C_6H_{12}O_2$ :  $\mu_1 = 116 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ; етанол  $C_2H_6O$ :  $\mu_2 = 46 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ; 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  $r_{\mu_i}$  за формулою (3.32):

$$r_{\mu_1} = \frac{\frac{50}{116}}{\frac{50}{116} + \frac{10}{46} + \frac{20}{74} + \frac{20}{92}} = 0,38; \quad r_{\mu_2} = \frac{\frac{10}{46}}{\frac{50}{116} + \frac{10}{46} + \frac{20}{74} + \frac{20}{92}} = 0,19;$$

$$r_{\mu_3} = \frac{\frac{20}{74}}{\frac{50}{116} + \frac{10}{46} + \frac{20}{74} + \frac{20}{92}} = 0,24; \quad r_{\mu_4} = \frac{\frac{20}{92}}{\frac{50}{116} + \frac{10}{46} + \frac{20}{74} + \frac{20}{92}} = 0,19.$$

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

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

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

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

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. Визначаємо за довідником [7] КМПП компонентів розчинника № 648:

бутилацетат  $C_6H_{12}O_2$ :  $\varphi_{н_1} = 1,35 \%$ ,  $\varphi_{в_1} = 9,0 \%$ ;

етиловий спирт  $C_2H_6O$ :  $\varphi_{н_2} = 3,6 \%$ ,  $\varphi_{в_2} = 17,7 \%$ ;

бутиловий спирт  $C_4H_{10}O$ :  $\varphi_{н_3} = 1,8 \%$ ,  $\varphi_{в_3} = 10,9 \%$ ;

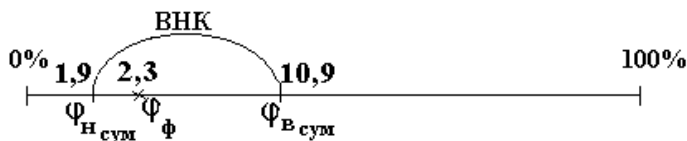
толуол  $C_7H_8$ :  $\varphi_{н_4} = 1,3 \%$ ,  $\varphi_{в_4} = 6,8 \%$ .

8. Розраховуємо КМПП пароповітряної суміші, що утворилася над поверхнею розчинника № 648, за формулою (3.10):

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

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

9. Для визначення ступеня пожежної небезпеки фактичної концентрації суміші парів, що утворюється над поверхнею розчинника № 648 за температури  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  і атмосферного тиску  $101 \text{ кПа}$ , будемо 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 (у закритому просторі) стає рівною нижній або верхній концентраційній межі поширення полум'я. Такі температури називають *температурними межами поширення полум'я*. Як і для КМПП, розрізняють нижню і верхню температурну межу поширення полум'я рідини (ТМПП), які можна визначити за допомогою розрахункових методів.

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

Для розрахункового визначення ТМПП можна використовувати залежність тиску насиченої пари від температури рідини, яка описує рівняння Антуана (3.28), та взаємозв'язок тиску насиченої пари з її концентрацією (3.25):

$$\lg P_{\text{нп}} = A - \frac{B}{t_{\text{рід}} + C_a} \quad \text{або} \quad t_{\text{рід}} = \frac{B}{A - \lg P_{\text{нп}}} - C_a, \quad ^\circ\text{C}; \quad P_{\text{нп}} = P_{\text{заг}} \frac{\varphi_{\text{нп}}}{100}$$

звідси

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

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

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

де  $t_{\text{н(в)}}$  – нижня або верхня ТМПП,  $^\circ\text{C}$ ;  $A, B, C_a$  – константи рівняння Антуана, які визначають за довідником [7] або за табл. 14 додатків;  $P_{\text{заг}}$  – загальний атмосферний тиск, кПа;  $\varphi_{\text{н(в)}}$  – нижня або верхня КМПП, %.

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:

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

де  $P_{\text{нпн(в)}}$  – тиск насиченої пари горючої рідини, що забезпечує нижню або верхню КМПП пари, кПа; формула (3.25);  $P_{\text{нпн}(t_1)}, P_{\text{нпн}(t_2)}$  – значення тиску насиченої пари, що є найближчими до  $P_{\text{нпн}}$  або  $P_{\text{нпв}}$ , кПа;  $t_1, t_2$  – значення температур рідини, що забезпечують тиск насиченої пари  $P_{\text{нпн}(t_1)}, P_{\text{нпн}(t_2)}$ ,  $^\circ\text{C}$ ; значення  $P_{\text{нпн}(t_1)}, P_{\text{нпн}(t_2)}, t_1, t_2$  визначають за довідником [9] або табл. 15 додатків.

Більш точно ТМПП можна визначити з урахуванням того факту, що функція  $\lg P_{\text{нп}} = A - \frac{B}{T_{\text{рід}}}$  є лінійною; тоді методом лінійної інтерполяції:

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

У тих випадках, коли залежність тиску насиченої пари від температури невідома, для речовин, що містять атоми С, Н, О, N, значення нижньої і верхньої ТМПП можна визначити з урахуванням *структури горючої речовини* з середньоквадратичним відхиленням розрахунку 9 °С за формулою:

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

де  $a_0$  – розмірний коефіцієнт для  $t_n$   $a_0 = -62,46$  °С, для  $t_v$   $a_0 = -41,43$  °С;  $a_1$  – безрозмірний коефіцієнт для  $t_n$   $a_1 = 0,655$ ; для  $t_v$   $a_1 = 0,723$ ;  $t_{кип}$  – температура кипіння горючої рідини, °С;  $l_j$  – число структурних груп  $j$ -го типу;  $a_j$  – емпіричний коефіцієнт внеску  $j$ -ї структурної групи, див. табл. 3.11.

Таблиця 3.11 – Коефіцієнти для визначення ТМПП за структурою речовини

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

Для деяких класів речовин встановлено безпосередній зв'язок ТМПП з температурою кипіння. Для таких речовин ТМПП легко можна розрахувати з використанням *констант гомологічного ряду* за емпіричною формулою з середнім квадратичним відхиленням не більше 10 °С:

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

де  $k$  і  $\ell$  – коефіцієнти гомологічних рядів горючих рідин; див. табл. 3.12.

Таблиця 3.12 – Константи  $k$  і  $\ell$  гомологічних рядів для визначення температурних меж поширення полум'я

Гомологічний ряд	Узагальнена формула	Нижня ТМПП		Верхня ТМПП	
		$k$	$\ell$	$k$	$\ell$
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
нормальні алкляміни	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{NH}_2$	0,5004	54,6	-	-

Як було сказано вище, ТМПП можуть змінюватися за умови зміни зов-

нішніх умов, тому для гарантованого забезпечення пожежної безпеки експлуатації горючих рідин визначають безпечні температурні межі.

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

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

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

де  $t_{нб}$ ,  $t_{вб}$ ,  $t_n$ ,  $t_v$  – відповідно нижня безпечна та верхня безпечна, нижня та верхня ТМПП,  $^\circ\text{C}$ ;  $K_6$  – коефіцієнт безпеки, для індивідуальних речовин і нафтопродуктів  $K_6 = 10,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ , для сумішей горючих рідин  $K_6 = 14 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Застосування ТМПП 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, представлені 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 КМПП речовини за довідником [7] або розрахунком за формулами (3.8), (3.9);
- визначити константи Антуана за довідником [7] або за табл. 14 додатків;
- розрахувати ТМПП за формулою (3.38).

#### **1.2. Розрахунок ТМПП методом лінійної інтерполяції:**

- визначити нижню та верхню КМПП горючої речовини за довідником [7], 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 15 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 табл. 15 додатків (температура кипіння рідини за даних умов відповідає тиску її насиченої пари, рівному зовнішньому тиску, наприклад, атмосферному);

- записати структурну формулу горючої рідини та визначити число структурних груп даного типу  $\ell_j$  та відповідні їм коефіцієнти  $a_j$  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 табл. 15 додатків;
- встановити гомологічний ряд, до якого відноситься дана горюча речовина та відповідні константи  $k$  і  $\ell$  для нижньої та верхньої ТМПП за табл. 3.12;
- розрахувати ТМПП за формулою (3.42).

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



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

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

2. Визначаємо константи Ангуана етилацетату за таблицею 14 додатків:  $A = 6,2267$ ;  $B = 1244,95$ ;  $C_a = 217,88$ .

3. Визначаємо температурні межі поширення полум'я етилацетату з урахуванням загального тиску пароповітряної суміші за формулою (3.38):

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

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

Висновок: температурні межі поширення полум'я етилацетату  $C_4H_8O_2$  за атмосферного тиску 95 кПа дорівнюють  $t_n = -8 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $t_v = 22,9 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

**Приклад розв'язання задачі**

Визначити, за яких температур всередині технологічного обладнання насичена пара бутанової кислоти  $C_4H_8O_2$  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]:  $\varphi_n = 2,0 \%$ ,  $\varphi_v = 10,3 \%$ .

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

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

$$P_{\text{ни(в)}} = \varphi_v \frac{P_{\text{заг}}}{100} = 10,3 \frac{101,3}{100} = 10,4 \text{ кПа}.$$

3. За таблицею 15 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:

$$P_{\text{ни(н)}} = 2,02 \text{ кПа} \rightarrow \begin{cases} P_{\text{ни}(t_1)} = 1,33 \text{ кПа} \rightarrow t_1 = 61,5 \text{ }^\circ\text{C} \\ P_{\text{ни}(t_2)} = 5,33 \text{ кПа} \rightarrow t_2 = 88,0 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \rightarrow t_n = ?$$

$$P_{\text{ни(в)}} = 10,4 \text{ кПа} \rightarrow \begin{cases} P_{\text{ни}(t_1)} = 5,33 \text{ кПа} \rightarrow t_1 = 88,0 \text{ }^\circ\text{C} \\ P_{\text{ни}(t_2)} = 13,33 \text{ кПа} \rightarrow t_2 = 108,0 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \rightarrow t_v = ?$$

4. Визначаємо ТМПП за формулою (3.39):

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

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

Висновок: насичена пара бутанової кислоти  $C_4H_8O_2$  утворює вибухонебезпечну концентрацію всередині технологічного обладнання в діапазоні температур від  $71,7 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $105,2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

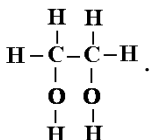
***Приклад розв'язання задачі***

Визначити безпечний температурний режим експлуатації закритого технологічного апарату, 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 їм коефіцієнти  $a_j$  за таблицею 3.11. Для спрощення розрахунків складаємо таблицю:

Вид структурної групи	Число груп, $\ell_j$	$a_j$	
		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):

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

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

4. Розраховуємо безпечні ТМПП за формулами (3.43), (3.44), враховуючи коефіцієнт безпеки  $K_6$  для індивідуальної речовини  $10,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ :

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

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

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

#### Розв'язання

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

2. Визначаємо гомологічний ряд та значення констант  $k$  і  $\ell$  для нижньої і верхньої ТМПП за табл. 3.12: етилформиат відноситься до складних ефірів мурашиної кислоти, тому  $k_{\text{н}} = 0,5359$ ,  $\ell_{\text{н}} = 47,6$ ;  $k_{\text{в}} = 0,6050$ ,  $\ell_{\text{в}} = 25,0$ .

3. Визначаємо ТМПП за формулою (3.42):

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

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

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

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

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

Для визначення безпечних робочих температур технологічного процесу з обертанням етилформіату будуюмо шкалу температур, аналогічно до рис. 3.2.



Висновок: температурні межі поширення полум'я етилформіату дорівнюють:  $t_n = -18,5$  °C,  $t_v = 7,8$  °C; безпечні робочі температури технологічного процесу, в якому обертається етилформіат  $C_3H_6O_2$  за даних умов, менше, ніж  $t_{нб} = -26,1$  °C, та більше, ніж  $t_{вб} = 20,1$  °C.

### Приклад розв'язання задачі

Визначити небезпеку насиченої пари пропанолу  $C_3H_8O$ , що обертається у закритому технологічному процесі за температури 15 °C і тиску 101,3 кПа.

#### Розв'язання

1. Визначасмо нижню та верхню ТМПП пропанолу за довідником [7]:  $t_n = 21,0$  °C,  $t_v = 55,0$  °C.

2. Визначасмо безпечні ТМПП горючої рідини за формулами (3.43), (3.44), з урахуванням коефіцієнта безпеки для індивідуальної рідини 10,5 °C:

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

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

3. Для визначення ступеня небезпеки пропанолу за температури 15 °C будуюмо температурну шкалу відповідно до рис. 3.2:



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

### 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. 14 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 ТМПП *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. 12 додатків) або значення *тиску насиченої пари суміші* за декількох температур, які перекривають передбачувані ТМПП.

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  $t_{\text{н(в)сум}}$ :

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

де  $r_{\text{н}i}$  – молярна частка  $i$ -го компонента в рідкій фазі;  $B_i$ ,  $C_{\text{а}i}$  – константи рівняння Антуана для  $i$ -го компонента суміші;  $t_{\text{н(в)i}}$ ,  $t_{\text{н(в)сум}}$  – нижня або верхня ТМПП відповідно  $i$ -го компонента та суміші горючих рідин.

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

Якщо залежність тиску насиченої пари від температури невідома хоча б для одного компонента, то нижню ТМПП суміші взаєморозчинних горючих рідин можна розрахувати за методом сум з використанням значень теплоти випаровування та ТМПП компонентів суміші. Із рівнянь (3.25), (3.27) та (3.31) можна отримати формулу (3.46), яка перетворюється у тотожність за температури  $t_{\text{нсум}}$ :

$$\sum_i r_{\text{н}i} \cdot \exp \left[ \frac{\Delta H_{\text{вип}i}}{R} \left( \frac{1}{T_{\text{н}i}} - \frac{1}{T_{\text{нсум}}} \right) \right] = 1, \quad (3.46)$$

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

універсальна газова стала;  $T_{н1}$ ,  $T_{н\text{сум}}$  – нижня температурна межа поширення полум'я і-го компонента та суміші рідин, К.

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

$$\frac{\Delta H_{\text{вип}i}}{R} = -29186 + 19,6(t_{\text{кип}i} + 273),$$

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

Для суміші взаєморозчинних горючих та негорючих рідин розрахунок нижньої ТМПП 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:

$$T_{нj} = \frac{B_j}{A_j - \lg \frac{P_{\text{зар}}}{\gamma - 1}} - C_{aj} + 273, \text{ К}, \quad (3.47)$$

де  $A_j$ ,  $B_j$ ,  $C_{aj}$  – константи Антуана даного негорючого компонента;  $P_{\text{зар}}$  – загальний тиск пароповітряної суміші, кПа;  $\gamma$  – параметр флегматизуючого або інгібуючого впливу негорючого компонента в паровій фазі, див. табл. 3.13.

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

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

\*) температуру 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 ТМПП 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 ТМПП знаходять за методом лінійної інтерполяції за формулою:

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

де  $T_{н(в)\text{сум}}$  – нижня або верхня ТМПП суміші рідин;  $T_1$ ,  $T_2$  – температури суміші у першому та другому наближенні розрахунку;  $\Sigma_1$ ,  $\Sigma_2$  – значення суми у лівій частині рівняння (3.45) або (3.46), розраховане за температур  $T_1$  та  $T_2$ .

Оцінку нижньої ТМПП бінарної суміші взаєморозчинних рідин, які не утворюють азеотропних складів, можна провести за *апроксимаційною формулою*:

$$t_{n_{\text{сум}}} = \frac{\varphi_A \cdot t_{nA} + \varphi_B \cdot t_{nB} - f(t_{nA} - t_{nB})}{100}, \quad (3.49)$$

де А, В – компоненти горючої суміші (за речовину А обирають рідину з більшою нижньою ТМПП);  $\varphi_A$ ,  $\varphi_B$  – концентрація компонентів в рідкій фазі, мас. %;  $t_{nA}$ ,  $t_{nB}$  – нижня ТМПП компонентів, °С;  $f$  – емпіричний коефіцієнт, що визначається за відсотковим складом суміші за табл. 3.14 і враховує нелінійний характер випаровування компонентів суміші залежно від її складу.

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

$\varphi_A$ , мас. %	$f$	$\varphi_A$ , мас. %	$f$	$\varphi_A$ , мас. %	$f$	$\varphi_A$ , мас. %	$f$
<b>100</b>	0	<b>75</b>	26	<b>50</b>	26	<b>25</b>	14,5
<b>95</b>	12	<b>70</b>	23,9	<b>45</b>	23,9	<b>20</b>	11,9
<b>90</b>	20	<b>65</b>	21,7	<b>40</b>	21,7	<b>15</b>	9,2
<b>85</b>	26	<b>60</b>	19,4	<b>35</b>	19,4	<b>10</b>	6,5
<b>80</b>	29,2	<b>55</b>	17	<b>30</b>	17	<b>5</b>	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 – суміш взаєморозчинних рідин. Вибухонебезпечні концентрації насиченої пари горючої рідини утворюються в інтервалі температур між нижньою та верхньою ТМПП. Визначення ТМПП розчинника М можна провести за формулою (3.38). Із табл. 12 додатків виписуємо константи Антуана розчинника М:  $A = 8,057$ ,  $B = 2083,566$ ,  $C_a = 267,735$ . Нижня КМПП: 2,8 %. Визначення верхньої КМПП пари над поверхнею суміші взаєморозчинних рідин проводимо за методикою у §1 глави 2 даного розділу.

1. Розраховуємо нижню ТМПП розчинника М за формулою (3.38):

$$t_n = \frac{B}{A - \lg(0,01P_{\text{заг}} \varphi_n)} - C_a = \frac{2083,566}{8,057 - \lg(0,01 \cdot 102 \cdot 2,8)} - 267,735 = 6,4^\circ \text{С}.$$

2. Визначаємо верхню КМПП пари розчинника М за формулою Ле-Шательє для суміші горючих газів. Склад розчинника та параметри пожежної безпеки його компонентів за довідником [7] представлено в таблиці:

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

2.1. Розраховуємо мольні частки компонентів  $r_{\mu_i}$  за формулою (3.32):

$$r_{\mu_1} = \frac{\frac{30}{116}}{\frac{30}{116} + \frac{60}{46} + \frac{5}{74} + \frac{5}{88}} = 0,15; \quad r_{\mu_2} = \frac{\frac{60}{46}}{\frac{30}{116} + \frac{60}{46} + \frac{5}{74} + \frac{5}{88}} = 0,77;$$

$$r_{\mu_3} = \frac{\frac{5}{74}}{\frac{30}{116} + \frac{60}{46} + \frac{5}{74} + \frac{5}{88}} = 0,04; \quad r_{\mu_4} = \frac{\frac{5}{88}}{\frac{30}{116} + \frac{60}{46} + \frac{5}{74} + \frac{5}{88}} = 0,04.$$

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

бутилацетат:  $\lg P_{\text{нп1}} = 6,252 - \frac{1430,418}{210,745 + 20} = 0,053;$

$$P_{\text{нп1}} = 10^{0,053} = 1,13 \text{ кПа};$$

етиловий спирт:  $\lg P_{\text{нп2}} = 7,812 - \frac{1918,508}{252,125 + 20} = 0,76;$

$$P_{\text{нп2}} = 10^{0,76} = 5,75 \text{ кПа};$$

ізобутиловий спирт:  $\lg P_{\text{нп3}} = 7,830 - \frac{2058,392}{245,642 + 20} = 0,081;$

$$P_{\text{нп3}} = 10^{0,081} = 1,21 \text{ кПа};$$

етилацетат:  $\lg P_{\text{нп4}} = 6,2267 - \frac{1244,951}{217,881 + 20} = 0,99;$

$$P_{\text{нп4}} = 10^{0,99} = 9,84 \text{ кПа}.$$

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

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

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

$$\varphi_1 = 100 \frac{1,13 \cdot 0,15}{5,04} = 3,36 \% ; \quad \varphi_2 = 100 \frac{5,75 \cdot 0,77}{5,04} = 87,85 \% ;$$

$$\varphi_3 = 100 \frac{1,21 \cdot 0,04}{5,04} = 0,96 \% ; \quad \varphi_4 = 100 \frac{9,84 \cdot 0,04}{5,04} = 7,81 \% .$$

2.5. Розраховуємо верхню КМПП 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 ТМПП розчинника М за формулою (3.38):

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

Перерахунки тиску насиченої пари кожного компонента розчинника М за температури  $37^{\circ}\text{C}$  показали, що склад пароповітряної суміші не змінюється.

Висновок: насичена пара розчинника М утворює вибухонебезпечні концентрації в інтервалі температур від  $6,4^{\circ}\text{C}$  до  $36,6^{\circ}\text{C}$ , якщо загальний тиск пароповітряної суміші дорівнює  $102\text{ кПа}$ .

### **Методика розрахунку ТМПП суміші горючих рідин за тиском її насиченої пари**

1. Визначити за довідником [7] ТМПП та КМПП кожного компонента суміші або розрахувати за попередніми методиками.

2. Визначити орієнтовний інтервал пошуку ТМПП суміші за діапазоном нижньої ТМПП та верхньої ТМПП компонентів суміші ( $t_{\text{н}_1} \div t_{\text{н}_2}$ ,  $t_{\text{в}_1} \div t_{\text{в}_2}$ ).

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 концентраційні межі поширення полум'я 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 КМПП пароповітряної суміші, за формулою (3.25).

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

### **Приклад розв'язання задачі**

Визначити ступінь небезпеки насиченої пари суміші рідин складу: бензол  $\text{C}_6\text{H}_6$  –  $51\%$  мас., хлорбензол  $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$  –  $49\%$  мас., якщо температура суміші дорівнює  $t_{\text{ф}} = 5^{\circ}\text{C}$ , 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	
	$\Phi_H$	$\Phi_B$	$t_H$	$t_B$
бензол	1,43 %	8,0 %	-15,0 °C	13,0 °C
хлорбензол	1,4 %	9,8 %	28,0 °C	62,0 °C

2. Визначаємо орієнтовні інтервали пошуку нижньої та верхньої ТМПП суміші за відповідними ТМПП компонентів:

межі пошуку  $t_{H_{\text{сум}}}$ : -15–28 °C; межі пошуку  $t_{B_{\text{сум}}}$ : 13–62 °C.

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

межі пошуку  $t_{H_{\text{сум}}}$ : -15–6 °C; межі пошуку  $t_{B_{\text{сум}}}$ : 13–37 °C.

3. Розраховуємо тиск насиченої пари кожного компонента суміші за визначених температур за формулою Антуана (3.28) (константи Антуана кожного компонента визначаємо за таблицею 14 додатків):

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

$$P_{\text{нп}} C_6H_6 (-15^\circ C) = 10^{5,6139 - \frac{902,275}{-15+178,10}} = 1,21 \text{ кПа};$$

$$P_{\text{нп}} C_6H_6 (6^\circ C) = 10^{5,6139 - \frac{902,275}{6+178,10}} = 5,13 \text{ кПа};$$

$$P_{\text{нп}} C_6H_6 (13^\circ C) = 10^{5,6139 - \frac{902,275}{13+178,10}} = 7,76 \text{ кПа};$$

$$P_{\text{нп}} C_6H_6 (37^\circ C) = 10^{5,6139 - \frac{902,275}{37+178,10}} = 26,3 \text{ кПа}.$$

$$P_{\text{нп}} C_6H_5Cl (-15^\circ C) = 10^{6,3861 - \frac{1607,316}{-15+235,351}} = 0,12 \text{ кПа};$$

$$P_{\text{нп}} C_6H_5Cl (6^\circ C) = 10^{6,3861 - \frac{1607,316}{6+235,351}} = 0,53 \text{ кПа};$$

$$P_{\text{нп}} C_6H_5Cl (13^\circ C) = 10^{6,3861 - \frac{1607,316}{13+235,351}} = 0,81 \text{ кПа};$$

$$P_{\text{нп}} C_6H_5Cl (37^\circ C) = 10^{6,3861 - \frac{1607,316}{37+235,351}} = 3,05 \text{ кПа}.$$



4. Розраховуємо мольну частку кожного компонента суміші за формулою (3.32), якщо  $\mu_{C_6H_6} = 78 \text{ г}\cdot\text{моль}^{-1}$ ;  $\mu_{C_6H_5Cl} = 112,5 \text{ г}\cdot\text{моль}^{-1}$ :

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

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):

$$t_{\text{рід}} = -15^\circ \text{C}: \quad \varphi_{C_6H_6} = 100 \frac{0,6 \cdot 1,2}{0,8} = 93,5\%; \quad \varphi_{C_6H_5Cl} = 100 \frac{0,4 \cdot 0,12}{0,8} = 6,5\%;$$

$$t_{\text{рід}} = 6^\circ \text{C}: \quad \varphi_{C_6H_6} = 100 \frac{0,6 \cdot 5,13}{3,3} = 93,5\%; \quad \varphi_{C_6H_5Cl} = 100 \frac{0,4 \cdot 0,54}{3,3} = 6,5\%;$$

$$t_{\text{рід}} = 13^\circ \text{C}: \quad \varphi_{C_6H_6} = 100 \frac{0,6 \cdot 7,76}{5,0} = 93,5\%; \quad \varphi_{C_6H_5Cl} = 100 \frac{0,4 \cdot 0,81}{5,0} = 6,5\%;$$

$$t_{\text{рід}} = 37^\circ \text{C}: \quad \varphi_{C_6H_6} = 100 \frac{0,6 \cdot 26,3}{17} = 92,8\%; \quad \varphi_{C_6H_5Cl} = 100 \frac{0,4 \cdot 3,05}{17} = 7,2\%.$$

Розрахунки показали, що в діапазоні температур рідини від мінус  $15^\circ \text{C}$  до  $37^\circ \text{C}$  склад пароповітряної суміші майже не змінюється. Приймаємо склад пароповітряної суміші таким: пара бензолу – 93 %, пара хлорбензолу – 7 %.

7. Розраховуємо КМПП пароповітряної суміші за формулою (3.10):

$$\varphi_{\text{н, сум}} = \frac{100}{\frac{93}{1,43} + \frac{7}{1,40}} = 1,43\%; \quad \varphi_{\text{в, сум}} = \frac{100}{\frac{93}{8,0} + \frac{7}{9,8}} = 8,1\%.$$

8. Розраховуємо значення тиску насиченої пари за формулою (3.25), що відповідають нижній та верхній КМПП пароповітряної суміші:

$$P_{\text{нп(н)}} = \frac{1,43 \cdot 100}{100} = 1,43 \text{ кПа}; \quad P_{\text{нп(в)}} = \frac{8,1 \cdot 100}{100} = 8,1 \text{ кПа}.$$

9. Розраховуємо ТМПП за інтерполяційною формулою (3.40):

$$P_{\text{нп(н)}} = 1,43 \text{ кПа} \rightarrow \begin{cases} P_{\text{нп}t_1} = 0,8 \text{ кПа}, T_1 = -15 + 273 = 258 \text{ К} \\ P_{\text{нп}t_2} = 3,3 \text{ кПа}, T_2 = 6 + 273 = 279 \text{ К} \end{cases} \cdot T_{\text{н}} = ?$$

$$T_{\text{н}} = \frac{1}{\frac{1}{279} + \left( \frac{1}{279} - \frac{1}{258} \right) \frac{\lg 1,43 - \lg 3,3}{\lg 3,3 - \lg 0,8}} = 266,2 \text{ К} = -6,8^\circ \text{С}.$$

$$P_{\text{нп(в)}} = 8,1 \text{ кПа} \rightarrow \begin{cases} P_{\text{нп}t_1} = 5,0 \text{ кПа}, T_1 = 13 + 273 = 288 \text{ К} \\ P_{\text{нп}t_2} = 17,0 \text{ кПа}, T_2 = 37 + 273 = 310 \text{ К} \end{cases} \cdot T_{\text{в}} = ?$$

$$T_{\text{в}} = \frac{1}{\frac{1}{310} + \left( \frac{1}{310} - \frac{1}{288} \right) \frac{\lg 8,1 - \lg 17,0}{\lg 17,0 - \lg 4,98}} = 296,3 \text{ К} = 23,3^\circ \text{С}.$$

Висновок: за фактичної температури  $5^\circ \text{С}$  насичена пара заданої суміші бензолу та хлорбензолу є вибухонебезпечною, бо фактична температура рідини знаходиться в межах від нижньої до верхньої ТМПП ( $t_{\text{н}} = -6,8^\circ \text{С} < t_{\text{ф}} = 5^\circ \text{С} < t_{\text{в}} = 23,3^\circ \text{С}$ ). Розраховані ТМПП близько збігаються з експериментальними даними:  $t_{\text{н,експ}} = -8^\circ \text{С}$ ,  $t_{\text{в,експ}} = 23^\circ \text{С}$ .

### *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, ТМПП, молярну теплоту випаровування (для розрахунків за формулою (3.46)). Якщо суміш має негорючий компонент – розрахувати для нього умовну нижню ТМПП за формулою (3.47).

2. Розрахувати мольні частки компонентів суміші за формулою (3.32).

3. Розрахувати ТМПП 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 ТМПП компонентів суміші.

3.2. Провести розрахунок ТМПП за формулою (3.45) або (3.46) у першому наближенні. Порівняти одержаний баланс з «1». Провести розрахунок у другому наближенні. Якщо отриманий баланс менший за «1», у другому наближенні прийняти ТМПП суміші більшими, ніж обрані у першому наближенні, на  $5 \div 10^\circ \text{С}$ ; якщо – більший за «1», у другому наближенні ТМПП суміші прийняти меншими, ніж обрані у першому наближенні, на  $5 \div 10^\circ \text{С}$ .

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 ТМПП 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 Ангуана			ТМПП, °С		Молярна маса, г/моль
			A	B	C <sub>a</sub>	t <sub>n</sub>	t <sub>b</sub>	
1	бензол C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	54	5,614	902,275	178,10	-15,0	13,0	78
2	кумол C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	46	6,067	1461,643	207,56	31	69	120

2. Розраховуємо мольні частки компонентів суміші за формулою (3.32):

$$r_{\mu_{C_6H_6}} = \frac{54}{\frac{54}{78} + \frac{46}{120}} = 0,64; \quad r_{\mu_{C_9H_{12}}} = \frac{46}{\frac{54}{78} + \frac{46}{120}} = 0,36.$$

3. Розраховуємо ТМПП суміші за формулою (3.45).

3.1. Приймаємо у першому наближенні ТМПП суміші, виходячи зі значень температурних меж поширення полум'я компонентів суміші.

Нижня ТМПП знаходиться в межах від -15–28 °С, приймаємо  $t_{n_1} = -5^\circ\text{C}$ .

Верхня ТМПП знаходиться в межах 13–62 °С, приймаємо  $t_{b_1} = 20^\circ\text{C}$ .

3.2. Розраховуємо ліву частину 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:

$$0,64 \cdot 10^{\frac{902,275(20-13)}{(20+178,1)(13+178,1)}} + 0,36 \cdot 10^{\frac{1461,643(20-69)}{(20+207,56)(69+207,56)}} = 0,940 + 0,026 = 0,966 < 1.$$

У першому наближенні сума у лівій частині рівняння для нижньої ТМПП є більшою за «1», тому приймаємо у другому наближенні  $t_{n_2} = -10^\circ\text{C}$ . Для верхньої ТМПП ліва частина рівняння виявилася меншою за «1», тому приймаємо у другому наближенні  $t_{b_2} = 25^\circ\text{C}$ .

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:  $\Sigma = 1$ :  $\begin{cases} \Sigma_1 = 1,364, t_{H_1} = -5^\circ \text{C} \\ \Sigma_2 = 0,949, t_{H_2} = -10^\circ \text{C} \end{cases}$   $t_{H_{\text{сум}}} = ?$

$$t_{H_{\text{сум}}} = -5 + \frac{(-10 - (-5))(1 - 1,364)}{(0,949 - 1,364)} = -9,4^\circ \text{C};$$

- для верхньої ТМПП:  $\Sigma = 1$ :  $\begin{cases} \Sigma_1 = 0,966, t_{B_1} = 20^\circ \text{C} \\ \Sigma_2 = 1,253, t_{B_2} = 25^\circ \text{C} \end{cases}$   $t_{B_{\text{сум}}} = ?$

$$t_{B_{\text{сум}}} = 20 + \frac{(25 - 20)(1 - 0,966)}{(1,253 - 0,966)} = 20,6^\circ \text{C}.$$

Висновок: суміш, яка містить 54,0 мас. % бензолу та 46,0 мас. % кумолу, має температурні межі поширення полум'я:  $t_{H_{\text{сум}}} = -9,5^\circ \text{C}$ ,  $t_{B_{\text{сум}}} = 20,6^\circ \text{C}$ .

### Приклад розв'язання задачі

Розрахувати нижню температурну межу поширення полум'я суміші, що містить 32,7 мас. % ізобутилового спирту і 67,3 мас. % етилового спирту.

#### Розв'язання

1. Визначаємо параметри компонентів суміші за довідниками [7], [9]:

№	Компонент суміші	Вміст, мас. %	Параметри компонентів		
			$t_H, ^\circ \text{C}$	молярна маса	$\Delta H_{\text{вип}}, \text{kJ} \cdot \text{моль}^{-1}$
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):

$$r_{\mu_{\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}}} = \frac{\frac{32,7}{74}}{\frac{32,7}{74} + \frac{67,3}{46}} = 0,23; \quad r_{\mu_{\text{C}_2\text{H}_6\text{O}}} = \frac{\frac{63,5}{46}}{\frac{36,5}{74} + \frac{63,5}{46}} = 0,77$$

3. Розраховуємо нижню ТМПП суміші  $t_{H_{\text{сум}}}$  за формулою (3.46).

3.1. Приймаємо у першому наближенні нижню ТМПП суміші, виходячи зі значень температурних меж поширення полум'я компонентів.

Нижні ТМПП компонентів становлять 11 та  $25^\circ \text{C}$ , приймаємо  $t_{H_1} = 15^\circ \text{C}$ .

3.2. Розраховуємо ліву частину рівняння (3.46) у першому наближенні:

$$0,23 \exp \left[ \frac{39,3}{8,314 \cdot 10^{-3}} \left( \frac{1}{273+25} - \frac{1}{273+15} \right) \right] +$$

$$+ 0,77 \exp \left[ \frac{38,6}{8,314 \cdot 10^{-3}} \left( \frac{1}{273+11} - \frac{1}{273+15} \right) \right] = 0,133 + 0,962 = 1,095 \approx 1,0.$$

Оскільки у першому наближенні сума в лівій частині рівняння є більшою за «1», приймаємо у другому наближенні  $t_{n_2} = 10^\circ\text{C}$  та повторюємо розрахунок:

$$0,23\text{e}^{\text{xp}}\left[\frac{39,3}{8,314 \cdot 10^{-3}}\left(\frac{1}{273+25}-\frac{1}{273+10}\right)\right]+$$

$$+0,77\text{e}^{\text{xp}}\left[\frac{38,6}{8,314 \cdot 10^{-3}}\left(\frac{1}{273+11}-\frac{1}{273+10}\right)\right]=0,132+0,725=0,857<1,0.$$

3.3. Розраховуємо нижню температурну межу поширення полум'я суміші рідин за методом лінійної інтерполяції за формулою (3.48):

$$\Sigma = 1 \cdot \begin{cases} \Sigma_1 = 1,095, t_{n_1} = 15^\circ\text{C} \\ \Sigma_2 = 0,857, t_{n_2} = 10^\circ\text{C} \end{cases} \cdot t_{n_{\text{сум}}} = ?$$

$$t_{n_{\text{сум}}} = 15 + \frac{(10-15)(1-1,095)}{(0,857-1,095)} = 13,0^\circ\text{C}.$$

Висновок: суміш, яка складається з 32,7 мас. % ізобутилового спирту та 67,3 мас. % етилового спирту, має нижню ТМПП  $t_{n_{\text{сум}}} = 13,0^\circ\text{C}$ .

### 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. %	$t_n, ^\circ\text{C}$	молярна маса	$\Delta H_{\text{вип}}, \text{кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$
1	етанол $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	70	11	46	38,6
2	вода $\text{H}_2\text{O}$	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.

$$T_{n_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{B}{A - \lg[P_{\text{заг}}/(\gamma - 1)]} - C_a = \frac{422,95}{3,901 - \lg[101,3/(1,13 - 1)]} - 100,95 = 318,3 \text{ К.}$$

2. Розраховуємо мольні частки компонентів суміші за формулою (3.32):

$$r_{\mu_{\text{C}_2\text{H}_6\text{O}}} = \frac{70}{\frac{46}{70} + \frac{30}{18}} = 0,45; \quad r_{\mu_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{30}{\frac{70}{46} + \frac{7,3}{18}} = 0,56.$$

3. Розраховуємо нижню температурну межу поширення полум'я суміші за формулою (3.46).

3.1. Оскільки нижня ТМПП компонентів суміші становить 284 та 318,3 К, у першому наближенні приймаємо  $T_{n_1} = 288$  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  $T_{n_2} = 298$  К та повторюємо розрахунок:

$$0,45e \frac{38,6}{8,314 \cdot 10^{-3}} \left( \frac{1}{284} - \frac{1}{298} \right) + 0,56e \frac{44,0}{8,314 \cdot 10^{-3}} \left( \frac{1}{318,3} - \frac{1}{298} \right) = 0,952 + 0,183 = 1,135 > 1,0.$$

3.3. Розраховуємо нижню температурну межу поширення полум'я суміші рідин за методом лінійної інтерполяції за формулою (3.48):

$$\Sigma = 1 \cdot \begin{cases} \Sigma_1 = 0,656, t_{n_1} = 288 - 273 = 15^\circ \text{C} \\ \Sigma_2 = 1,135, t_{n_2} = 298 - 273 = 25^\circ \text{C} \end{cases} \cdot t_{n_{\text{сум}}} = ?,$$

$$t_{n_{\text{сум}}} = 15 + \frac{(25 - 15)(1 - 0,656)}{(1,135 - 0,656)} = 22,2^\circ \text{C}.$$

Висновок: за розрахунком суміш, яка містить 70 % мас. етилового спирту та 30 % мас. води, має нижню температурну межу поширення полум'я  $t_{n_{\text{сум}}} = 22,2^\circ \text{C}$ , що близько збігається з дослідними даними [5]:  $t_{n_{\text{сум}}} = 20^\circ \text{C}$ .

### **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).

#### **Приклад розв'язання задачі**

Визначити, за яких температур фактична концентрація насиченої пари суміші рідин, що містить 45 % мас. ацетону і 55 % мас. толуолу, є безпечною.

#### *Розв'язання*

1. Визначаємо нижню ТМПП компонентів суміші за довідником [7]: ацетон  $t_{nC_3H_6O} = -20,0^\circ \text{C}$ , толуол  $t_{nC_7H_8} = 0,0^\circ \text{C}$ . Оскільки  $t_{nC_3H_6O} < t_{nC_7H_8}$ , за речовину А обираємо толуол.

2. Визначаємо коефіцієнт  $f$  за табл. 3.14, орієнтуючись на  $\varphi_A = 55\%$ :  $f = 27,6$ .

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  $^\circ\text{C}$ :

$$t_{\text{нб}} = 0,9(-14,5 - 14) = -25,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Висновок: насичена пара суміші рідин, що містить 45 % мас. ацетону та 55 % мас. толуолу, є безпечною за температур менше, ніж мінус 25,6  $^\circ\text{C}$ .

### § 3. Розрахунок температури спалаху індивідуальних рідин та їх сумішей

Виникнення горіння пари рідини від джерела запалювання може статися тільки за умови, що концентрація пари у повітрі досягне значення нижньої КМПП. Якщо рідина знаходиться у відкритій посудині, частина пари весь час буде дифундувати у навколишній простір, і для досягнення концентрації пари, рівної нижній КМПП, рідину необхідно нагріти до *температури спалаху*.

Значення температури спалаху використовують для класифікації рідин за ступенем їх пожежної небезпеки (горючі, легкозаймисті та особливо небезпечні рідини); для визначення категорії пожежної небезпеки приміщень і будівель, а також умов безпечного транспортування, зберігання, застосування горючих рідин. Згідно [30] вважається, що *безпечною температурою експлуатації* рідини, яка знаходиться на відкритому просторі, є температура, на 35  $^\circ\text{C}$  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, існує два способи визначення температури спалаху: у відкритому тиглі (в.т.) або у закритому тиглі (з.т.) [30]. 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

Найбільш простий, але найменш точний розрахунок температури спалаху індивідуальної рідини забезпечує *формула Еллея*:

$$t_{\text{сп}} = t_{\text{кпп}} - 18\sqrt{K_r}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3.51)$$

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.

Більш точно температуру спалаху в закритому і відкритому тиглі, а також температуру займання можна визначити з урахуванням *структури горючої речовини* з середнє квадратичною похибкою 10 °С для температури спалаху і 15 °С для температури займання за формулою:

$$t_{\text{сп}} = a_0 + a_1 t_{\text{кип}} + \sum a_j l_j, \quad (3.53)$$

де  $a_0, a_1$  – розмірний та безрозмірний коефіцієнти: для розрахунку температури спалаху  $a_0 = -73,14$  °С,  $a_1 = 0,659$ , для температури займання  $a_0 = -47,78$  °С,  $a_1 = 0,882$ ;  $t_{\text{кип}}$  – температура кипіння горючої рідини, °С;  $a_j$  – емпіричний коефіцієнт внеску  $j$ -ої структурної групи, див. табл. 3.15;  $l_j$  – число структурних груп  $j$ -го виду в молекулі.

Таблиця 3.15 – Константи  $a_j$  структурних груп для визначення температур займання та спалаху у закритому та відкритому тиглі

Вид структурної групи	$t_{\text{сп}}$ (з.т.)	$t_{\text{сп}}$ (в.т.)	$t_{\text{займ}}$
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 ≡ 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		

У межах одного гомологічного ряду значення температур спалаху рідин зростає зі збільшенням молярної маси. Для окремих *гомологічних рядів* отримано формулу, що враховує лінійну залежність температури спалаху від температури кипіння та забезпечує середньоквадратичну похибку 5 °С:

$$t_{\text{сп}} = a + b t_{\text{кип}}, \quad (3.54)$$

де  $a, b$  – константи гомологічних рядів горючих рідин, див. табл. 3.16.



Таблиця 3.16 – Емпіричні константи  $a$  і  $b$  для визначення температури спалаху в закритому тиглі рідин за їх гомологічним рядом

Клас речовин	Коефіцієнти		Клас речовин	Коефіцієнти	
	$a, ^\circ\text{C}$	$b$		$a, ^\circ\text{C}$	$b$
алкани	-73,22	0,693	бромалкани	-49,56	0,665
алкени	-60,0	0,64	карбонові кислоти	-43,57	0,708
алкілфеноли	-38,42	0,623	кетони	-52,69	0,643
алкіланліни	-21,94	0,553	метилалкани	-73,14	0,659
алкіламіни	-55,4	0,58	складні ефіри	-50,4	0,627
альдегіди	-74,76	0,813	спирти	-41,69	0,652
ароматичні вуглеводні	-67,83	0,665	хлоралкани	-55,70	0,631

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<sup>-1</sup>.

Таблиця 3.17 – Емпіричні константи формули (3.55) для сполук деяких класів

Клас сполук	$C_0, ^\circ\text{C}$	$C_1$	$C_2, \text{К моль}^{-1} \cdot \text{кДж}^{-1}$
з атомами С, Н, О, N	-45,5	0,83	-0,0082
з атомами С, Н, О, N, Cl	-39,6	0,86	-0,0114
з атомами F, Br	-57,4	0,79	-0,0147
елементоорганічні з атомами S, Si, P, Cl	-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 з середньоквадратичною похибкою  $13 ^\circ\text{C}$  є розрахунок температур спалаху і займання індивідуальної речовини за *формулою В.І. Блінова*:

$$T_{\text{сп}} = \frac{A_{\text{б}}}{D_0 \beta P_{\text{нн}}}, \text{К}, \quad (3.57)$$

де  $T_{\text{сп}}$  – температура спалаху або займання, К;  $D_0$  – коефіцієнт дифузії пари рідини,  $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $\beta$  – стехіометричний коефіцієнт кисню в рівнянні реакції горіння;  $P_{\text{нн}}$  – тиск насиченої пари рідини за температури спалаху або займання, кПа;  $A_{\text{б}}$  – константа методу: для розрахунку температури спалаху у закритому тиглі  $A_{\text{б}} = 280 \text{ К} \cdot \text{кПа} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ , у відкритому тиглі  $A_{\text{б}} = 427 \text{ К} \cdot \text{кПа} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ , для темпе-

ратури займання органічних речовин  $A_B = 453 \text{ К} \cdot \text{кПа} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ , для фосфорорганічних сполук  $A_B = 1333 \text{ К} \cdot \text{кПа} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ .

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;  $\Delta M_i$  – атомні складові, значення яких наведені у табл. 3.18.

Таблиця 3.18 – Значення атомних складових  $\Delta M$  для різних типів атомів

Тип атома	$\Delta M$	Тип атома	$\Delta M$
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 спалаху за формулою (3.57) не можна. Тому спочатку, за відомими значення  $A_B$ ,  $D_0$ ,  $\beta$  для даної речовини, із формули (3.57) визначають

величину  $T_{\text{сп}} P_{\text{нп}} = \frac{A_B}{D_0 \beta}$ , знаходять залежність тиску насиченої пари речовини

від температури (наприклад, у вигляді формули Ангуана (3.28)), а потім методом послідовних наближень знаходять  $T_{\text{сп}}$ . Для цього розраховують за різних температур добуток  $TP_{\text{нп}}$ , домагаючись мінімальної різниці між  $TP_{\text{нп}}$  і  $T_{\text{сп}} P_{\text{нп}}$ .

### **Методика розрахунку температури спалаху індивідуальної рідини та визначення класу її пожежної небезпеки**

1. Визначити температуру кипіння рідини за довідником [7] або за таблицею 15 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  $61 \text{ }^\circ\text{C}$  і  $28 \text{ }^\circ\text{C}$ .
4. Розрахувати безпечну температуру експлуатації рідини за формулою (3.50).

### **Приклад розв'язання задачі**

Розрахувати температуру спалаху етилпропіонату  $C_5H_{10}O_2$  за формулою Еллея. Визначити безпечну температуру експлуатації рідини, похибку розрахунку, якщо експериментальне значення температури спалаху дорівнює  $12 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## 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): оскільки  $n_{\text{C}} = 5$ ,  $n_{\text{H}} = 10$ ,  $n_{\text{O}} = 2$ , то:  $K_r = 4 \cdot 5 + 10 - 2 \cdot 2 = 26$ .

3. Розраховуємо температуру спалаху етилпропіонату за формулою (3.51):

$$t_{\text{сп}} = 99,1 - 18 \cdot \sqrt{26} = 7,3^{\circ}\text{C}.$$

Етилпропіонат відноситься до класу особливо небезпечних легкозайми-стих рідин, оскільки його температура спалаху менша за  $28^{\circ}\text{C}$ .

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 етилпропіонату становить менше, ніж мінус  $27,7^{\circ}\text{C}$ . Розраховане значення температури спалаху відрізняється від експериментально визначеного на  $4,7^{\circ}\text{C}$ .

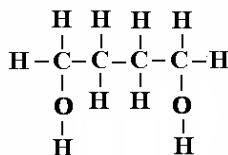
**Приклад розв'язання задачі**

Розрахувати температуру спалаху в закритому і відкритому тиглі, температуру займання бутандіюлу-1,4  $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_2$  з урахуванням структури горючої рідини (за формулою (3.53)). Визначити клас пожежної небезпеки рідини та похибку розрахунку, якщо експериментальне значення температури спалаху дорівнює  $121^{\circ}\text{C}$ , а температури займання –  $132^{\circ}\text{C}$ .

## Розв'язання

1. Визначаємо температуру кипіння бутандіюлу-1,4 за довідником [7]:  $t_{\text{кип}} = 228^{\circ}\text{C}$ .

2. Записуємо структурну формулу бутандіюлу-1,4:



3. Визначаємо тип, кількість та коефіцієнти структурних груп  $a_j$  за таблицею 3.15. Для спрощення розрахунків складаємо таблицю:

Вид структурної групи	Число груп, $t_j$	$a_j, ^{\circ}\text{C}$		
		$t_{\text{сп}} (\text{з.т.})$	$t_{\text{сп}} (\text{в.т.})$	$t_{\text{займ}}$
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 бутандіюлу-1,4 в закритому і відкритому тиглі і температуру займання за формулою (3.53):

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

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

$$t_{\text{займ}} = -47,78 + 0,882 \cdot 228 + 0,027 \cdot 3 + (-2,118)8 + (-0,111)2 + 8,216 \cdot 2 = 152,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Висновок: бутандіол-1,4 відноситься до горючих рідин, оскільки має температуру спалаху в закритому тиглі 132,6 °С, що більше, ніж 61 °С; розраховане значення відрізняється від дослідного на 11 °С, а значення температури займання – на 20 °С.

### *Приклад розв'язання задачі*

Розрахувати температуру спалаху в закритому тиглі, безпечну температуру експлуатації та визначити клас пожежної небезпеки бутиланіліну  $C_{10}H_{15}N$  за константами гомологічного ряду, формула (3.54). Визначити розбіжність між розрахованим та дослідним значенням температури спалаху 107 °С.

#### *Розв'язання*

1. Із довідника [7] визначаємо температуру кипіння бутиланіліну:  $t_{\text{кип}}=241^\circ\text{C}$ .
2. За табл. 3.16 визначаємо 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 для бутиланіліну за формулою (3.50):

$$t_{\text{безрід}} = 111,3 - 35 = 76,3 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Висновок: бутиланілін відноситься до горючих рідин, оскільки має температуру спалаху в закритому тиглі більшу за 61 °С. Розраховане значення температури спалаху 111,3 °С відрізняється від експериментального на 4,3 °С. Безпечна температура експлуатації бутиланіліну є меншою, ніж 76,3 °С.

### *Приклад розв'язання задачі*

Визначити температуру спалаху в закритому тиглі та клас пожежної небезпеки дихлорфенолу  $C_6H_4OCl_2$  за формулою (3.55).

#### *Розв'язання*

1. Із довідника [7] визначаємо температуру кипіння дихлорфенолу та його молярну теплоту згоряння:  $t_{\text{кип}} = 210 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $Q_H = 2920 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ .
2. За таблицею 3.17 визначаємо емпіричні константи класу сполук, що складаються із атомів С, Н, О, Cl:  $C_0 = -39,6$ ,  $C_1 = 0,86$ ,  $C_2 = -0,0114$ .

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 °С і є більшою, ніж 61 °С.

**Приклад розв'язання задачі**

Розрахувати температуру спалаху *втор*-бутилбензолу  $C_{10}H_{14}$  з урахуванням кореляційного зв'язку з нижньою ТМПП (за формулою (3.56)), порівняти її з експериментальними даними для закритого тигля – 52 °С.

*Розв'язання*

1. Із довідника [7] визначаємо нижню ТМПП:  $t_{н} = 47$  °С.
2. Розраховуємо температуру спалаху в закритому тиглі *втор*-бутилбензолу за формулою (3.56):

$$t_{сн} = 1,14(47 + 2) = 55,9 \text{ °С.}$$

Висновок: температура спалаху в закритому тиглі *втор*-бутилбензолу дорівнює 55,9 °С. Відхилення розрахунку від експерименту становить 3,9 °С.

**Методика розрахунку температур спалаху та займання за формулою Блінова В.І.**

1. Скласти рівняння реакції горіння речовини у повітрі, визначити стехіометричний коефіцієнт  $\beta$ .

2. Визначити за довідником [7] або таблицями додатків параметри горючої речовини: коефіцієнт дифузії пари  $D_o$  (або розрахувати за формулою (3.58)); константи Ангуана; нижню ТМПП (або розрахувати за формулою (3.38)).

3. Визначити константу методу  $A_B$ , розрахувати  $T_{сн}P_{нп} = \frac{A_B}{D_o\beta}$ .

4. Визначити температуру спалаху у першому наближенні  $T_1$ , орієнтуючись на значення нижньої температурної межі поширення полум'я.

5. Розрахувати тиск насиченої пари  $P_{нп1}$  для  $T_1$  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  $T_{сн}P_{нпсн}$ , температуру для розрахунку у другому наближенні  $T_2$  прийняти меншою за  $T_1$ ; якщо значення  $T_1P_{нп1}$  менше, ніж  $T_{сн}P_{нпсн}$ , то  $T_2$  прийняти більшою, ніж  $T_1$ .

8. Розрахувати тиск насиченої пари  $P_{нп2}$  для  $T_2$  за формулою (3.28).

9. Розрахувати добуток  $T_2P_{нп2}$ .

10. Розрахувати температуру спалаху рідини методом лінійної інтерполяції:

$$T_{сн} = T_1 + \frac{(T_2 - T_1)(T_{сн}P_{нп(сн)} - T_1P_{нп1})}{T_2P_{нп2} - T_1P_{нп1}}, \text{ К.} \quad (3.59)$$

### 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  $\beta$ :



2. Визначаємо параметри діетиленгліколю: константи рівняння Ангуана за таблицею 14 додатків:  $A = 7,2767$ ,  $B = 2727,3$ ,  $C_a = 273$ , нижню ТМПП за довідником [7]:  $t_n = 118$  °С, коефіцієнт дифузії за формулою (3.58):

$$D_0 = \frac{1}{\sqrt{\sum_i 4(25 + 3 \cdot 4) + 1 \cdot 10 + 3 \cdot 17}} = 0,0692 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}.$$

3. Визначаємо константу методу  $A_B$ , розраховуємо величину  $\frac{A_B}{D_0 \beta}$  для температури спалаху у закритому тиглі та для температури займання:

$$T_{\text{сп}} P_{\text{нпсп}} = \frac{A_B}{D_{0B}} = \frac{280}{0,0692 \cdot 5} = 809,3;$$

$$T_3 P_{\text{нп3}} = \frac{A_B}{D_{0B}} = \frac{453}{0,0692 \cdot 5} = 1309,2.$$

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  $P_{\text{нп1}}$  для  $T_1$  за формулою (3.28):

$$P_{\text{нп1}} = 10 \left( 7,2767 - \frac{2727,3}{118 + 273} \right) = 2,0 \text{ кПа}.$$

6. Розраховуємо добуток  $T_1 P_{\text{нп1}}$  й порівнюємо його з величиною  $\frac{A_B}{D_0 \beta}$ :

- для температури спалаху у закритому тиглі:  $391 \cdot 2,0 = 782 < 809,3$ ,

- 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  $T_2 > T_1$ :  $T_2 = 413 \text{ К}$  ( $t_2 = 413 - 273 = 140$  °).

8. Розраховуємо тиск насиченої пари  $P_{\text{нп2}}$  для  $T_2$  за формулою (3.28):

$$P_{\text{нп2}} = 10 \left( 7,2767 - \frac{2727,3}{140 + 273} \right) = 4,7 \text{ кПа}.$$

9. Розраховуємо добуток  $T_2 P_{\text{шт}2}$  і порівнюємо його з величиною  $\frac{A_B}{D_0 \beta}$ :

- для температури спалаху у закритому тиглі:  $413 \cdot 4,7 = 1941 > 809,3$ ,

- для температури займання:  $413 \cdot 4,7 = 1941 > 1309,2$ .

10. Розраховуємо температуру спалаху діетиленгліколю у закритому тиглі та температуру займання методом лінійної інтерполяції за формулою (3.59):

$$T_{\text{сп}} = 391 + \frac{(413 - 391)(809,3 - 782)}{(1941 - 782)} = 392 \text{ К};$$

$$T_3 = 391 + \frac{(413 - 391)(1309,2 - 782)}{(1941 - 782)} = 401 \text{ К}.$$

Висновок: температура спалаху діетиленгліколю в закритому тиглі дорівнює 392 К або 119 °С (за довідником [7]  $t_{\text{сп}} (\text{з.т.}) = 124$  °С); температура займання – 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 в закритому тиглі та теплота випаровування (або температура кипіння) компонентів суміші, розрахунок проводять методом послідовних наближень з середньоквадратичною похибкою 9 °С за формулою, яка обертається в тотожність за температури спалаху суміші  $T_{\text{сп сум}}$ :

$$\sum_i g \mu_i \cdot \exp \left[ \frac{\Delta H_{\text{вип } i}}{R} \left( \frac{1}{T_{\text{сп } i}} - \frac{1}{T_{\text{сп сум}}} \right) \right] = 1, \quad (3.60)$$

де  $g \mu_i$  – молярна частка  $i$ -го компонента в рідкій фазі;  $\Delta H_{\text{вип } i}$  – молярна теплота випаровування  $i$ -го компонента;  $R$  – універсальна газова стала;  $T_{\text{сп } i}$ ,  $T_{\text{сп сум}}$  – температура спалаху  $i$ -го компонента суміші рідин та суміші рідин, К.

Якщо відома залежність тиску насиченої пари від температури для компонентів суміші взаєморозчинних горючих рідин, розрахунок температури спалаху в закритому тиглі можна провести з середньоквадратичною похибкою 11 °С за формулою, яка обертається в тотожність за температури  $t_{\text{сп сум}}$ :

$$\sum_i g \mu_i \cdot \exp \left[ \frac{\Delta H_{\text{вип } i}}{R} \left( \frac{1}{T_{\text{сп } i}} - \frac{1}{T_{\text{сп сум}}} \right) \right] = 1, \quad (3.61)$$

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;  $t_{сп_i}$ ,  $t_{сп_{сум}}$  – температура спалаху в закритому тиглі відповідно  $i$ -го компонента та для суміші, °С.

Температуру спалаху бінарної суміші горючих рідин, які належать до одного гомологічного ряду (спиртів або складних ефірів нормальної будови), можна розрахувати з середньоквадратичною похибкою 2 °С за формулою:

$$t_{сп_{сум}} = t_{сп} + \Delta \left[ g + (m-1)X^m \right], \quad (3.62)$$

де  $t_{сп}$  – температура спалаху легкокиплячого компонента суміші, °С;  $\Delta$  – різниця температур спалаху гомологічних рядів компонентів суміші;  $g$  – масова частка висококиплячого компонента суміші в рідкій фазі;  $m$  – різниця між числом атомів карбону компонентів суміші;  $X$  – коефіцієнт нелінійності залежності температури спалаху від масової частки  $g$  (при  $g \geq 0,5$  значення  $X = 2g - 1$ , при  $g < 0,5$  значення  $X = 0$ ).

Оцінку температури спалаху в закритому тиглі бінарної суміші взаєморозчинних рідин, які не утворюють азеотропних складів, як й для нижньої ТМПП суміші, можна провести за *апроксимаційною формулою*:

$$t_{сп_{сум}} = \frac{\varphi_A \cdot t_{спA} + \varphi_B \cdot t_{спB} - f(t_{спA} - t_{спB})}{100}, \quad (3.63)$$

де  $A, B$  – компоненти горючої суміші, за  $A$  обирають рідину з більшою температурою спалаху;  $\varphi_A, \varphi_B$  – концентрації компонентів в рідкій фазі, мас. %;  $t_{спA}, t_{спB}$  – температура спалаху компонентів в закритому тиглі, °С;  $f$  – коефіцієнт нелінійності інтенсивності випаровування компонентів бінарної суміші рідин залежно від її складу, який визначають за таблицею 3.14.

### **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 компонентів 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 «1».

3.2. Провести розрахунок суми за формулою (3.60) або (3.61) у другому наближенні. Якщо отриманий результат  $< 1$ , у другому наближенні прийняти



$t_{\text{сн}2} = t_{\text{сн}1} + 5 \div 10 \text{ } ^\circ\text{C}$ ; якщо отриманий результат  $>1$ , у другому наближенні прийняти  $t_{\text{сн}2} = t_{\text{сн}1} - 5 \div 10 \text{ } ^\circ\text{C}$ ; якщо сума у лівій частині рівняння дорівнює «1», відповідну температуру прийняти за температуру спалаху суміші.

3.3. Якщо отримана у першому наближенні сума  $< 1$ , а у другому  $> 1$ , то  $t_{\text{сн}}$  суміші розрахувати методом лінійної інтерполяції, аналогічно до (3.48).

### Приклад розв'язання задачі

Розрахувати температуру спалаху суміші рідин, яка складається з 70 об. % н-гексанолу  $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$  та 30 об. % етанолу  $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ .

#### Розв'язання

1. Визначаємо параметри компонентів суміші за довідником [7]. Для зручності будуємо таблицю:

№	Компонент суміші	Вміст, об. %	Молярна маса	$t_{\text{кип}}$ , $^\circ\text{C}$	Густина $\rho$ , $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$	$t_{\text{сн}}$ (з.т.), $^\circ\text{C}$
1	гексилловий спирт $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$	70	102	155,7	815,3	60
2	етиловий спирт $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	30	46	78,5	785	13

2. Розраховуємо мольні частки компонентів суміші за формулою (3.33):

$$r_{\mu_{\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}}} = \frac{70 \cdot 815}{\frac{102}{70 \cdot 815} + \frac{30 \cdot 785}{102 + 46}} = 0,52; \quad r_{\mu_{\text{C}_2\text{H}_6\text{O}}} = \frac{30 \cdot 785}{\frac{102}{70 \cdot 815} + \frac{30 \cdot 785}{102 + 46}} = 0,48.$$

3. Розраховуємо температуру спалаху суміші  $t_{\text{сн сум}}$  методом послідовних наближень за формулою (3.60).

3.1. Оскільки теплоти випаровування компонентів суміші не відомі, розраховуємо співвідношення:

$$\frac{\Delta H_{\text{вип}_i}}{R} = -29186 + 19,6(t_{\text{кип}_i} + 273):$$

$$\frac{\Delta H_{\text{вип C}_6\text{H}_{14}\text{O}}}{R} = -29186 + 19,6(155,7 + 273) = 5483,92 \text{ К};$$

$$\frac{\Delta H_{\text{вип C}_2\text{H}_6\text{O}}}{R} = -29186 + 19,6(78,5 + 273) = 3970 \text{ К}.$$

3.2. Оскільки температура спалаху компонентів суміші становить  $16 \text{ } ^\circ\text{C}$  і  $60 \text{ } ^\circ\text{C}$  приймаємо для суміші у першому наближенні  $t_{\text{сн}_1} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$ , Розраховуємо суму в лівій частині рівняння (3.60) у першому наближенні:

$$0,48 \exp\left[3970,8 \left(\frac{1}{16 + 273} - \frac{1}{30 + 273}\right)\right] + 0,52 \exp\left[5483,9 \left(\frac{1}{60 + 273} - \frac{1}{30 + 273}\right)\right] = 0,902 + 0,103 = 1,005 > 1.$$

Оскільки у першому наближенні сума в лівій частині рівняння  $\epsilon > \langle 1 \rangle$ , приймаємо у другому наближенні  $t_{\text{сп}2} = 25^\circ\text{C}$  та повторюємо розрахунок:

$$0,48 \exp \left[ 3970,8 \left( \frac{1}{16+273} - \frac{1}{25+273} \right) \right] + 0,52 \exp \left[ 5483,9 \left( \frac{1}{60+273} - \frac{1}{25+273} \right) \right] = 0,727 + 0,075 = 0,802 < 1.$$

3.3. Розраховуємо  $t_{\text{сп}}$  суміші рідин за методом лінійної інтерполяції:

$$\Sigma = 1 \cdot \begin{cases} \Sigma_1 = 1,005, & t_{\text{сп}1} = 30^\circ\text{C} \\ \Sigma_2 = 0,802, & t_{\text{сп}2} = 25^\circ\text{C} \end{cases} \cdot t_{\text{сп} \text{ сум}} = ?;$$

$$t_{\text{н сум}} = 30 + \frac{(25-30)(1-1,005)}{(0,802-1,005)} = 29,9^\circ\text{C}.$$

Висновок: суміш, яка складається з 70 % об. гексанолу та 30 % об. етанолу, 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, 50 об. % дибутилового ефіру.

#### Розв'язання

1. Визначаємо параметри компонентів суміші за довідником [7]. Для зручності складаємо таблицю:

Компонент суміші	$t_{\text{сп}}(\text{з.т.}),$ $^\circ\text{C}$	Густина, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$	$\mu,$ $\text{кг}\cdot\text{кмоль}^{-1}$	Константи Ангуана		
				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):

$$r_{\mu_{\text{C}_3\text{H}_6\text{O}}} = \frac{20 \cdot 790,8}{58,1} + \frac{30 \cdot 809,8}{47} + \frac{50 \cdot 764,4}{130,2} = 0,252;$$

$$r_{\mu_{\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}}} = \frac{20 \cdot 790,8}{58,1} + \frac{30 \cdot 809,8}{47} + \frac{50 \cdot 764,4}{130,2} = 0,477;$$

$$r_{\mu_{\text{C}_8\text{H}_{16}\text{O}}} = \frac{20 \cdot 790,8}{58,1} + \frac{30 \cdot 809,8}{47} + \frac{50 \cdot 764,4}{130,2} = 0,271.$$

3. Розраховуємо  $t_{\text{сн, сум}}$  методом послідовного наближення за формулою (3.61).

3.1. В першому наближенні приймаємо  $t_{\text{сн}1} = 20^\circ\text{C}$ , оскільки значення температури спалаху компонентів суміші знаходиться в межах від «-9» до  $41^\circ\text{C}$ . Проводимо розрахунок за формулою (3.61):

$$0,252 \frac{1642 - (-9) - 273,1}{1642 - 20 - 273,1} 10^{\frac{1281,7(20 - (-9))}{(20 + 273,1)(-9 + 273,1)}} +$$

$$+ 0,477 \frac{1642 - 41 - 279,6}{1642 - 20 - 279,6} 10^{\frac{2664,7(20 - 41)}{(20 + 279,6)(41 + 279,6)}} +$$

$$+ 0,271 \frac{1642 - 25 - 230}{1642 - 20 - 230} 10^{\frac{1648,4(20 - 25)}{(20 + 230)(25 + 230)}} = 0,778 + 0,123 + 0,29 = 1,1 > 1.$$

3.2. Оскільки у першому наближенні сума у лівій частині рівняння  $\epsilon > 1$ , розрахунок у другому наближенні проводять за температури  $t_{\text{сн}2} = 20 - 5 = 15^\circ\text{C}$ :

$$0,252 \frac{1642 - (-9) - 273,1}{1642 - 15 - 273,1} 10^{\frac{1281,7(15 - (-9))}{(15 + 273,1)(-9 + 273,1)}} +$$

$$+ 0,477 \frac{1642 - 41 - 279,6}{1642 - 15 - 279,6} 10^{\frac{2664,7(15 - 41)}{(15 + 279,6)(41 + 279,6)}} +$$

$$+ 0,271 \frac{1642 - 25 - 230}{1642 - 15 - 230} 10^{\frac{1648,4(15 - 25)}{(15 + 230)(25 + 230)}} = 0,651 + 0,087 + 0,147 = 0,885 < 1.$$

3.3. Оскільки при розрахунку у першому наближенні сума у лівій частині рівняння  $> 1$ , а у другому наближенні  $< 1$ , можна провести розрахунок температури спалаху суміші за методом лінійної інтерполяції:

$$\Sigma = 1. \begin{cases} \cdot \Sigma_1 = 1,1, & t_{\text{сн}1} = 20^\circ\text{C} \cdot \\ \cdot \Sigma_2 = 0,885, & t_{\text{сн}2} = 15^\circ\text{C} \cdot \end{cases} \cdot t_{\text{сн, сум}} = ?$$

$$t_{\text{сн, сум}} = 20 + \frac{(15 - 20)(1 - 1,1)}{(0,885 - 1,1)} = 17,7^\circ\text{C}.$$

4. Розраховуємо безпечну температуру експлуатації суміші рідин за формулою (3.50):

$$t_{\text{безрід}} = 17,7 - 35 = -17,3^\circ\text{C}.$$

Висновок: розрахункове значення температури спалаху суміші з 20 % ацетону, 30 % бутанолу і 50 % дибутилового ефіру, дорівнює 17,7 °С. Температура експлуатації даної суміші рідин не повинна перевищувати «-17,3»°С.

**Методика розрахунку температури спалаху суміші рідин, які належать до одного гомологічного ряду**

1. Визначити за довідниками [7], [9] або розрахувати характеристики компонентів суміші: молярну масу, густину, температуру спалаху легкокиплячого компонента.

2. Визначити за довідником [7] температури спалаху гомологів гомологічного ряду, до якого належать горючі компоненти суміші рідин. Знайти середнє значення гомологічної різниці  $\Delta$  за температурою спалаху.

3. Розрахувати масову частку висококиплячого компонента, якщо склад суміші заданий в об'ємних відсотках, за формулою:  $g = \frac{\varphi_v \rho_v}{\varphi_v \rho_v + \varphi_l \rho_l}$ , де  $\varphi_v, \varphi_l,$

$\rho_v, \rho_l$  – відповідно об'ємна концентрація (%) та густина ( $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ) висококиплячого та легкокиплячого компонентів.

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	$t_{\text{кип}}, \text{°C}$	Густина $\rho, \text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$	$t_{\text{сп(з.т.)}}, \text{°C}$
1	гептиловий спирт	70	116	176	816,7	116
2	бутиловий спирт	30	74	117	805,5	74

2. Знаходимо гомологічну різницю спиртів за температурою спалаху.

Спирт	Формула	Температура спалаху, °С	$\Delta$
етиловий	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	13	–
пропіловий	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$	23	10
бутиловий	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	35	12
пентиловий	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$	48	13
гексиловий	$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$	60	12
гептиловий	$\text{C}_7\text{H}_{16}\text{O}$	74	14
октиловий	$\text{C}_8\text{H}_{18}\text{O}$	86	12
середнє значення			<b>12</b>

3. Розраховуємо масову частку висококиплячого компонента. Через те що температура кипіння гептанолу є більшою, ніж у бутанолу, у даній суміші він є висококиплячим компонентом:

$$g = \frac{70 \cdot 816,7}{70 \cdot 816,7 + 30 \cdot 805,5} = 0,70 \cdot$$

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 даної бінарної суміші рідин за формулою (3.62). Оскільки масова частка гептанолу  $g \geq 0,5$ ,  $X=2 \cdot 0,7 - 1 = 0,4$ .

$$t_{\text{сп, сум}} = 74 + 12 \cdot (0,7 + (3 - 1)0,4^3) = 84 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Висновок: розрахункове значення температури спалаху суміші, яка складається з 70 об. % гептанолу та 30 об. % бутанолу, дорівнює  $84 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

### **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  $C_3H_6O_2$  і 65 % мас. гексилформіату  $C_7H_{14}O_2$ . Визначити клас пожежної безпеки такої суміші.

#### *Розв'язання*

1. Визначаємо температуру спалаху в закритому тиглі компонентів суміші за довідником [7]:  $t_{\text{сп } C_3H_6O_2} = -20 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{сп } C_7H_{14}O_2} = 48 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Гексилформіат має більшу температуру спалаху, тому приймаємо його за компонент А.

2. Визначаємо коефіцієнт  $f$  за табл. 3.14: оскільки вміст компонента А дорівнює 65 % мас.,  $f = 30$ .

3. Розраховуємо температуру спалаху 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 містить 35 % мас. етилформіату  $C_3H_6O_2$  і 65 % мас. гексилформіату  $C_7H_{14}O_2$ , 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		t, °C	P <sub>заг</sub> , кПа	№	Горюча речовина		t, °C	P <sub>заг</sub> , кПа
	назва	формула				назва	формула		
1	метилацетат	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	20	96	11	декан	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	70	101
2	пропілциклогексан	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	25	98	12	діоксан	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	10	101,3
3	аміловий спирт	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	40	103	13	бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	90	98
4	бензиловий спирт	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	135	104	14	кумол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	85	99
5	етилбензол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	70	96	15	пропанол	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	50	100
6	ізопропенілбензол	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub>	150	98	16	толуол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	100	101
7	бутилформіат	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	30	99	17	m-ксилол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	80	101,3
8	пропаналь	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	-25	100	18	ундеканол	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O	45	102
9	оцтова кислота	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	15	102	19	n-крезол	C <sub>7</sub> H <sub>9</sub> O	60	97
10	діетилкетон	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	5	103	20	ацетон	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	-15	105

2. Для наведених у таблиці речовин розрахувати концентрацію насиченої пари за вказаних умов та визначити ступінь її пожежовибухонебезпеки.

№	Горюча речовина		t, °C	P <sub>заг</sub> , кПа	№	Горюча речовина		t, °C	P <sub>заг</sub> , кПа
	назва	формула				назва	формула		
1	акрилова кислота	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	20	96	14	октанова кислота	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	95	98,5
2	ацетонітрил	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> N	-15	104	15	октиловий спирт	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	105	98
3	бутанон	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	-5	105	16	пропіленгліколь	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	115	99
4	ізобутилацетат	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	10	96,5	17	пропілформіат	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	40	100
5	бутилфенол	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O	30	97	18	тетраметилпентан	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	100	101
6	валеріанова к-та	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	15	97	19	тридекан	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	145	102
7	гептан	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	25	97,5	20	етициклогексан	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	-25	103
8	діацетоновий спирт	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	35	104,5	21	метилацетат	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	20	96
9	дибутиловий ефір	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	45	103,5	22	дибутилкетон	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	20	104
10	ксилідин	C <sub>8</sub> H <sub>11</sub> N	55	102,5	23	метилпропілкетон	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	-5	105
11	метилпропіонат	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	65	101,5	24	циклогексан	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	15	98
12	мурашина кислота	CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	75	100,5	25	ксилол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	30	100
13	нонан	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	85	99,5	26	ацетон	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	-15	105

3\*. Розчин складається із 30 % (мольних) пентану C<sub>5</sub>H<sub>12</sub> і 70 % (мольних) гексану C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>. Розрахувати об'ємні й масові концентраційні межі поширення полум'я пари даної суміші за температур 0, 10, 20 °C. Вважати рідини взаєморозчинними.

4\*. 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 кг·м<sup>-3</sup>, бутилового спирту 810,4 кг·м<sup>-3</sup>.

Розділ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння

5. Для наведених сумішей горючих рідин розрахувати концентрацію насиченої пари і визначити ступінь її пожежовибухонебезпеки за вказаних умов.

№	Горюча речовина		Вміст компонентів	t <sub>0</sub> , °C	P <sub>заг</sub> , кПа
	назва	формула			
1	метилацетат	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	20 % мас.	20	96
	етилбензол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	80 % мас.		
2	бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	30 % об.	90	98
	кумол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	70 % об.		
3	пропанол	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	40 % мас.	50	100
	толуол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	60 % мас.		
4	бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	50 % об.	25	101
	толуол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	50 % об.		
5	ксилол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	10 % об.	80	101
	метилбутилкетон	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	20 % об.		
	аміловий спирт	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	70 % об.		
6	бензиловий спирт	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	20 % мас.	35	104
	ацетон	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	30 % мас.		
	етилбензол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	50 % мас.		
7	<i>n</i> -крезол	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O	30 % об.	60	97
	ізопропілбензол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	40 % об.		
	бутилформіат	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	30 % об.		
8	пропаналь	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	40 % об.	25	101
	декан	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	50 % об.		
	діоксан	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	10 % об.		
9	оцтова кислота	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	5 % мас.	15	102
	діетилкетон	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	10 % мас.		
	дибутилкетон	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	85 % мас.		
10	метилпропілкетон	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	15 % об.	5	105
	анілін	C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N	30 % об.		
	бутанон	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	55 % об.		

6. Для наведених у таблиці речовин розрахувати нижню та верхню температурні межі поширення полум'я і визначити ступінь пожежовибухонебезпеки рідини за вказаних умов. Розрахунок провести із використанням:

- а) рівняння Ангуана; б) методу лінійної інтерполяції;  
в) констант гомологічного ряду; г) за хімічною будовою.

№	Горюча речовина		t <sub>0</sub> , °C	P <sub>заг</sub> , кПа	№	Горюча речовина		t <sub>0</sub> , °C	P <sub>заг</sub> , кПа
	назва	формула				назва	формула		
1	метилацетат	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	20	96	11	етилбензол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	170	96
2	циклогексан	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	10	97	12	<i>n</i> -крезол	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O	60	97
3	бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	90	98	13	ізопропілбензол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	150	98
4	кумол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	85	99	14	бутилформіат	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	30	99
5	пропанол	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	50	100	15	пропаналь	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	25	100
6	толуол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	100	101	16	декан	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	70	101
7	ксилол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	80	101,3	17	діоксан	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	10	101,3
8	метилбутилкетон	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	45	102	18	оцтова кислота	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	15	102
9	аміловий спирт	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	40	103	19	діетилкетон	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	5	103
10	бензиловий спирт	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	35	104	20	дибутилкетон	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	20	104

Розділ 3. Параметри пожежної небезпеки речовин і матеріалів

7. Для речовин, представлених у таблиці, розрахувати безпечні робочі температури при використанні даної речовини у закритому обладнанні.

№ <sub>2</sub>	Речовина		№ <sub>2</sub>	Речовина		№ <sub>2</sub>	Речовина	
	назва	формула		назва	формула		назва	формула
1	стирол	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	8	октанол	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	15	метилацетат	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>
2	метилформіат	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	9	метанол	CH <sub>4</sub> O	16	метилацетат	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>
3	гексадекан	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	10	дітиламін	C <sub>4</sub> H <sub>11</sub> N	17	метилгексан	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>
4	бутаналь	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	11	ксилідин	C <sub>8</sub> H <sub>11</sub> N	18	пропаналь	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O
5	метиламінол	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	12	етанол	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	19	пропіламін	C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> N
6	пірол	C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> N	13	бутанон	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	20	пропілформіат	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>
7	декан	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	14	бутанол	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	21	дибутилкетон	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O

8. Для сумішей горючих рідин, представлених у таблиці, визначити безпечні робочі температури для використання їх у закритому обладнанні з використанням констант Антуана.

№ <sub>2</sub>	Горюча речовина	P <sub>заг</sub> , кПа	№ <sub>2</sub>	Горюча речовина	P <sub>заг</sub> , 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. Для наведених сумішей горючих та негорючих рідин, розрахувати нижню температурну межу поширення полум'я та визначити, за яких температур концентрація насиченої пари буде безпечною.

№ <sub>2</sub>	Склад суміші			№ <sub>2</sub>	Склад суміші		
	компонент	формула	мас. %		компонент	формула	мас. %
1	бутанол	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	60	6	етилбензол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	70
	метанол	CH <sub>4</sub> O	35		толуол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	27
	вода	H <sub>2</sub> O	5		тетрахлорметан	CCl <sub>4</sub>	3
2	етанол	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	60	7	гексан	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	60
	пропанол	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	32		гептан	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	32
	вода	H <sub>2</sub> O	8		тетрахлорметан	CCl <sub>4</sub>	8
3	діоксан	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	32	8	декан	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	45
	етанол	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	62		гексан	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	50
	вода	H <sub>2</sub> O	6		тетрахлорметан	CCl <sub>4</sub>	5
4	дітиловий ефір	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	25	9	ацетон	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	70
	дітилкетон	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	73		вода	H <sub>2</sub> O	30
	вода	H <sub>2</sub> O	2		-	-	-
5	бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	45	10	дітиловий ефір	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	97
	толуол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	53		тетрахлорметан	CCl <sub>4</sub>	3
	тетрахлорметан	CCl <sub>4</sub>	2		-	-	-



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, °С	Р <sub>заг</sub> , кПа
	назва	вміст		
1	метилацетат C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	20 % мас.	20	96
	циклогексан C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	80 % мас.		
2	бутанова кислота C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	25 % об.	30	97
	октаналь C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	75 % об.		
3	бензол C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	30 % мас.	90	98
	кумол C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	70 % мас.		
4	пропанол C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	40 % об.	50	100
	толуол C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	60 % об.		
5	метилбутилкетон C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	25 % об.	80	101
	аміловий спирт C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	75 % об.		
6	бензиловий спирт C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	20 % мас.	35	104
	ацетон C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	30 % мас.		
	етилбензол C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	50 % мас.		
7	<i>n</i> -метилфенол C <sub>7</sub> H <sub>9</sub> O	30 % об.	60	97
	ізопропілбензол C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	40 % об.		
	бутилформіат C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	30 % об.		
8	пропаналь C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	40 % об.	25	101
	декан C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	50 % об.		
	діоксан C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	10 % об.		
9	оцтова кислота C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	5 % мас.	15	102
	діетилкетон C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	10 % мас.		
	дібутилкетон C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	85 % мас.		
10	метилпропілкетон C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	15 % об.	5	105
	анілін C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N	30 % об.		
	бутанон C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	55 % об.		

11. 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 <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	11	метилформіат	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>
2	етіловий спирт	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	12	бутилфенол	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O
3	декан	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	13	толуол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>
4	бутанол	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	14	бутилпропіонат	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>
5	мезитилен	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	15	етилацетат	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>
6	гептан	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	16	етилбензол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>
7	метиламінол	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	17	етиленгліколь	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>
8	кумол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	18	пірол	C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> N
9	піридин	C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N	19	діоксан	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>
10	дибутиловий ефір	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	20	тетрагідрофуран	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O

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 ТМПП; г) констант гомологічного ряду.

12.2) температуру спалаху у відкритому тиглі та температуру займання.

№	Речовина	№	Речовина
1	ацетон C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	21	стирол C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>
2	анілін C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N	22	тетрагідрофуран C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O
3	бензол C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	23	тетраметилбензол C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>
4	бутанол C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	24	тетраметилгептан C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
5	бутилформіат C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	25	тетраметилпентан C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>
6	декан C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	26	пропілбутират C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>
7	діетилкетон C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	27	тридекан C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>
8	валеролактон C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	28	триметилбензол C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
9	гексадекан C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	29	триметилгексан C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>
10	крезол C <sub>7</sub> H <sub>9</sub> O	30	оцтова кислота C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>
11	етанол C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	31	октанова кислота C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>
12	метанол CH <sub>4</sub> O	32	оцтовий ангідрид C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>
13	метилбутират C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	33	ундеканол C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O
14	нонан C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	34	циклогексанол C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O
15	октанол C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	35	циклогексан C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
16	пентаналь C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	36	пропіоновий ангідрид C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>
17	пропаналь C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	37	етилацетат C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O
18	пропанол C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	38	етилбензол C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>
19	пропілбензол C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	39	етилбутират C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>
20	толуол C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	40	етилтолуол C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>

13. 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 <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Br	6	хлорпропанол C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> OCl
2	бутанонітрил C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> N	7	хлорбутан C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> Cl
3	діетиламін C <sub>4</sub> H <sub>11</sub> N	8	хлорпропан C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> Cl
4	хлоретилацетат C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> O <sub>2</sub> Cl	9	піридилетанол C <sub>7</sub> H <sub>9</sub> ON
5	вінілтрихлорсилан C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub> Si	10	диметоксихлорбензол C <sub>8</sub> H <sub>9</sub> O <sub>2</sub> Cl

14. Для наведених сумішей горючих рідин, розрахувати температуру спалаху та визначити клас пожежної небезпеки з використанням
- молярної теплоти випаровування компонентів суміші (за формулою (3.60));
  - констант Ангуана (за формулою (3.61)).

№	Склад горючої суміші			№	Склад горючої суміші		
	компонент	формула	вміст		компонент	формула	вміст
1	ацетон	$C_3H_6O$	25 % об.	6	бензол	$C_6H_6$	40 % об.
	циклогексан	$C_6H_{12}$	75 % об.		кумол	$C_9H_{12}$	60 % об.
2	метилетилкетон	$C_4H_8O$	30 % мас.	7	пропанол	$C_3H_8O$	20 % мас.
	октаналь	$C_8H_{16}O$	70 % мас.		толуол	$C_7H_8$	80 % мас.
3	диметиловий ефір	$C_2H_4O$	35 % мас.	8	ксилол	$C_8H_{10}$	45 % об.
	метилетилловий ефір	$C_3H_8O$	65 % мас.		бутанол	$C_4H_8O$	55 % об.
4	гептанол	$C_7H_{16}O$	40 % об.	9	етилбензол	$C_8H_{10}$	40 % об.
	етилбутиловий ефір	$C_6H_{14}O$	60 % об.		ізопропілбензол	$C_9H_{12}$	50 % об.
	пропаналь	$C_3H_6O$	15 % об.		толуол	$C_7H_8$	10 % об.
5	дигексиловий ефір	$C_{12}H_{26}O$	30 % об.	10	ацетон	$C_3H_6O$	5 % мас.
	диетилкетон	$C_3H_6O$	55 % об.		дибутиловий ефір	$C_8H_{18}O$	10 % мас.
					метанол	$CH_4O$	85 % мас.

15. Для наведених бінарних сумішей горючих рідин, розрахувати нижню температурну межу та температуру спалаху в закритому тиглі за апроксимаційною формулою (3.49, 3.63) та визначити клас пожежної небезпеки.

№	Склад суміші			№	Склад суміші		
	компонент	формула	мас. %		компонент	формула	мас. %
1	бутанол	$C_4H_{10}O$	70	6	етилформіат	$C_3H_6O_2$	75
	циклогексан	$C_6H_{12}$	30		октанол	$C_8H_{18}O$	25
2	бутанова кислота	$C_4H_8O_2$	75	7	амілацетат	$C_7H_{14}O_2$	20
	етанол	$C_2H_6O$	25		метилформіат	$C_2H_4O_2$	80
3	бензол	$C_6H_6$	40	8	ацетон	$C_3H_6O$	15
	кумол	$C_9H_{12}$	60		діоксан	$C_4H_8O_2$	85
4	дітиловий ефір	$C_4H_{16}O$	45	9	анілін	$C_6H_7N$	35
	толуол	$C_7H_8$	55		бензол	$C_6H_6$	65
5	ксилол	$C_8H_{10}$	10	10	метиламінол	$C_6H_{14}O$	5
	метанол	$CH_4O$	90		пропаналь	$C_3H_6O$	95

- 16\*. 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<sup>-3</sup>.

17. 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

18\*. Цистерна ємністю  $10 \text{ м}^3$  знаходиться у приміщенні об'ємом  $150 \text{ м}^3$ . 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 –  $101,3 \text{ кПа}$ .

19\*. Розрахувати об'єм вибухової суміші, що утворилась із  $200 \text{ л}$  насиченої пари бензину за температури  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  і тиску  $101,3 \text{ кПа}$ . Тиск насиченої пари бензину за даної температури дорівнює  $31,7 \text{ кПа}$ . Нижня концентраційна межа поширення полум'я бензину за даної температури дорівнює  $60 \text{ г}\cdot\text{м}^{-3}$ .

**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 [35].

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], [16].

Явища, що є постійними й обов'язковими для кожної пожежі, називають **загальними** (первинними). Тільки ліквідація горіння може призвести до припинення загальних явищ. 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** (вторинних) явищ, які носять випадковий характер і властиві тільки конкретній пожежі. Сукупність первинних і вторинних явищ називають **обставинами 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;
- **вторинні 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 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**: вільного розвитку  $\tau_{віль}$ ; локалізації  $\tau_{лок}$ ; ліквідації  $\tau_{лік}$ . Тоді зміну площі пожежі залежно від часу розвитку схематично представлено на рис. 4.1.

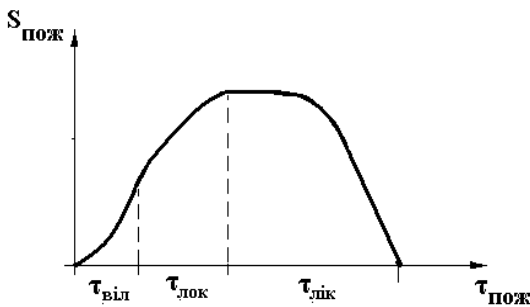


Рис. 4.1 – Зміна площі пожежі залежно від періоду розвитку пожежі

**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 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.

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 великі групи: пожежі на відкритому просторі; пожежі в огороженні. У кожній групі можна виділити підгрупи.

*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 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* характеризуються тим, що газообмін обмежений будівельними конструкціями. При цьому відбувається накопичення тепла та диму, теплообмін здійснюється конвекцією, теплопровідністю та випромінюванням. Пожежі в огороженні можна поділити на пожежі, що регулюються вентиляцією, та ті, що регулюються пожежною навантагою.

*Пожежі, що регулюються вентиляцією (ПРВ)* 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 згорання пожежної навантаги.

*Пожежі, що регулюються пожежною навантагою (ПРН)* 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** поділяють на такі типи: *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 підклас 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

A1 і A2. До пожеж підкласу A1 відносять горіння тліючих матеріалів (всі целюлозовмісні матеріали), тобто матеріали, для яких характерний як гомогенний, так і гетерогенний режим горіння. Пожежі матеріалів, що горять тільки у гомогенному режимі (без тління), відносять до підкласу A2.

До пожеж класу B 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 B1 (нафта і нафтопродукти, каучук, поліетилен). При горінні водорозчинних горючих рідин пожежі відносять до підкласу B2.

Пожежі горючих газів відносять до класу C.

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 «легких металів» – другої, третьої і четвертої груп 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 підкласу E.

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:

$$P_{\text{пож}} = \frac{\sum m_i Q'_i}{S_{\text{підл}}}, \text{кДж} \cdot \text{м}^{-2},$$

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, кДж·кг<sup>-1</sup>;  $S_{\text{підл}}$  – площа підлоги приміщення або ділянки, м<sup>2</sup>.

Іноді пожежну навантагу вимірюють як масу всіх горючих та важкогорючих матеріалів, що припадає на одиницю площі підлоги приміщення, кг·м<sup>-2</sup>. 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:

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

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,  $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$ .

**Інтенсивність задимлення**  $I_z$  – зміна об’єму диму за одиницю часу в одиниці об’єму приміщення:

$$I_z = \frac{V_{\text{дугв}} - V_{\text{двид}}}{V_{\text{прим}}}, \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1},$$

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,  $\text{м}^3$ .

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

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

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

Правильна оцінка тепла, що виділяється під час пожежі, необхідна для визначення температури пожежі, коефіцієнтів теплообміну, температури на поверхні будівельних конструкцій тощо. Теплоту пожежі іноді приймають за основу для оцінки ступеня пожежної небезпеки 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 є більшою за площу пожежі [15]; це враховують *коефіцієнтом поверхні горіння*  $K_{\text{п}}$ , який показує, у скільки разів площа поверхні горіння  $S_{\text{гор}}$  є більшою, ніж площа пожежі  $S_{\text{пож}}$ :

$$K_{\text{п}} = \frac{S_{\text{гор}}}{S_{\text{пож}}}.$$

Коефіцієнт поверхні залежить від способу укладання матеріалу та його подрібненості.

Пожежі класу А є видом пожеж, що поширюються. Параметром, що описує 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 [17] або у табл. 16 додатків.

Залежно від часу розвитку та введення сил та засобів лінійна швидкість поширення пожежі класу А змінюється таким чином:

- до 10-ї хв. вільного розвитку лінійну швидкість поширення пожежі приймають рівною половині середньостатистичного значення  $v_l^0$ :

$$v_l(\tau_{\text{віль.роз}} \leq 10 \text{ хв.}) = 0,5v_l^0, \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1};$$

- з 10-ї хв. вільного розвитку до введення сил і засобів для 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 сил і засобів до моменту 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 досягнення ефекту локалізації пожежі лінійна швидкість поширення пожежі дорівнює нулю:  $v_l(\tau_{\text{роз}} \geq \tau_{\text{лок}}) = 0$ .

Для визначення площі пожежі у будь-який момент, необхідно розрахувати *радіус розвитку пожежі* та врахувати місце виникнення горіння, наявність огорожуючих конструкцій, вітру, визначити форму зони горіння. Радіус розвитку пожежі пов'язаний з часом її розвитку формулами:

$$\tau_{\text{віль.роз}} \leq 10 \text{ хв.}: \quad R_{\text{пож}} = 0,5v_l^0\tau_{\text{віль}}; \quad (4.1)$$

$$\tau_{\text{віль.роз}} > 10 \text{ хв.}: \quad R_{\text{пож}} = 5v_l^0 + v_l^0(\tau_{\text{віль}} - 10); \quad (4.2)$$

$$\tau_{\text{віль.роз}} \leq \tau_{\text{роз}} < \tau_{\text{лок}}: \quad R_{\text{пож}} = 5v_l^0 + v_l^0(\tau_{\text{віль}} - 10) + 0,5v_l^0(\tau_{\text{роз}} - \tau_{\text{віль}}). \quad (4.3)$$

Під час розрахунку площі пожежі 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], [16].

За наявності вітру характер поширення горіння змінюється. **Швидкість поширення пожежі**, залежно від швидкості вітру  $v_{\text{віт}}$  та виду твердого горючого матеріалу, 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,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $v_l^0$  – середньостатистична лінійна швидкість поширення пожежі у безвітряну погоду,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ , див. довідник [17] або табл. 16 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  $\varepsilon$  – коефіцієнт чорноти полум'я, обирають в межах 0,14÷0,45;  $\rho$  – густина горючого шару підстилки,  $1,7 \div 5 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $W$  – 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 менша 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 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 (сектор)*. 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,  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ .

Тоді для форми зони горіння у вигляді сектору 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 високим 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: нагріті продукти горіння здіймаються вгору з великою швидкістю, а в її 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. Виникає відстань небезпечної розльоту іскор; вітер збільшує цю відстань.

*Дальність розльоту іскор*, здатних спричинити загорання і 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 частинок, що випадують; приймається  $9 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ .

- для фрезерного торфу за вітру більше за  $5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ : 
$$L_{\text{розл}} = \left( \frac{v_{\text{віт}} - 2}{1,3} \right)^2, \text{ м}; \quad (4.15)$$

- для кускового торфу вологістю до 25 %: 
$$L_{\text{розл}} = \left( \frac{v_{\text{віт}} - 4,5}{1,5} \right)^2, \text{ м}. \quad (4.16)$$

**Методика розрахунку параметрів пожежі класу А на відкритому просторі**

1. Визначити за довідником [17] або табл. 16 додатків значення середньостатистичної лінійної швидкості поширення пожежі по горючому матеріалу  $v^{\circ}_l$ .
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 табл. 16 додатків значення лінійної швидкості поширення пожежі на складі кускового торфу:  $v^{\circ}_l = (1,3\text{--}1,7)10^{-2} \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ . Обираємо середнє значення  $v^{\circ}_l = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}\cdot\text{с}^{-1} = 0,9 \text{ м}\cdot\text{хв}^{-1}$ .
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 (сектор). 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):

$$S_{\text{пож}} = 0,5 \cdot 0,87 \cdot 18^2 = 141 \text{ м}^2;$$

$$\Phi_{\text{пож}} = 0,87 \cdot 18 = 15,7 \text{ м.}$$

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  $141 \text{ м}^2$ , а фронт пожежі –  $15,7 \text{ м}$ .

**Приклад розв'язання задачі**

Розрахувати можливу відстань розльоту іскор при горінні складу пиломатеріалів (дошок) вологістю 25 % за швидкості вітру  $8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , якщо пожежа вільно розвивається протягом 20 хвилин.

*Розв'язання*

1. Визначаємо за табл. 16 додатків значення лінійної швидкості поширення пожежі на складі пиломатеріалів вологістю 20–30 %:  $v_{\ell} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ .

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):  $v_{\ell} = 0,04 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} = 2,4 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}$ ;

$$R_{\text{пож}} = 0,5 \cdot 2,4 \cdot 10 + 2,4(20 - 10) = 36 \text{ м}.$$

4. Визначаємо форму зони горіння. Оскільки швидкість вітру є більшою за  $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , то форма зони горіння – кутова (сектор). 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  $499 \text{ м}^2$ , а можлива відстань розльоту іскор досягає  $80,5 \text{ м}$ .

**Приклад розв'язання задачі**

Розрахувати відстань, яку пройде лісова пожежа у напрямку фронту, флангів і тилу, а також площу та фронт пожежі, що поширюється 2 год., за умови, що вологість лісової підстилки 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):

$$v_{l\text{фр}} = \frac{260 \cdot 0,25}{3,4(16 + 20)} \left( 1 + 2,7 \cdot 4^{2/4+1} \right) = 12 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1};$$

– 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.

Будуємо схему розвитку пожежі:

$$\alpha = 2 \cdot \arctg \frac{R_{\text{фл}}}{R_{\text{тил}}} = 2 \cdot \arctg \frac{506}{161} = 2,53 \text{ рад.}$$

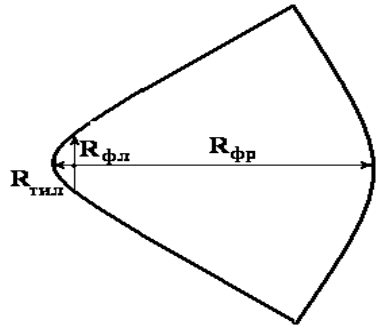
3.2. Розраховуємо площу пожежі за формулою (4.11):

$$S_{\text{пож}} = 0,5\alpha R^2 = 0,5 \cdot 2,53 \cdot (1,38 + 0,16)^2 = 3 \text{ км}^2.$$

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 км<sup>2</sup>, фронт пожежі 3,9 км.



### Приклад розв'язання задачі

Розрахувати площу і фронт степової пожежі, яка поширюється 9 хв. з лінійною швидкістю  $v_{\text{л}}^0 = 0,3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  за швидкості вітру  $2,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ .

#### Розв'язання

1. Розраховуємо відстань, яку пройде фронт пожежі за 9 хвилин вільного розвитку, за формулою (4.1):  $v_{\text{л}}^0 = 0,3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} = 1,8 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}$ ;

$$R_{\text{пож}} = 0,5 \cdot 1,8 \cdot 9 = 8,1 \text{ м.}$$

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 даний момент її розвитку за формулами (4.8) і (4.9):

$$S_{\text{пож}} = 3,14 \cdot 8,1^2 = 206 \text{ м}^2;$$

$$\Phi_{\text{пож}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 8,1 = 51 \text{ м.}$$

Висновок: за 9 хвилин вільного розвитку площа степової пожежі за даних умов становитиме 206 м<sup>2</sup>, 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 [17]–[21]. Але якщо приміщення має великий вільний об'єм (більше 1000 м<sup>3</sup>) 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 КМПП. 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:

1. Пожежна навантага у приміщенні розподілена рівномірно, отже, пожежа поширюється у всіх напрямках рівномірно.

2. Залежно від місця виникнення горіння 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. За умови досягнення протипожежних конструкцій поширення фронту пожежі припиняється на час їх вогнестійкості, а після прогорання - продовжуються у вільному напрямку із середньостатистичною швидкістю  $v^0_c$ .

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 **за температурою** визначається досягненням критичної температури 70 °С або **за концентрацією кисню** – зниженням концентрації кисню в повітрі приміщення до критичного значення 14 %. 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, залежно від щільності упаковки, стану поверхні горючої речовини, умов, які обмежують втрати тепла, часу розвитку пожежі [21].

За відсутності газообміну з навколишнім середовищем та не змінної площі пожежі (горінням охоплена вся поверхня горючої речовини), час до настання критичного стану за концентрацією кисню визначає формула:

$$\tau_{кр}^{0_2} = \frac{0,33V_{прим}}{\eta S_{пож} v_m v_{пов}}, \text{ хв.}, \quad (4.17)$$

де  $V_{прим}$  – вільний об'єм приміщення, м<sup>3</sup>;  $S_{пож}$  – площа пожежі, м<sup>2</sup>;  $\eta$  – коефіцієнт повноти згоряння;  $v_m$  – масова швидкість вигорання, кг·м<sup>-2</sup>·хв<sup>-1</sup>;  $v_{пов}$  – питомий об'єм повітря, необхідний для повного згоряння 1 кг горючої речовини, м<sup>3</sup>·кг<sup>-1</sup>; значення  $\eta$ ,  $v_m$ ,  $v_{пов}$  наведено у табл. 11 додатків.

Розрахунок часу розвитку пожежі до досягнення критичної температури у приміщенні за сталої площі пожежі можна провести за формулою:

$$\tau_{кр}^t = \frac{V_{прим} c_p'' (t_{кр} - t_0)}{(1 - k) \eta Q'_н S_{пож} v_m}, \text{ хв.}, \quad (4.18)$$

де  $Q'_н$  – нижча масова теплота згоряння горючого матеріалу, кДж·кг<sup>-1</sup>;  $c_p''$  – середня питома об'ємна теплосміність газового середовища у приміщенні, кДж·м<sup>-3</sup>·К<sup>-1</sup>;  $t_0$ ,  $t_{кр}$  – початкова та критична температури газового середовища у приміщенні;  $k$  – коефіцієнт тепловтрат як частка тепла пожежі, що витрачається на нагрівання конструкцій та предметів:  $k = \frac{\alpha_{ю} S_{огор} (t_{сер} - t_0)}{Q'_н v_m S_{пож}}$ , де  $\alpha_{ю}$

– коефіцієнт теплообміну;  $S_{огор}$  – площа огороджуючих конструкцій;  $t_{сер}$  – 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  $c_p'' = 1,12$  кДж·м<sup>-3</sup>·К<sup>-1</sup>,  $t_{кр} = 70$  °С,  $t_0 = 20$  °С,  $k = 0,21$ , то після підстановки числових значень у формулу (4.18) можна записати:

$$\tau_{кр}^t = 71 \frac{V_{прим}}{\eta Q'_н S_{пож} v_m}, \text{ хв.} \quad (4.19)$$

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, перші 10 хв. пожежа класу А поширюється з меншою швидкістю, ніж середньостатистична ( $v_t = 0,5v_t^0$ ).

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 – у центрі підлоги):

$$\tau_{кр}^t = 4,5 \sqrt[3]{\frac{V_{прим}}{\eta Q'_H v_m (v_l^0)^2}}, \text{ хв.}, \quad (4.20)$$

$$\tau_{кр}^{O_2} = 0,75 \sqrt[3]{\frac{V_{прим}}{\eta v_m v_{пов} (v_l^0)^2}}, \text{ хв.}, \quad (4.21)$$

де  $v_t^0$  – середньостатистична лінійна швидкість поширення пожежі,  $\text{м} \cdot \text{хв}^{-1}$ ;

- форма розвитку пожежі – *півколо* (осередок пожежі – 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 – в 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], [19], [20]. 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 залежить від об'єму приміщення, часу розвитку пожежі, площі пожежі, пожежної навантаги, виду горючої речовини (теплоти згорання, масової швидкості вигорання речовини, швидкості поширення горіння), інтенсивності газообміну, тепловтрат на нагрівання конструкцій та повітря, що надходить у приміщення. Середньооб'ємну температуру пожежі на будь-який момент розвитку визначають як добуток адиабатичної температури горіння:  $T_{пожт} = 0,66 T_{ад} Bo^{0,17}$ , де  $Bo$  – критерій Больцмана, який дорівнює відношенню тепла, яке виділяється під час горіння, до тепла, що передається до огорожуючих поверхонь шляхом променистого теплообміну:

$$B_o = \frac{\eta S_{\text{пож}} v_m c_p'' v_{\text{пг}}}{60 \sigma_o \varepsilon_{\text{пр}} S_{\text{огор}} T_{\text{ад}}^3}, \text{ де } \sigma_o - \text{ стала Больцмана, } 5,76 \cdot 10^{-11} \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}; S_{\text{огор}}$$

– площа огороджуючих конструкцій, м<sup>2</sup>;  $v_{\text{пг}}$  – питомий дійсний об’єм продуктів горіння, що утворюється при згорянні 1 кг горючої речовини за даних умов (з урахуванням коефіцієнта надлишку повітря), м<sup>3</sup>·кг<sup>-1</sup>;  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведений ступінь чорноти продуктів горіння;  $c_p''$  – середня питома об’ємна теплоємність газового середовища, кДж·м<sup>-3</sup>·К<sup>-1</sup>.

Адіабатичну температуру горіння  $T_{\text{ад}}$  можна визначити за формулою:

$$T_{\text{ад}} = \frac{\eta Q'_n}{c_p'' v_{\text{пг}}} + 298, \text{ К.} \quad (4.26)$$

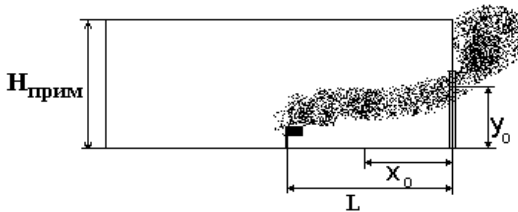
З урахуванням значення критерію Больцмана середньооб’ємну температуру газового середовища у приміщенні під час пожежі в будь-який момент її розвитку можна визначити за формулою:

$$T_{\text{пож}} = 18,1 T_{\text{ад}} \left( \frac{\eta S_{\text{пож}} v_m c_p'' v_{\text{пг}}}{\varepsilon_{\text{пр}} S_{\text{огор}} T_{\text{ад}}^3} \right)^{0,17}, \text{ К.} \quad (4.27)$$

Розрахувати значення температури в заданих точках приміщення на заданий час вільного розвитку пожежі можна за формулою:

$$T_{x,y,\tau} = T_{\text{пож}} \left( 0,8 + 0,2 \frac{y}{y_o} \right) \left( 1,33 - \frac{x}{2x + x_o} \right), \text{ К,} \quad (4.28)$$

де  $x_o = 0,5L$ ;  $L$  – відстань від осередку пожежі до місця виходу продуктів горіння з приміщення;  $y_o = 0,5H_{\text{прим}}$ ;  $H_{\text{прим}}$  – висота приміщення;  $x, y$  – координати відносно центру підлоги точки, для якої визначають температуру газового середовища, (у цю точку після розрахунку площі пожежі «переносять» осередок пожежі незалежно від місця її виникнення) 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 газообміну залежить від конфігурації приміщення, наявності отворів та їх взаємного розташування.

Якщо газообмін здійснюється через декілька отворів, *розташованих на різних рівнях*, їх можна умовно розділити на 2 групи: припливні, через які надходить свіже повітря у приміщення, і витяжні, через які розігріті продукти згорання виходять назовні. Схему прямування газових потоків «через 2 отвори» при цьому може мати вигляд, зображений на рис. 4.3.

Якщо прийняти, що маса повітря, яка припливає до приміщення, дорівнює масі газового середовища, що виштовхується назовні, то фактичну витрату руху газів у приміщенні можна розрахувати за формулою:

$$g_{\text{факт}} = K_{\text{отв}} S_{\text{прип}} S_{\text{вит}} \sqrt{\frac{2gH\rho_{\text{пов}}\rho_{\text{пт}}(\rho_{\text{пов}} - \rho_{\text{пт}})}{\rho_{\text{пов}}S_{\text{прип}}^2 + \rho_{\text{пт}}S_{\text{вит}}^2}}, \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (4.29)$$

де  $g_{\text{факт}}$  – фактична витрата газообміну у приміщенні;  $K_{\text{отв}}$  – коефіцієнт втрат кінетичної енергії газового потоку при проходженні через отвір внаслідок тертя та завихрення (залежить від форми отвору і товщини стінок, для віконних і дверних отворів  $K_{\text{отв}} = 0,6 \div 0,65$ );  $S_{\text{прип}}$ ,  $S_{\text{вит}}$  – площі припливного та витяжного отворів;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $H$  – відстань між центрами припливного і витяжного отворів;  $\rho_{\text{пов}}$  – густина повітря назовні приміщення;  $\rho_{\text{пт}}$  – густина газового середовища (продуктів горіння) у приміщенні.

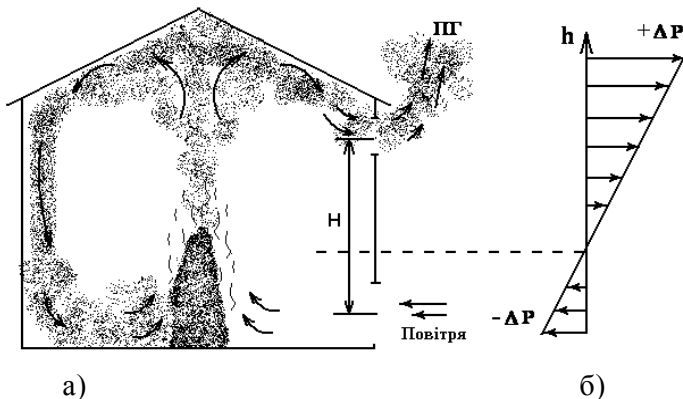


Рис. 4.3 – Схема газообміну на пожежі «через 2 отвори»

- а) рух газових потоків під час пожежі;
- б) епіюра тиску газового середовища за висотою приміщення.

Якщо врахувати, що густина газового середовища пов'язана з його температурою, то масову витрату газів через отвори можна знайти за формулою:

$$g_{\text{факт}} = K_{\text{отв}} S_{\text{прип}} S_{\text{вит}} \rho_{\text{пов}} \sqrt{\frac{2gH \left(1 - \frac{T_{\text{пов}}}{T_{\text{пож}}}\right) \frac{T_{\text{пов}}}{T_{\text{пож}}}}{S_{\text{прип}}^2 + S_{\text{вит}}^2 \frac{T_{\text{пов}}}{T_{\text{пож}}}}}, \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (4.30)$$

де  $T_{\text{пов}}, T_{\text{пож}}$  – температура повітря, що надходить у приміщення, та 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 тисків* (див. рис. 4.3). **Нейтральна зона** – це уявна площина у приміщенні, рівнобіжна підлозі, в усіх 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 цих отворів (приблизно – посередині їх висоти). Під час газообміну через 1 групу отворів площина кожного з них працює як на приплив повітря, так й на вихід диму. Вище нейтральної зони продукти горіння витискаються назовні, в нижній частині отвору підсмоктується 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  $S_{\text{отв}}, h_{\text{отв}}$  – площа та висота отвору, через який відбувається газообмін.

Умови газообміну у приміщенні під час пожежі характеризує **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 згоряння 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*:

$$h_{\text{нз}} = \frac{H}{\left(\frac{S_{\text{прип}}}{S_{\text{вит}}}\right)^2 \frac{T_{\text{пож}}}{T_{\text{пов}}} + 1} + 0,5h_{\text{прип}}, \text{ м}, \quad (4.36)$$

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  $\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря;  $\tau$  – час вільного розвитку пожежі, хв.;  $q$  – густина теплового потоку, що сприймають огорожуючі конструкції; може бути розрахована за формулою:

$$q = \frac{\eta v_m Q'_n S_{\text{пож}}}{S_{\text{огор}}}, \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}. \quad (4.37)$$

Статистична обробка експериментальних даних дозволила представити залежності температури пожежі в огороженні від теплоти пожежі, надлишку повітря та часу розвитку пожежі у вигляді номограм (додатки 18, 19), за допомогою яких можна визначити температурний режим пожежі.

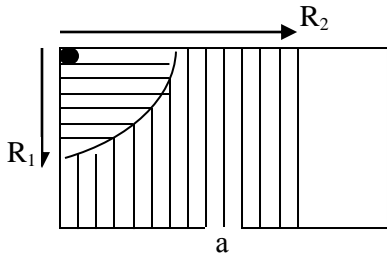
На підставі отриманих даних про температуру як у цілому у приміщенні, так і в окремих його точках, можна робити практичні висновки щодо поведіння будівельних конструкцій в умовах пожежі та умов знаходження людей у даному приміщенні під час евакуації та гасіння пожежі.

**Методика розрахунку площі, периметра та фронту пожежі у приміщенні**

1. Визначити лінійну швидкість поширення пожежі  $v^o$  залежно від типу приміщення із таблиці 16 додатків або за довідником [17].

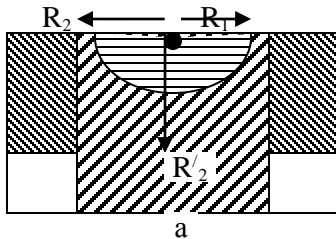
2. Розрахувати радіус розвитку пожежі залежно від часу розвитку за однією із формул (4.1)–(4.3).

3. Визначити форму зони горіння з урахуванням радіуса розвитку пожежі, місця виникнення пожежі і розмірів приміщення; побудувати схему розвитку пожежі у приміщенні. Схеми вибору форми та розрахунку параметрів пожежі класу А в огороженні в залежності від місця виникнення пожежі:



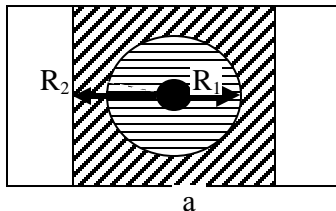
Кутова пожежа:

1) $R_1 < b < a$ $S_{1 \text{ пож}} = \pi R_1^2/4$ $\Phi_1 = \pi R_1/2$ $\Pi_1 = 2R_1 + \Phi_1$	2) $b < R_2 < a$ $S_{2 \text{ пож}} = R_2 b$ $\Phi_2 = b$ $\Pi_2 = 2R_2 + 2b$	3) $b < a < R_3$ $S_{3 \text{ пож}} = a b$ $\Phi_3 = 0$ $\Pi_3 = 2a + 2b$
--	--	--



Біля середини стіни:

1) $R_1 < b < a/2$ $S_{1 \text{ пож}} = \pi R_1^2/2$ $\Phi_1 = \pi R_1$ $\Pi_1 = 2R_1 + \Phi_1$	2) $b < R_2 < a/2$ $S_{2 \text{ пож}} = 2R_2 b$ $\Phi_2 = 2b$ $\Pi_2 = 4R_2 + 2b$	2') $a/2 < R_2 < b$ $S_{3 \text{ пож}} = R_2 a$ $\Phi_3 = a$ $\Pi_3 = 2a + 2R_2$
3) $b < a/2 < R_3$ все приміщення охоплено пожежою, як і момент 3 кутової пожежі.		



В центрі приміщення:

1) $R_1 < b/2 < a/2$ $S_{1 \text{ пож}} = \pi R_1^2$ $\Phi_1 = 2\pi R_1$ $\Pi_1 = \Phi_1$	2) $b/2 < R_2 < a/2$ $S_{2 \text{ пож}} = 2R_2 b$ $\Phi_2 = 2b$ $\Pi_2 = 4R_2 + 2b$	3) $b/2 < a/2 < R_3$ $S_{3 \text{ пож}} = a b$ $\Phi_3 = 0$ $\Pi_3 = 2a + 2b$
--	--	--

Визначення геометричної форми розвитку пожежі:

- якщо осередок пожежі – в куті приміщення і радіус розвитку пожежі є меншим за ширину приміщення, то форма зони горіння – чверть кола;
- якщо осередок пожежі – біля стіни і радіус розвитку пожежі є меншим за відстань до ближчої стіни, то форма зони горіння – півколо;
- якщо осередок пожежі – 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 найближчих проти-пожежних конструкцій (дверей), необхідно врахувати час їх вогнестійкості. Після прогорання цих конструкцій пожежа поширюється у наступне приміщення до наступного обмеження конструкціями із швидкістю  $v^{\circ}_t$ .

4. Залежно від форми зони горіння розрахувати площу, периметр і 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. Розрахунок прогорання дверей базується на порівнянні часу розвитку  $\tau_{віль}$  пожежі з часом проходження пожежі до дверей  $\tau_{дв}$  в купі з часом вогнестійкості дверей (для звичайних дверей 10 хв). Якщо  $\tau_{віль} > \tau_{дв} + 10$ , то прогорання відбудеться, виникають додаткові площа, периметр, фронт пожежі у другому приміщенні, їх розраховують по схемі розвитку від середини стіни (від дверей) з повною швидкістю поширення пожежі.

Відстань до дверей  $L$  визначають безпосередньо за габаритами приміщення якщо осередок пожежі знаходиться або на одній стіні з дверима, або супротив дверей. В інших випадках  $L$  розраховують за теоремою Піфагора.

Якщо  $L$  менше відстані, яку пожежа проходить за 10 хв. розвитку то  $R_{10} = 0,5 v^{\circ}_t \cdot 10$ , а час досягнення полум'ям дверей  $\tau_{дв} = L / (0,5 v^{\circ}_t)$ .

Якщо  $L > R_{10}$ , то час досягнення полум'ям дверей  $\tau_{дв} = 10 + (L - R_{10}) / v^{\circ}_t$ .

### Приклад розв'язання задачі

Розрахувати площу, периметр і фронт пожежі на 5-ту хв. вільного розвитку, якщо пожежа виникла у приміщенні текстильного виробництва розмірами 10x12 м. Осередок пожежі знаходиться біля середини ширшої стіни.

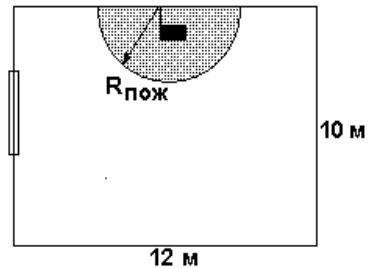
#### Розв'язання

1. Визначаємо за табл. 16 додатків середньостатистичну лінійну швидкість поширення пожежі для приміщення текстильного виробництва:  $v^{\circ}_t = (0,8 \div 1,7) \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Приймаємо, що швидкість поширення пожежі дорівнює середньому значенню  $v^{\circ}_t = 1,25 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} = 0,75 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}$ .

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. Будуємо 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:

$$S_{\text{пож}(5)} = \frac{3,14 \cdot 1,9^2}{2} = 5,7 \text{ м}^2;$$

$$P_{\text{пож}(5)} = \pi R_{\text{пож}(5)} + 2R_{\text{пож}(5)} = 3,14 \cdot 1,9 + 2 \cdot 1,9 = 9,8 \text{ м};$$

$$\Phi_{\text{пож}(5)} = \pi R_{\text{пож}(5)} = 3,14 \cdot 1,9 = 6,0 \text{ м}.$$

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 –  $6 \text{ м}$ .

### Приклад розв'язання задачі

Розрахувати площу і фронт пожежі в адміністративному приміщенні на 25-ту хвилину вільного розвитку. Визначити ймовірність прогорання дверей під час пожежі, якщо межа вогнестійкості дверей становить 10 хв. Схему приміщення наведено на рисунку ( $L$  – відстань до дверей).

#### Розв'язання

1. За довідником [17] лінійна швидкість поширення пожежі в адміністративному приміщенні  $v_{\text{л}} = 1,2 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}$ .
2. Розраховуємо радіус розвитку пожежі на заданий час ( $\tau_{\text{вил}} > 10 \text{ хв.}$ ) за формулою (4.2):

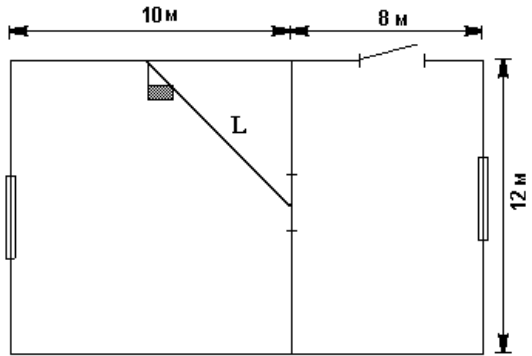
$$R_{\text{пож}(25)} = 10 \cdot 1,2 \cdot 0,5 + 1,2 \cdot (25 - 10) = 24 \text{ м}.$$

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. Також, радіус розвитку пожежі виявився більшим за відстань до дверей, тому необхідно врахувати час їх вогнестійкості. З'ясуємо, чи прогорять двері: визначаємо відстань від осередку пожежі до дверей:

$$L = \sqrt{5^2 + 6^2} = 7,8 \text{ м}.$$

Визначаємо час проходження фронтом пожежі цієї відстані. Перші 10 хв. фронт йде з половиною швидкістю шлях  $0,5 \cdot 1,2 \cdot 10 = 6 \text{ м}$ ; залишок відстані « $7,8 - 6$ » м фронт пожежі поширюється із середньостатистичною швидкістю; тоді час, за який фронт пожежі досягне дверей, дорівнює:

$$\tau_{\text{дв}} = 10 + \frac{7,8 - 6}{1,2} = 11,5 \text{ хв.}$$



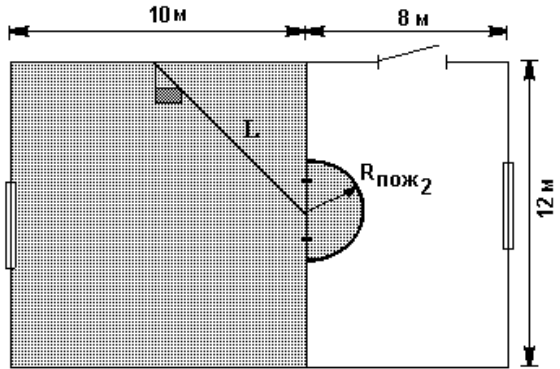
Фронт пожежі діє на двері  $25 - 11,5 = 13,5$  хв. Оскільки вогнестійкість дверей 10 хв., то пожежа поширюється у суміжне приміщення 3,5 хв.

Розраховуємо радіус розвитку пожежі у суміжному 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. Будемо схему розвитку пожежі.

4. Визначасмо загальну площу і фронт пожежі. Форма пожежі у першому приміщенні – прямокутник з 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 цих площин:

$$S_{\text{пож}} = S_{\text{пож}(1)} + S_{\text{пож}(2)} = 120 + 27,7 = 147,7 \text{ м}^2.$$

Фронтом пожежі, тобто частиною периметра, де відбувається поширення горіння, є довжина дуги у другому приміщенні:

$$\Phi_{\text{пож}} = \pi R_{\text{пож}(3,5)} = 3,14 \cdot 4,2 = 13,2 \text{ м.}$$

Висновок: протягом 25 хв. вільного розвитку пожежі в адміністративному приміщенні заданого розміру двері прогорять, пожежа пошириться у суміжне приміщення. Загальна площа пожежі становитиме  $147,7 \text{ м}^2$ , фронт пожежі у суміжному приміщенні дорівнюватиме 13,2 м.

### *Методика розрахунку критичного часу розвитку пожежі в огороженні*

1. За довідником [17] або табл.16 додатків для даної горючої речовини визначити її параметри: питомий теоретичний об'єм повітря  $v_{\text{пов}}^0$ ; коефіцієнт повноти згорання  $\eta$ ; масову швидкість вигорання  $v_m$ ; масову теплоту згорання  $Q'_n$ ; лінійну швидкість поширення пожежі  $v_{\text{л}}^0$ .

2. Розрахувати об'єм приміщення  $V_{\text{прим}}$ .

3. Визначити форму розвитку пожежі залежно від місця виникнення.

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  $t_0 = 20$  °С.

*Розв'язання*

1. За довідником [17] для книгосховища лінійна швидкість поширення пожежі:  $v_{\text{л}}^{\circ} = 0,5\text{--}1,0$  м·хв<sup>-1</sup> (приймаємо  $0,75$  м·хв<sup>-1</sup>); для книг на стелажах – масова швидкість вигорання і теплота згоряння:  $v_{\text{м}} = 0,438$  кг·м<sup>-2</sup>·хв<sup>-1</sup>,  $Q'_{\text{н}} = 13400$  кДж·кг<sup>-1</sup>; для паперу – питомий теоретичний об'єм повітря і коефіцієнт повноти згоряння:  $v^{\circ}_{\text{пов}} = 3,95$  м<sup>3</sup>·кг<sup>-1</sup>,  $\eta = 0,97$ .

2. Розраховуємо об'єм приміщення:  $V_{\text{прим}} = 10 \cdot 6 \cdot 3,5 = 210$  м<sup>3</sup>.

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 на складі 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 адиабатичної температури горіння**

1. За довідником [17] або табл.16 додатків для горючої речовини визначити: питомі теоретичні об'єми повітря  $v^{\circ}_{\text{пов}}$  та продуктів горіння  $v^{\circ}_{\text{пр}}$ ; коефіцієнт повноти згоряння  $\eta$ ; масову швидкість вигорання  $v_{\text{м}}$ ; масову теплоту згоряння  $Q'_{\text{н}}$ ; середньостатистичну лінійну швидкість поширення пожежі  $v^{\circ}_{\text{л}}$ .

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 і розрахувати площу пожежі на даний момент часу.

4. Визначити  $T_{\text{пож}}$  у першому наближенні, враховуючи співвідношення площі пожежі до площі підлоги даного приміщення  $S_{\text{пож}}/S_{\text{підл}}$  (така оцінка передбачає максимальну температуру пожежі в огороженні 1225 °С)

$$T_{\text{пож}} = 298 + 1200 \frac{S_{\text{пож}}}{S_{\text{підл}}}, \text{ К.} \quad (4.38)$$

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  $\mu_r$  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 згорання 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 згорання з урахуванням надлишку повітря за формулою:  $v_{\text{пр}} = v_{\text{пр}}^0 + (\alpha - 1)v_{\text{нов}}^0, \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$ .

11. Розрахувати приведену масову швидкість вигорання речовини залежно від часу розвитку пожежі:

$$v_m(\tau) = v_m \left( 0,3 + 0,7 \sqrt{\frac{\tau_{\text{пож}}}{30}} \right), \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1}. \quad (4.41)$$

12. Розрахувати середньооб'ємну теплоємність газового середовища у приміщенні під час пожежі:

$$c_p'' = 1,25 + \left( 0,12 + \frac{0,1}{0,25 + \alpha} \right) \frac{T_{\text{пож}}}{1000}, \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}. \quad (4.42)$$

13. Розрахувати значення приведеного ступеня чорноти системи «плум'я – поверхня конструкцій»:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1 + 0,0022(T_{\text{пож}} - 273)}. \quad (4.43)$$

14. Визначити повну поверхню теплообміну – огорожуючих конструкцій як суму поверхонь стін, підлоги і стелі, що отримують тепловий потік. Якщо пожежа відбувається в декількох суміжних приміщеннях, то визначають суму площ огорожуючих конструкцій усіх приміщень:

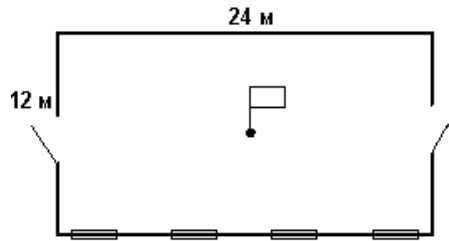
$$S_{\text{огор}} = \sum_i S_{\text{огор}_i} = \sum_i 2(l_i b_i + l_i h_i + b_i h_i), \text{ м}^2, \quad (4.44)$$

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 попередніми значеннями температури у першому наближенні. За умови розбіжності більше 5 % необхідно отриману температуру пожежі прийняти за температуру у другому наближенні й повторити розрахунок.
18. Визначити координати  $x$  і  $y$  у точки приміщення, в якій визначають температуру газового середовища. Початок відліку – від центра підлоги за 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 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 (центр підлоги приміщення). Температура навколишнього середовища дорівнює 25 °С.



### Розв'язання

1. За довідником [17] для книгосховища знаходимо лінійну швидкість поширення пожежі:  $v_{\text{л}} = 0,5 \div 1,0 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}$  (приймаємо рівною  $0,8 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}$ ); для книг на стелажах визначаємо масову швидкість вигорання та теплоту згорання:  $v_{\text{м}} = 0,438 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1}$ ,  $Q'_{\text{н}} = 13400 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ ; для паперу визначаємо питомий теоретичний об'єм повітря, продуктів горіння та коефіцієнт повноти згорання:  $v^{\circ}_{\text{пов}} = 3,95 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$ ,  $v^{\circ}_{\text{пр}} = 4,64 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$ ;  $\eta = 0,97$ .

2. Розраховуємо радіус пожежі на 9 хв. вільного розвитку за формулою (4.1):

$$R_{\text{пож}(9)} = 0,5 \cdot 0,8 \cdot 9 = 3,6 \text{ м}.$$

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):

$$S_{\text{відл}} = 24 \cdot 12 = 288 \text{ м}^2;$$

$$T_{\text{пож}} = 298 + 1200 \frac{40,7}{288} = 467 \text{ К.}$$

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 °С, 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):

$$\rho_{\text{нов}} = \frac{29}{22,4 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 25)} = 1,18 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$\rho_{\text{пт}} = \frac{29}{22,4 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 194)} = 0,76 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

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:

$$v_{\text{пт}} = 4,64 + (3,7 - 1) \cdot 3,95 = 15,3 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

11. Розраховуємо приведену масову швидкість вигорання речовини за формулою (4.41):

$$v_{\text{м}} = 0,438 \cdot \left( 0,3 + 0,7 \sqrt{\frac{9}{30}} \right) = 0,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1}.$$

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 приведеного ступеня чорноти полум'я за формулою (4.43):

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1 + 0,0022(467 - 273)} = 0,7.$$

14. Визначаємо поверхню теплообміну за площею поверхонь конструкцій, що огорожують 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):

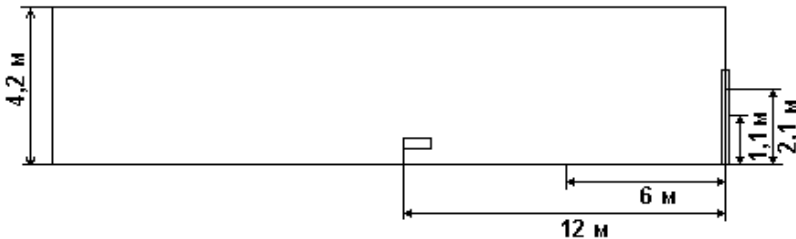
$$T_{\text{ад}} = \frac{0,97 \cdot 13400}{1,3 \cdot 15,3} + 298 = 951 \text{ К}.$$

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 відрізняється від прийнятого у першому наближенні ( $T_{\text{пож}} = 467 \text{ К}$ ) менше, 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  $x_0 = 24 - 0,25 = 6 \text{ м}$ ;  $y_0 = 4,2 - 0,5 = 2,1 \text{ м}$ .

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):

$$T_{x,y} = 444 \cdot \left( 0,8 + 0,2 \frac{1,1}{2,1} \right) \cdot \left( 1,33 - \frac{12}{2 \cdot 12 + 6} \right) = 374 \text{ К}.$$

Висновок: на 9-ту хвилину вільного розвитку пожежі в заданому приміщенні середньооб'ємна температура газового середовища становить  $171^\circ\text{C}$ , температура на рівні середини дверного отвору  $101^\circ\text{C}$ .

**Методика розрахунку температури пожежі та висоти нейтральної зони з використанням номограм**

1. За довідником [17] або табл. 16 додатків для даної горючої речовини визначити такі параметри: питомий теоретичний об'єм повітря  $v_{\text{пов}}^0$ ; питомий теоретичний об'єм продуктів згоряння  $v_{\text{пр}}^0$ ; коефіцієнт повноти згоряння  $\eta$ ; масову швидкість вигорання  $v_{\text{м}}$ ; масову теплоту згоряння  $Q'_{\text{н}}$ ; середньостатистичну лінійну швидкість поширення пожежі  $v_{\text{л}}^0$ .

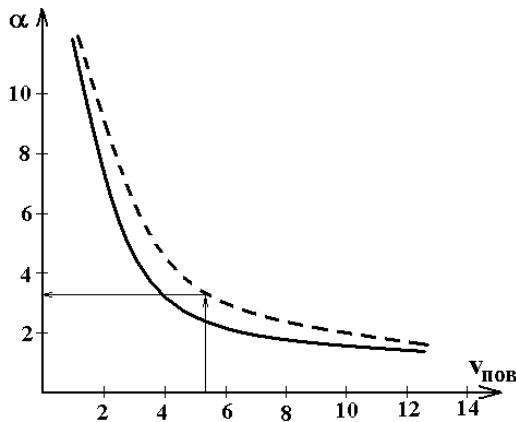
2. Розрахувати радіус розвитку пожежі на заданий момент часу за однією з формул (4.1)–(4.3).

3. Залежно від місця виникнення пожежі і розмірів приміщення визначити форму зони горіння і розрахувати площу пожежі на даний 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  $\alpha$  за номограмою 18 додатків (схема визначення показано на рис. 4.4).



**Рис. 4.4 – Схема визначення коефіцієнта надлишку повітря із використанням номограми за додатком 18**

6.1. Розрахувати співвідношення площі пожежі до площі підлоги  $S_{\text{пож}}/S_{\text{підл}}$  і, виходячи з отриманого значення, визначити вид кривої, а за співвідношенням площі припливного отвору до площі пожежі  $S_{\text{прип}}/S_{\text{пож}}$ , – номер кривої.

6.2. На осі абсцис номограми (додаток 18) відкласти значення питомого теоретичного об'єму повітря  $v_{\text{пов}}^0$ , від якого провести вертикаль до перетину



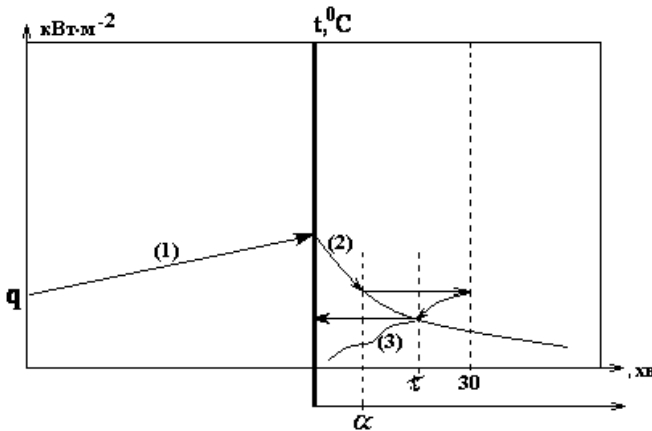
із визначеною кривою.

6.3. Відповідне перетину значення на осі ординат показує значення коефіцієнта надлишку повітря.

7. Розрахувати густину теплового потоку, що потрапляє на одиницю площі поверхні огорожуючих конструкцій, за формулою (4.37).

8. Визначити середньооб'ємну температуру пожежі на заданий момент часу за допомогою номограми (додаток 19), 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 (рис. 4.5).



**Рис. 4.5 – Схема визначення середньооб'ємної температури пожежі в огороженні за номограмою**

8.2. Рівновіддалено від найближчої кривої (2)  $t = f(\alpha)$  опускаємося до перетину з перпендикуляром, проведеним з точки, що відповідає коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$ , 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 користування номограмою показано на рис. 4.5.

9. Розрахувати висоту нейтральної зони залежно від умов газообміну за формулами (4.35) або (4.36).

**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 табл. 16 додатків визначасмо лінійну швидкість поширення пожежі  $v^0_{\ell} = 1,2 \div 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  (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  $Q'_{\text{н}} = 24300 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ , масову швидкість вигорання  $v_{\text{м}} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , 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 хв. розвитку за формулою (4.2):

$$R_{\text{пож}} = 5 \cdot 0,8 + 0,8(15 - 10) = 8 \text{ м.}$$

3. Визначасмо 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. Визначасмо 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.

$$S_{\text{прип}} = 2,5 \cdot 2 = 5 \text{ м}^2; \quad S_{\text{выг}} = 1,5 \cdot 1,5 \cdot 3 = 6,75 \text{ м}^2.$$

6. Розраховуємо співвідношення  $S_{\text{пож}}/S_{\text{підл}}$ ,  $S_{\text{прип}}/S_{\text{пож}}$ , визначасмо тип і номер кривої за номограмою 5 додатків:

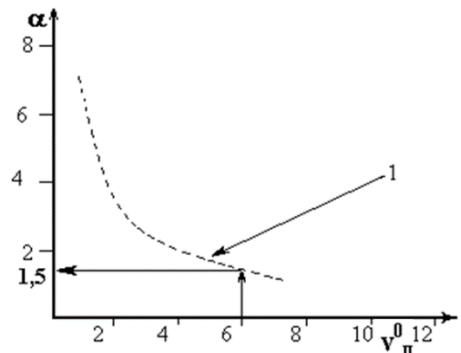
$$\frac{S_{\text{пож}}}{S_{\text{підл}}} = \frac{201}{864} = 0,23 < 0,25,$$

отже тип кривої – пунктирна;

$$\frac{S_{\text{прип}}}{S_{\text{пож}}} = \frac{5}{201} = 0,03 < 0,04,$$

отже номер кривої – № 1.

7. Визначасмо коефіцієнт надлишку повітря за допомогою номограми 18 додатків:  $\alpha = 1,5$ .



8. Розраховуємо густину 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 15 додатків:

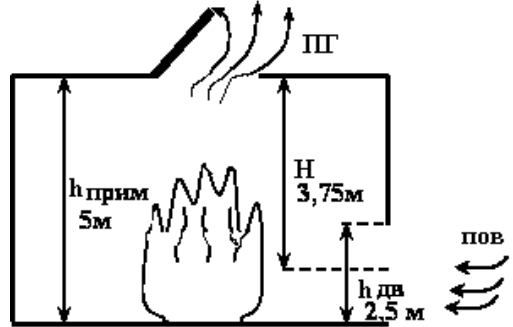
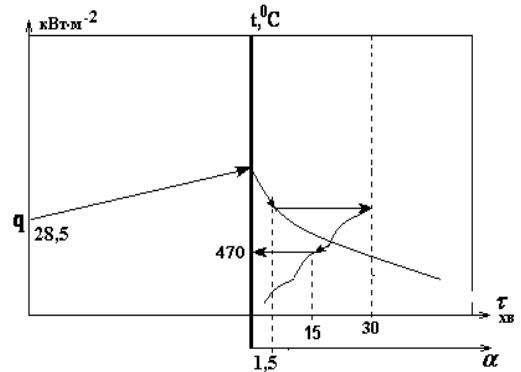
$$t_{\text{пож}} = 470 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

10. Розраховуємо висоту нейтральної зони за формулою (4.36), оскільки газообмін здійснюється через 2 групи отворів, які знаходяться на різних рівнях. Будуємо схему газообміну у приміщенні.

Відстань між центрами припливного та витяжного отворів за висотою:

$$H = 5 - \frac{2,5}{2} = 3,75 \text{ м}.$$

$$h_{\text{нз}} = \frac{3,75}{\left(\frac{5}{6,75}\right)^2 \frac{743}{293} + 1} + 0,5 \cdot 2,5 = 2,8 \text{ м}.$$



Висновок: під час пожежі пінополіуретану у складському приміщенні на 15-ту хвилину вільного розвитку за даних умов газообміну температура пожежі становитиме 470 °С, а висота нейтральної зони – 2,8 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 (швидкість витання розжарених частинок –  $9 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ).

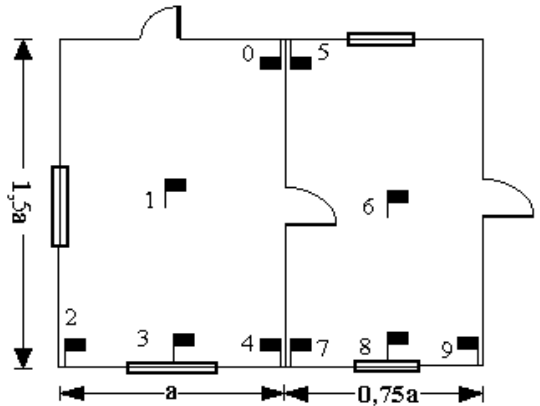
№	Матеріал, що горить	Час горіння, хв.	Швидкість вітру, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	№	Матеріал, що горить	Час горіння, хв.	Швидкість вітру, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
1	пилотеріали	70	6	12	торф кусковий вологістю до 25 %	45	11
2	вологістю < 16 %	35	8	13		40	8
3	пилотеріали	45	10	14		25	15
4	вологістю 16–18%	60	15	15		35	10
5	пилотеріали	30	5	16		15	12
6	вологістю 18–20%	55	9	17	торф фрезерний	60	6
7	пилотеріали	15	7	18		50	11
8	вологістю 20–30%	40	10	19		40	8
9	пилотеріали вологістю > 30 %	50	12	20		30	15
10		45	11	21		10	10
11		40	8	22		35	5

2. Розрахувати площу та фронт лісової пожежі за наведених умов.

№	Швидкість вітру на висоті 2 м, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	Час розвитку пожежі, год.	Параметри горючого шару підстилки		Коефіцієнт чорноти полум'я
			Густина, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$	Вологість, %	
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

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.

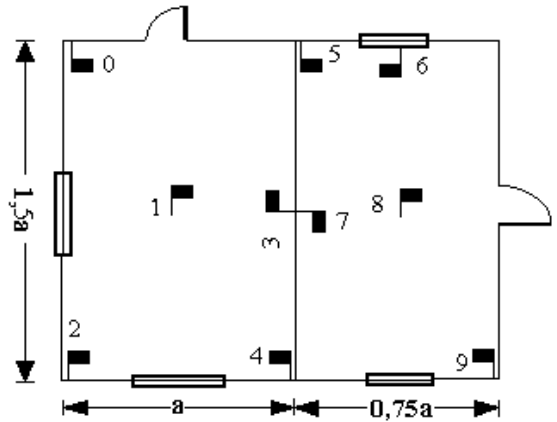


№	Вид приміщення	Місце початку пожежі	Параметр «а», м.	Вогнестійкість дверей, хв.	Час розвитку, хв.	
					$\tau_1$	$\tau_2$
1	адміністративна	8	4	10	5	15
2	споруда	6	6	12	8	22
3	музей	5	5	15	7	20
4		9	7	12	9	28
5	друкарня	7	6	20	9	25
6		1	10	10	6	32
7	бібліотека	4	4,5	25	8	30
8		3	6	10	9	25
9	школа II ст.	0	5,5	20	6	35
10	вогнестійкості	2	8	12	9	28
11	лікарня III ст.	8	4	10	7	15
12	вогнестійкості	6	6	15	5	26
13	житловий	5	4	15	6	20
14	будинок	9	5	10	8	24
15	торговельне	7	6	20	9	30
16	підприємство	1	8	14	7	32
17	текстильне	4	4,5	25	8	30
18	виробництво	3	8	15	9	24
19	склад	0	5,5	30	10	35
20	паперу	2	7	15	9	22
21	лісопилні	8	12	10	10	25
22	цехи	6	10	10	8	20
23	книгосховище	5	6	15	6	30
24		9	8	12	10	25
25	цех виготовлення	7	8	15	12	20
26	фанери	1	12	10	8	26
27	виставкова	4	8	20	6	30
28	зала	3	10	10	9	20

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

4. Для приміщення з заданими схемою і параметрами 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 адиабатичної температури горіння й газообміну у приміщенні (вважати, що двері й вікна знаходяться на одному рівні, а витяжні люки – у стелі приміщення).

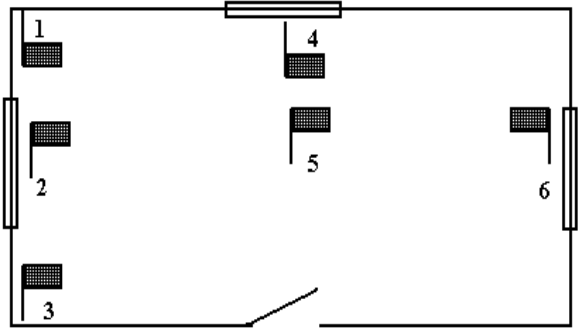


№	Горюча речовина	Місце початку пожежі	Параметр «а», м	Лінійна швидкість пошир. пожежі, м/хв.	Час розвитку пожежі, хв.	Висота приміщення, м	Розмір отворів, м		
							вікно	двері	ВИТЯЖНИЙ ЛЮК
1	папір	5	4	0,6	12	3,0	1,2×1,5	0,9×2,0	-
2	бавовна	9	5	0,8	7	3,5	1,4×1,6	0,8×2,2	1,0×1,5
3	деревина у виробах	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 виробах	1	8	1,0	13	3,5	1,5×1,8	1,1×2,0	-
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 з заданими схемою і параметрами 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 витяжні люки за наявності – у стелі приміщення).



№	Вид горючої речовини	Місце початку пожежі	Параметр «а», м	Лінійна швидкість пошир. пожежі, м/хв.	Час 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	5	7	0,7	8	4	1,2×1,4	0,9×2,0	1,0×1,5 (5 шт.)
8	вироби	4	5	1,2	4	2,8	1,2×1,4	3,0×2,5	1,1×1,1(2 шт.)
9	меблі з деревини	2	6	1,4	12	3,5	1,3×1,4	2,2×2,2	1,1×1,1 (5 шт.)
10	капролактам	4	10	1,0	6	5	1,3×1,5	1,5×2,2	-
11	полістирол	3	12	1,6	14	4,5	1,2×1,5	2,5×3,0	-
12	каучук синтетичний	1	8	1,0	9	3,8	2,2×1,4	2,5×2,2	-
13	папір	3	4	1,8	5	2,8	2,3×1,3	3,0×2,5	-
14	меблі з деревини	5	9	1,9	7	3,0	2,0×1,3	0,9×2,0	1,0×1,0 (2 шт.)
15	поліпропілен	2	7	1,5	6	3,0	2,0×1,5	2,2×2,2	-
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 газозовнітому просторі. Умова утворення горючої пароповітряної суміші у *внутрішньому просторі* резервуара визначається співвідношенням:

$$\Phi_n \leq \Phi_{\text{факт}} \leq \Phi_v,$$

де  $\Phi_n$  і  $\Phi_v$  – 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: 1) внаслідок виходу пари горючої рідини через дихальні пристрої технологічного обладнання; 2) внаслідок випаровування аварійного розливу 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 запалювання, виникне горіння.

### § 1. Горіння пароповітряної суміші на відкритому просторі

Вихід пари горючої рідини через дихальні пристрої технологічного обладнання називається «диханням». У разі незмінного об'єму внутрішнього газозовнітого 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, який має вже горючий пароповітряний простір всередині, горючою рідиною зменшується вільний внутрішній об'єм газозовнітого 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:

$$D_{\text{заг}} = D_{\text{рез}} + 10H_{\text{рез}} \left( \frac{g\varphi_{\text{факт}}}{\varphi_{\text{н}} H_{\text{рез}}^2} \right)^{0,86}, \text{ м}, \quad (4.45)$$

де  $H_{\text{рез}}$ ,  $D_{\text{рез}}$  – висота та діаметр резервуара, м;  $g$  – об’ємна витрата, з якою закачують рідину в резервуар,  $\text{м}^3\text{с}^{-1}$ ;  $\varphi_{\text{н}}$  – нижня КМПП 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 умови аварійного виходу горючих рідин із технологічного обладнання площа, що займає розлив, обумовлюється об’ємом розлиті рідини, рельєфом місцевості, 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  $\eta$  – коефіцієнт ступіню просочення ґрунту;  $\tau_{\text{вит}}$ ,  $g_{\text{вит}}$  – час (с) та витрата витоку рідини ( $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}$ );  $h_{\text{рід}}$  – висота шару рідини, м;  $\rho_{\text{рід}}$  – густина рідини,  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ .

У разі відсутності довідкових або експериментальних даних площу випаровування для розливу на горизонтальну поверхню припускають, що 1 л сумішей і розчинів, які містять 70 % і менше (по масі) розчинників, розливається на площі 0,1  $\text{м}^2$ , а 1 л інших рідин – на площі 0,15  $\text{м}^2$  [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,  $\text{кг}\cdot\text{кмоль}^{-1}$ ;  $P_{\text{нп}}$  – тиск насиченої пари за даної температури, кПа;  $v_{\text{пов}}$  – швидкість руху повітря над поверхнею рідини,  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ .

Загальна маса горючої пари, що наповнює 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,  $\text{м}^2$ .

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,  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ;  $m_{\text{пар}}$  – 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 % [25].

Потужність вибуху можна оцінити у порівнянні зі стандартним вибухом одного кілограма тринітратолуолу. *Тротиловий еквівалент вибуху*  $W_{\text{тнт}}$  пароповітряних систем розраховують за формулою:

$$W_{\text{тнт}} = \frac{0,3Q'_n}{0,9Q_{\text{тнт}}} m_{\text{пар}} z, \text{ кг}, \quad (4.50)$$

де 0,3 і 0,9 – відповідно частки енергії, що витрачаються на формування ударної хвилі під час вибуху пароповітряної хмари і тринітратолуолу;  $m_{\text{пар}}$  – маса речовини, що утворила пароповітряну хмару, кг;  $z$  – коефіцієнт участі пари у вибуху, що обирають залежно від умов вибуху (в незамкненому просторі –  $z = 0,1$ );  $Q'_n$  – нижча масова теплота згорання горючої речовини,  $\text{кДж}\cdot\text{кг}^{-1}$ ;  $Q_{\text{тнт}}$  – масова енергія вибуху тринітратолуолу,  $4520 \text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}$ .

Вибух пароповітряної хмари супроводжується підвищенням тиску. Величину *надлишкового тиску*  $\Delta P$  в ударній хвилі під час згорання такої хмари на відкритому просторі, можна розрахувати за формулою [34]:

$$\Delta P = P_0 \left( 0,8 \frac{W_{\text{тнт}}^{0,33}}{r} + 3 \frac{W_{\text{тнт}}^{0,66}}{r^2} + 5 \frac{W_{\text{тнт}}}{r^3} \right), \text{ кПа}, \quad (4.51)$$

де  $P_0$  – атмосферний тиск, кПа;  $r$  – відстань від епіцентру вибуху, 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.

Можливу руйнівну дію ударної хвилі під час вибуху можна оцінити на підставі узагальнених дослідних даних [25, 34]. Зоною руйнування і можливого травмування персоналу вважають площу з прийнятим для розрахунку центром вибуху і межами, визначеними радіусом  $R$ . Межа зони обумовлена величиною надлишкового тиску по фронті ударної хвилі  $\Delta P$  і відповідним

безрозмірним коефіцієнтом рівня впливу 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, що визначають за табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Вплив надлишкового тиску вибуху на будівельні конструкції

Надлишковий тиск у фронті ударної хвилі $\Delta P$ , кПа	Коефіцієнт рівня впливу вибуху $K_1$	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

Наслідки дії ударної хвилі на людину залежно від величини надлишкового тиску вибуху наведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Вплив надлишкового тиску вибуху на людину

Надлишковий тиск у фронті ударної хвилі $\Delta P$ , 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 перетінок
30 – 50	ураження від руйнування будівель і конструкцій

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 вигорати у дифузійному режимі [34]. При цьому утвориться так звана *вогненна 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 потрапила у повітря простір під час 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  $q_{\min} = 1,4 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$ .

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 4.3.

Таблиця 4.3 – Вплив теплового випромінювання вогненної сфери на людину

Коефіцієнт 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» під час закачування в резервуар бензину А-72 з витратою  $0,08 \text{ м}^3\text{с}^{-1}$ , якщо  $t_0 = 17 \text{ }^\circ\text{C}$ , атмосферний тиск – 98 кПа. Діаметр резервуара дорівнює 12 м, висота резервуара – 9 м.

#### *Розв'язання*

1. Визначаємо за табл. 12 додатків для бензину А-72 нижню КМПП для константи Ангуана:  $\varphi_n = 1,08 \text{ \%}$ ;  $A = 4,195$ ;  $B = 682,88$ ;  $C_a = 222,07$ .
2. Розраховуємо тиск насиченої пари бензину за температури  $17 \text{ }^\circ\text{C}$  за рівнянням Ангуана (3.28):

$$P_{\text{нп}} = 10^{\frac{4,195 - \frac{682,88}{222,07+17}}{}} = 21,8 \text{ кПа}.$$

3. Розраховуємо фактичну концентрацію насиченої пари бензину А-72 за формулою (3.26):

$$\Phi_{\text{факт}} = \frac{21,8 \cdot 100}{98} = 22,2 \%$$

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 °С і тиску 98 кПа дорівнює 22,2 %. Діаметр зони вибухонебезпечної загазованості навколишнього простору внаслідок «великого дихання» резервуара під час закачування бензину А-72 із витратою 0,08 м<sup>3</sup>с<sup>-1</sup> дорівнює 15,2 м.

### *Методика розрахунку параметрів горіння 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 вибуху пароповітряної хмари за формулою (4.50).

4. Розрахувати величину надлишкового тиску  $\Delta P$  в ударній хвилі під час

згоряння парогазової хмари, на заданій відстані за формулою (4.51).

5. Розрахувати радіус ураження ударною хвилею 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 пошкоджень 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  $25 \text{ м}^2$ , якщо час випаровування дорівнює 40 хв. (2400 с), швидкість вітру –  $1,5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ,  $t_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### *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 етилацетату за довідником [7] або додатком 14:  $A = 6,2267$ ;  $B = 1244,95$ ;  $C_a = 217,88$ .

$$P_{\text{нас}} = 10^{\left(6,2267 - \frac{1244,95}{15+217,88}\right)} = 7,6 \text{ кПа.}$$

1.2. Розраховуємо інтенсивність випаровування етилацетату за даних умов за формулою (4.47):  $\mu_{C_4H_8O_2} = 12 \cdot 4 + 1 \cdot 8 + 16 \cdot 2 = 88 \text{ кг}\cdot\text{кмоль}^{-1}$ ;

$$I_{\text{вип}} = 88 \cdot 7,6(0,734 + 1,637 \cdot 1,5) \cdot 10^{-6} = 2,13 \cdot 10^{-3} \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}.$$

1.3. Розраховуємо масу рідини, що випарувалася, з урахуванням площі розливу та часу випаровування за формулою (4.48):

$$m_{\text{вип}} = 2,13 \cdot 10^{-3} \cdot 25 \cdot 2400 = 128 \text{ кг.}$$

2. Визначаємо радіус зони вибухонебезпечної загазованості, що утворилася під час випаровування аварійного розливу етилацетату протягом 2400 с.

2.1. Розраховуємо густину пари етилацетату за  $t_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$  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 КМПП етилацетату за довідником [7]:  $\varphi_n = 2 \%$ .

2.3. Розраховуємо горизонтальний розмір зони вибухонебезпечної загазованості за формулою (4.49):

$$R_{\text{зар}} = 3,15 \sqrt{\frac{2400}{3600} \left(\frac{7,6}{2}\right)^{0,8} \left(\frac{128}{3,72 \cdot 7,6}\right)^{0,33}} = 12 \text{ м.}$$

3. Визначаємо тротиловий еквівалент вибуху пароповітряної суміші.

3.1. Розраховуємо масову теплоту згоряння етилацетату за формулою (1.52); спочатку визначаємо молярну теплоту згоряння етилацетату за довідником [7]:  $Q_H = 2078 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ ; проводимо розрахунок:

$$Q'_H = \frac{2078 \cdot 1000}{88} = 23614 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

3.2. Через те що випаровування рідини відбувається у відкритий простір, коефіцієнт участі пари у вибуху  $z = 0,1$ .

3.3. Розраховуємо тротиловий 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 uszkodжень будівельних конструкцій ударною хвилею ( $\Delta P = 14 \text{ кПа}$ ,  $K_1 = 28,0$ ) за формулою (4.52):

$$R_{\text{ураж}} = \frac{28 \cdot \sqrt[3]{128}}{\left[1 + \left(\frac{3180}{128}\right)^2\right]^{\frac{1}{6}}} = 48,5 \text{ м}.$$

Висновок: горизонтальний розмір зони загазованості, що утворилась внаслідок випаровування етилацетату у відкритий простір протягом 40 хвилин за температури  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , дорівнює 12 м, тротиловий еквівалент вибуху пароповітряної хмари становитиме 22,3 кг, радіус незначних uszkodжень 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  $10 \text{ м}^2$ , якщо час випаровування дорівнює 30 хв. (1800 с), швидкість вітру –  $1,2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , температура навколишнього середовища –  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### *Розв'язання*

1. Визначаємо масу гексану, що випарувалася за даних умов.

1.1. Розраховуємо тиск насиченої пари гексану за температури  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  за формулою (3.28). Визначаємо константи Антуана для гексану за довідником [7] або табл. 14 додатків:  $A = 5,9952$ ;  $B = 1166,27$ ;  $C_a = 223,66$ .

$$P_{\text{нас}} = 10^{\left(5,9952 - \frac{1166,27}{25 + 223,66}\right)} = 20,2 \text{ кПа}.$$

1.2. Розраховуємо інтенсивність випаровування гексану за даних умов за формулою (4.47):

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

$$I_{\text{вип}} = 86 \cdot 20 \cdot (0,734 + 1,637 \cdot 1,2) \cdot 10^{-6} = 4,64 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

1.3. Розраховуємо масу гексану, що випарувалася, з урахуванням площі розливу та часу випаровування за формулою (4.48):

$$m_{\text{вип}} = 4,64 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 1800 = 83,5 \text{ кг}.$$

2. Розраховуємо радіус та час життя вогненної сфери 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 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 випаровування бензину у відкритий простір із поверхні 5 м<sup>2</sup> протягом 25 хв. (1500 с), швидкість вітру 1,2 м·с<sup>-1</sup>, атмосферний тиск – 101 кПа, температура навколишнього середовища дорівнює 10 °С.

#### *Розв'язання*

1. Визначаємо із таблиці 12 додатків для бензину А-72 (зимовий) молярну масу  $\mu = 97,2$  кг, нижню об'ємну концентраційну межу поширення полум'я  $\varphi_{\text{н}} = 1,08$  %, константи Антуана:  $A = 4,195$ ,  $B = 682,88$ ,  $C_a = 222,07$ , нижчу масову теплоту згорання  $Q'_{\text{н}} = 44239$  кДж·кг<sup>-1</sup>.

2. Визначаємо масу бензину А-72, що випарувалася за даних умов.

2.1. Розраховуємо тиск насиченої пари бензину А-72 (зимовий) за температури 10 °С за формулою (3.28):

$$\lg P_{\text{нас}} = 4,195 - \frac{682,88}{(10 + 222,07)} = 1,25;$$

$$P_{\text{нас}} = 10^{1,25} = 17,8 \text{ кПа}.$$

2.2. Розраховуємо інтенсивність випаровування бензину А-72 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:

$$W_{\text{нт}} = \frac{0,3 \cdot 44239}{0,9 \cdot 4520} \cdot 35,2 \cdot 0,1 = 11,5 \text{ кг.}$$

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. Розрізняють масову і лінійну швидкість вигорання.

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

$$v_m = \frac{dm}{S dt}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1}. \quad (4.56)$$

**Лінійна швидкість вигорання** – висота шару рідини, який вигорєє за одиницю часу:

$$v_l = \frac{v_m}{\rho} = \frac{dh}{dt}, \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}. \quad (4.57)$$

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.

Звичайно швидкість вигорання рідини визначається експериментальним шляхом, однак це вимагає значних матеріальних витрат. Для оцінки швидкості вигорання рідини використовують рівняння теплового балансу:

$$q_{\text{нагр}} = v_m \Delta H_{\text{вип}} + v_{\text{прогр}} c_p (t_{\text{кип}} - t_0).$$

При сталому горінні швидкість вигорання визначається швидкістю нагрівання і випаровування горючої рідини. На її нагрівання і випаровування рідини йде певна частка тепла, що випромінюється полум'ям до поверхні рідини. Як що швидкості вигорання і прогрівання близькі, тобто  $v_m = v_{\text{прог}}$ , то:

$$v_m = \frac{Q_{\text{нагр}}}{\Delta H_{\text{вип}} + c_p (t_{\text{кип}} - t_0)}. \quad (4.58)$$

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.

Під час вигорання у резервуарах важких нафтопродуктів з придонним шаром води з часом можливе прогрівання до температури кипіння маси горючої рідини на всю глибину, аж до водяної подушки. Кипіння води при цьому не відбувається, оскільки на неї тисне шар горючої рідини. Вода нагрівається вище за температуру кипіння. Під час вигорання знижується тиск маси рідини на водяний шар і, як тільки тиск пари води зрівняється із тиском стовпа рідини, відбувається бурхливий викид 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.

Спінювання і викид у процесі горіння рідини створюють велику небезпеку, оскільки раптово викинута палаюча рідина може уразити велику площу поблизу осередку пожежі разом із людьми і технікою. Характерними ознаками близького викиду є виникнення вібрації стінок резервуара, що супроводжується шумом, а також – зростання розмірів факела полум'я.

### **Приклад розв'язання задачі**

Визначити час до можливого викиду нафти під час пожежі резервуара, якщо рівень його наповнення – 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 з придонним шаром води – 0,8 м можливий через 18 годин.

### **Приклад розв'язання задачі**

Розрахувати лінійну швидкість вигорання бензолу із вільної поверхні за температури навколишнього середовища  $10^\circ\text{C}$ . 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 –  $80^\circ\text{C}$ , густина –  $873,6 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ , питома теплота випаровування –  $393,9 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ , питома теплоємність –  $1,05 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

2. Розраховуємо масову швидкість вигорання рідини за формулою (4.58):

$$v_{\text{м}} = \frac{35}{393,9 + 1,05(80 - 10)} = 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

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  $10^\circ\text{C}$  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 коефіцієнтів 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 паром, 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 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 [31] *інтенсивність випаровування рідини*  $I_{\text{вип}}$  у приміщенні розраховують за емпіричною формулою:

$$I_{\text{вип}} = \xi P_{\text{нас}} \sqrt{\mu} \cdot 10^{-6}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (4.60)$$

де  $\mu$  – молярна маса рідини,  $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ;  $P_{\text{нас}}$  – тиск насиченої пари рідини за даної температури,  $\text{кПа}$ ;  $\xi$  – коефіцієнт, який залежить від швидкості руху і температури повітря біля поверхні випаровування, обирають за табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Значення коефіцієнта  $\xi$  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

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 довідкових даних) виходячи з припущення, що 1 л сумішей та розчинів, які містять 70 % і менше (по масі) розчинників, розливається на площі 0,5 м<sup>2</sup>, а 1 л інших рідин – на 1 м<sup>2</sup> підлоги приміщення [17].

При відносно тривалому випаровуванні пара речовини розподіляється у вільному об'ємі приміщення й утворює певну середню концентрацію, яку можна визначити за формулами:

$$\text{масова:} \quad \Phi'_{\text{ср}} = \frac{m_{\text{пар}}}{V_{\text{вільн}}} = \frac{m_{\text{пар}}}{V_{\text{прим}}(1-\eta)}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (4.61)$$

$$\text{об'ємна:} \quad \Phi_{\text{ср}} = \frac{100m_{\text{пар}}}{\rho_{\text{пар}} V_{\text{прим}}(1-\eta)}, \%, \quad (4.62)$$

де  $\Phi'_{\text{ср}}$ ,  $\Phi_{\text{ср}}$  – масова та об'ємна середня концентрації речовини у вільному об'ємі приміщення;  $V_{\text{прим}}$  – повний об'єм приміщення, м<sup>3</sup>;  $m_{\text{пар}}$  – маса речовини, що випарувалась з вільної поверхні за час  $\tau_{\text{вип}}$ , кг;  $\eta$  – частка об'єму приміщення, зайнята обладнанням або меблями.

Масу рідини, яка при повному випаровуванні утворить у даному приміщенні певну концентрацію пари  $\Phi'_{\text{пар}}$ , можна розрахувати за формулою:

$$m_{\text{рід}} = \Phi'_{\text{пар}} V_{\text{прим}}(1-\eta), \text{ кг}. \quad (4.63)$$

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:

$$\tau_{\text{вип}} = \frac{\Phi'_{\text{пар}} V_{\text{прим}}(1-\eta)}{I_{\text{вип}} S_{\text{розл}}}, \text{ с}. \quad (4.64)$$

Зазвичай за критичний приймають час, протягом якого у приміщенні утвориться середня концентрація пари, рівна нижній КМПП.

Час, за який станеться повне випаровування певної маси рідини за даних умов, можна визначити із формули (4.48):

$$\tau_{\text{вип}} = \frac{\Phi'_{\text{пар}} V_{\text{прим}}(1-\eta)}{I_{\text{вип}} S_{\text{розл}}}, \text{ с}. \quad (4.65)$$

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:

$$X_{\text{нкмпп}} = 1,1958 \sqrt{\frac{\tau_{\text{вип}} \ln\left(\frac{1,26\Phi_0}{\Phi_n}\right)}{3600}}, \text{ м}; \quad (4.66)$$

$$Y_{\text{нкмпп}} = 1,1958F \sqrt{\frac{\tau_{\text{вип}} \ln\left(\frac{1,26\varphi_0}{\varphi_{\text{н}}}\right)}{3600}}, \text{ м}; \quad (4.67)$$

$$Z_{\text{нкмпп}} = K_1 H \sqrt{\frac{\tau_{\text{вип}} \ln\left(\frac{1,26\varphi_0}{\varphi_{\text{н}}}\right)}{3600}}, \text{ м}, \quad (4.68)$$

де  $H, L, F$  – висота, довжина та ширина приміщення, м;  $K_1$  – коефіцієнт для нерухомого газового середовища  $K_1 = 0,04714$ , для рухомого  $K_1 = 0,3536$ ;  $\tau_{\text{вип}}$  – час випаровування рідини, с;  $\varphi_{\text{н}}$  – об’ємна нижня КМПП речовини, %;  $\varphi_0$  – передекспоненційний множник:

$$\varphi_0 = \varphi_{\text{нп}} \left( \frac{100m_{\text{пар}}}{\varphi_{\text{нп}} \rho_{\text{пар}} V_{\text{вільн}}} \right)^{K_2} = \varphi_{\text{нп}} \left( \frac{\varphi_{\text{сер}}}{\varphi_{\text{нп}}} \right)^{K_2}, \text{ \%}, \quad (4.69)$$

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 для нерухомого газового середовища  $K_2 = 0,41$ , для рухомого  $K_2 = 0,46$ .

За мінусових значень логарифмів у підкореновому виразі відстані  $X_{\text{нкмпп}}$ ,  $Y_{\text{нкмпп}}$  і  $Z_{\text{нкмпп}}$  приймають рівними 0.

Якщо в зоні вибухонебезпечної загазованості виникне джерело запалювання, станеться вибух, надлишковий тиск якого у приміщенні заданих розмірів можна розрахувати за формулами:

- для горючих речовин, побудованих з атомів С, Н, О, N, Cl, Br, I, F:

$$\Delta P = (P_{\text{max}} - P_0) \frac{100m_{\text{пар}} z}{V_{\text{вільн}} \rho_{\text{пар}} \varphi_{\text{стм}} K_{\text{н}}}, \text{ кПа}, \quad (4.70)$$

де  $P_{\text{max}}$  – максимальний тиск вибуху стехіометричної пароповітряної суміші в замкненому об’ємі, кПа,  $P_0$  – атмосферний тиск, кПа;  $\varphi_{\text{стм}}$  – стехіометрична концентрація горючої речовини, об. %;  $K_{\text{н}}$  – коефіцієнт негерметичності приміщення та неадіабатичності процесу горіння; приймають рівним 3;

- для елементоорганічних рідин та для сумішей горючих рідин:

$$\Delta P = \frac{P_0 Q'_{\text{н}} m_{\text{пар}} z}{V_{\text{вільн}} \rho_{\text{пов}} c_{\text{рпов}} T_{\text{пов}} K_{\text{н}}}, \text{ кПа}, \quad (4.71)$$

де  $Q'_{\text{н}}$  – нижча масова теплота згоряння горючої речовини, кДж·кг<sup>-1</sup>;  $\rho_{\text{пов}}, c_{\text{рпов}}, T_{\text{пов}}$  – густина, теплоємність та початкова температура повітря до вибуху.

Коефіцієнт участі горючої пари легкозаймистих рідин 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 та за умови, що  $\varphi_{\text{сер}} < 0,5\varphi_{\text{н}}$ , коефіцієнт участі горючої пари легкозаймистих рідин у вибуху можна розраховувати за формулами

– за умови, що  $X_{\text{нкмпп}} \leq 0,5L$  та  $Y_{\text{нкмпп}} \leq 0,5F$ :

$$z = \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot \pi}{m_{\text{пар}}} \rho_{\text{пар}} \left( \varphi_0 + \frac{\varphi_{\text{н}}}{1,25} \right) X_{\text{нкмпп}} Y_{\text{нкмпп}} Z_{\text{нкмпп}} ; \quad (4.72)$$

– 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<sup>2</sup>.

### **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 КМПП  $\varphi'_{\text{н}}$  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 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, за який за даних умов середня концентрація пари горючої рідини у приміщенні досягне нижньої КМПП, за формулою (4.64).

7. Якщо середня фактична концентрація пари  $\varphi'_{\text{ср}}$  є меншою, ніж  $\varphi'_{\text{н}}$ , 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 передекспоненційний 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 у приміщенні.

8.1. Розрахувати коефіцієнт участі горючої пари у вибуху  $z$  за формулами (4.72) або (4.73) залежно від співвідношення розмірів зони загазованості та приміщення; для наближених розрахунків  $z$  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 або для деяких технічних сумішей рідин визначити за довідником [7] або табл. 12 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 4x3x2,5 м, у якому відбувалося випаровування ацетону з площі 0,5 м<sup>2</sup> протягом 15 хв. Температура повітря дорівнює 15 °С, атмосферний тиск – 101,2 кПа, швидкість руху повітря – 0,1 м·с<sup>-1</sup>, частка об'єму приміщення, що зайнята технологічним обладнанням, дорівнює 0,3.

#### *Розв'язання*

1. Визначаємо за довідником [7] молярну масу ацетону  $\mu = 58 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ , нижню КМПП  $\varphi_n = 2,5 \%$ , константи Ангуана:  $A = 6,3755$ ,  $B = 1281,721$ ,  $C_a = 237,09$ .

2. Розраховуємо масову нижню КМПП ацетону за формулою (3.3). Молярний об'єм газу  $V_\mu$  за даних умов становить:

$$V_\mu = 22,4 \cdot \frac{101,3 \cdot (273 + 15)}{273 \cdot 101,2} = 23,6 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1};$$

$$\varphi'_n = 2,5 \frac{58}{100 \cdot 23,6} = 0,061 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

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  $\xi$  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):

$$\Phi'_{\text{сер}} = \frac{0,174}{4 \cdot 3 \cdot 2,5 \cdot (1 - 0,3)} = 0,008 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

Висновок: середня фактична концентрація ацетону у приміщенні дорівнює  $0,008 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$  і є безпечною, оскільки є меншою, ніж нижня масова КМПП –  $0,061 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ .

### *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  $3 \text{ м}^2$ , стане вибухонебезпечною. Початкова температура 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] молярну масу бензолу  $\mu = 78 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ , нижню концентраційну межу поширення полум'я горючої речовини  $\Phi^{\circ}_{\text{н}} = 1,4 \%$ , константи Антуана:  $A = 5,6139$ ,  $B = 902,275$ ,  $C_a = 178,10$ .

2. Розраховуємо нижню масову КМПП за формулою (3.3). Розраховуємо молярний об'єм пари бензолу за даних умов:

$$V_{\mu} = 22,4 \cdot \frac{101,3 \cdot 298}{273 \cdot 101,5} = 24,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1};$$

$$\Phi'_{\text{н}} = 1,4 \cdot \frac{78}{100 \cdot 24,4} = 0,0448 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

3. Розраховуємо тиск насиченої пари  $P_{\text{нп}}$  за даних умов за формулою (3.28):

$$\lg P_{\text{нп}} = 5,6139 - \frac{902,275}{(30 + 178,1)} = 1,28;$$

$$P_{\text{нп}} = 10^{1,28} = 19,1 \text{ кПа}.$$

4. Розраховуємо інтенсивність випаровування бензолу за даних умов за формулою (4.60). Обираємо значення коефіцієнта  $\xi$  за табл. 4.4, виходячи із температури і швидкості руху повітря:  $\xi = 3,6$ .

$$I_{\text{внп}} = 3,6 \cdot 19,1 \cdot \sqrt{78} \cdot 10^{-6} = 607 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

5. Розраховуємо час, за який середня концентрація пари бензолу у приміщенні за даних умов досягне нижньої КМПП, за формулою (4.64):

$$\tau_{\text{нкмпп}} = \frac{0,0448 \cdot (1 - 0,15) \cdot 5 \cdot 6 \cdot 3}{607 \cdot 10^{-6} \cdot 3} = 607 \text{ с}.$$

Висновок: за даних умов пара бензолу у визначеному об'ємі приміщення утворить вибухонебезпечну концентрацію через  $607 \text{ с}$ .

**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, 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 12 додатків для авіаційного бензину молярну масу  $\mu = 102,2 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ , нижню КМПП  $\varphi_n = 0,92 \%$ , 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):

$$\lg P_{\text{нас}} = 7,5442 - \frac{2629,6}{(20 + 384,2)} = 1,04;$$

$$P_{\text{нас}} = 10^{1,04} = 11 \text{ кПа}.$$

2.2. Розраховуємо інтенсивність випаровування авіаційного бензину за формулою (4.60). Обираємо значення коефіцієнта  $\xi$  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, площу розливу можна прийняти як 1 м<sup>2</sup> на 1 л речовини. Тому фактична площа розливу 2 л бензину дорівнює 2,0 м<sup>2</sup>.

$$m_{\text{пар}} = 111 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 600 = 0,13 \text{ кг}.$$

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):

$$\varphi_{\text{сер}} = \frac{100 \cdot 0,13}{4,3 \cdot 64,8} = 0,05 \%.$$

Середня фактична концентрація пари авіаційного бензину  $\varphi_{\text{факт}} = 0,05\%$  є меншою, ніж КМПП  $\varphi_n = 0,92\%$ : 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 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 передекспоненційний множник за формулою (4.69):

$$\varphi_0 = 10,9 \cdot \left( \frac{0,13 \cdot 100}{10,9 \cdot 4,3 \cdot 64,8} \right)^{0,41} = 1,2\%.$$

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 внаслідок аварійного розливу розчинника Р-4 у приміщенні розмірами 12x5x3 м, якщо обладнанням і меблями зайнята частка приміщення  $\eta = 0,2$ , площа випаровування горючої рідини дорівнює 5 м<sup>2</sup>, час випаровування – 20 хв. (1200 с), температура повітря у приміщенні – 10 °С, атмосферний тиск – 101 кПа, швидкість руху повітря у приміщенні – 0,1 м·с<sup>-1</sup>.

#### *Розв'язання*

1. Визначаємо із табл. 12 додатків молярну масу  $\mu = 81,7 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$  розчинника Р-4, нижню об'ємну КМПП  $\varphi_n = 1,65\%$ , константи Ангуана:  $A = 6,2969$ ,  $B = 1373,67$ ,  $C_a = 242,8$ , 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):

$$\lg P_{\text{нас}} = 6,2969 - \frac{137367}{(10 + 2428)} = 0,86;$$

$$P_{\text{нас}} = 10^{0,86} = 7,3 \text{ кПа.}$$

2.2. Розраховуємо інтенсивність випаровування розчинника Р-4 за даних умов за формулою (4.60). Обираємо значення коефіцієнта  $\xi$  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):  $V_{\text{вільн}} = (1 - 0,2)12 \cdot 5 \cdot 3 = 144 \text{ м}^3$ ;

$$\varphi_{\text{сер}} = \frac{100 \cdot 1,2}{3,5 \cdot 144} = 0,24 \text{ \%}.$$

Середня фактична концентрація пари розчинника є меншою, ніж нижня концентраційна межа поширення полум'я ( $\varphi_n = 1,65 \text{ \%}$ ), отже вибухонебезпечні концентрації пари розчинника за даних умов будуть утворюватися не у 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):

$$\varphi_{\text{нас}} = 100 \frac{7,3}{101} = 7,2 \text{ \%}.$$

4.2. Розраховуємо за даних умов передекспоненційний множник за формулою (4.69):

$$\varphi_0 = 7,2 \cdot \left( \frac{0,24}{7,2} \right)^{0,46} = 1,5 \text{ \%}.$$

4.3. Розраховуємо розміри зони вибухонебезпечної загазованості за даних умов на 20 хв. випаровування розчинника Р-4 за формулами (4.66)–(4.68):

$$X_{\text{нкмпп}} = 1,1958 \cdot 12 \cdot \sqrt{\frac{1200}{3600} \ln\left(\frac{1,26 \cdot 1,5}{1,65}\right)} = 3,1 \text{ м};$$

$$Y_{\text{нкмпп}} = 1,1958 \cdot 5 \cdot \sqrt{\frac{1200}{3600} \ln\left(\frac{1,26 \cdot 1,5}{1,65}\right)} = 1,3 \text{ м};$$

$$Z_{\text{нкмпп}} = 0,3536 \cdot 3 \cdot \sqrt{\frac{1200}{3600} \ln\left(\frac{1,26 \cdot 1,5}{1,65}\right)} = 0,3 \text{ м}.$$

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 тротиловий 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 – 3,1 м у довжину, 1,3 м у ширину і 0,3 м по висоті; тротиловий 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 – 10 хв. (600 с), температура повітря у приміщенні – 18 °С, атмосферний тиск – 101 кПа, швидкість руху повітря у приміщенні – 0,2 м·с<sup>-1</sup>.

#### *Розв'язання*

1. Визначаємо із довідника [7] молярну масу циклогексану  $\mu = 84 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ , нижню об'ємну КМПП  $\varphi_{\text{н}} = 1,3 \%$ , константи Антуана:  $A = 5,96991$ ,  $B = 1203,526$ ,  $C_{\text{а}} = 222,863$ , густину  $\rho = 773 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ , максимальний тиск вибуху  $P_{\text{max}} = 858 \text{ кПа}$ .

2. Визначаємо масу циклогексану, що випарувалася за даних умов.

2.1. Розраховуємо тиск насиченої пари циклогексану за даних умов за формулою (3.28).

$$\lg P_{\text{гнп}} = 5,96991 - \frac{1203,526}{18 + 222,863} = 0,97;$$

$$P_{\text{гнп}} = 10^{0,97} = 9,4 \text{ кПа.}$$

2.2. Розраховуємо інтенсивність випаровування циклогексану за формулою (4.60). Обираємо значення коефіцієнта  $\xi$  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 стався на підлозі виробничого приміщення, не здатний до просочування, площу розливу можна прийняти як  $1 \text{ м}^2$  на  $1 \text{ л}$  речовини. Тому фактична площа розливу  $10 \text{ л}$  циклогексану дорівнює  $10 \text{ м}^2$ .

$$m_{\text{пар}} = 301,5 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 600 = 18,1 \text{ кг.}$$

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 всередині приміщення.

3.1. Розраховуємо густину пари рідини 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  $\text{C}_6\text{H}_{12}$ :

$$\beta = n_{\text{C}} + n_{\text{S}} + \frac{n_{\text{H}} - n_{\text{X}}}{4} - \frac{n_{\text{O}}}{2} + \frac{5n_{\text{P}}}{4} = 6 + \frac{12}{4} = 9.$$

$$\varphi_{\text{стм}} = \frac{100}{1 + 9 \cdot 4,76} = 2,28\%.$$

3.3. Приймаємо коефіцієнт участі горючої пари циклогексану у вибуху у приміщенні рівним  $0,3$ .

3.4. Розраховуємо надлишковий тиск вибуху пароповітряної хмари циклогексану, яка утворилася у вільному об'ємі приміщення, 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  $10 \text{ кПа}$ .

**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 <sup>3</sup> с <sup>-1</sup>	Фактична концентрація нафти Ф <sub>факт</sub> , % (об)	НК-МПП, % (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

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 кВт·м<sup>-2</sup>. Прийняти, що швидкість прогрівання дорівнює швидкості вигорання ацетону, теплота випаровування ацетону за даної температури дорівнює 544 кДж·кг<sup>-1</sup>, а питома масова теплоємність ацетону виражається рівнянням  $c_p = 2,12 + 0,0032 \cdot t$  кДж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>.

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 11, 12 додатків).

№	Горюча рідина	Висота резервуара, м	Діаметр резервуара, м	Витрата закачування, м <sup>3</sup> с <sup>-1</sup>	t <sub>0</sub> , °С	P <sub>0</sub> , 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
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	етиловий 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

4\*. 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<sup>-2</sup>. Прийняти, що швидкість прогрівання дорівнює швидкості вигорання сірковуглецю, теплота випаровування рідини за даної температури дорівнює 370,5 кДж·кг<sup>-1</sup>, а питома масова теплоємність виражається рівнянням  $c_p = 0,98 + 0,00103 \cdot t$  кДж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>.



5. 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 <sup>-1</sup>	Швидкість прогрівання, см·хв <sup>-1</sup>
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

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<sup>-1</sup>, лінійна швидкість вигорання рідини – 0,12 см·хв<sup>-1</sup>, а теплоємність спирту від температури залежить наступним чином:  $c_p = 20,4 + 0,104 \cdot t$  Дж·моль<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>. Прийняти, що швидкість прогрівання дорівнює швидкості вигорання метилового спирту.

7\*. Розрахувати густину теплового потоку від полум'я до поверхні керосину, якщо початкова температура рідини дорівнює 60 °С, масова швидкість вигорання рідини – 0,014 кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>, теплота випаровування за 60 °С дорівнює 331 кДж·кг<sup>-1</sup>, а питома теплоємність – 2,34 кДж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>. Густина керосину становить 834 кг·м<sup>-3</sup>.

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

8. Для наведених горючих рідин розрахувати параметри надзвичайної ситуації, що сталася при аварійному розливі рідини на відкритому просторі (площа аварійного розливу, час та умови випаровування наведені у таблиці):
- масу рідини, що випарується за даних умов з вільної поверхні розливу за даний час, та радіус зони вибухонебезпечної загазованості;
  - трогильовий еквівалент вибуху та надлишковий тиск в ударній хвилі на заданій відстані від епіцентру вибуху парогазової хмари;
  - радіус повного руйнування, область значних і незначних пошкоджень ударною хвилею;
  - радіус, час життя вогненної сфери та радіус отримання опіків.

№	Горюча рідина	Площа розливу, м <sup>2</sup>	Час випаровування, хв.	t <sub>0</sub> , °C	P <sub>0</sub> , кПа	Швидкість вітру, м·с <sup>-1</sup>	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
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	дипропловий 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	пропенілацетат	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  $\eta$  зайнята обладнанням, упала склянка з горючою рідиною заданої ємності  $V_{\text{рід}}$ . Початкові умови наведені у таблиці. Розрахувати:

- фактичну середню концентрацію пари у вільному об'ємі приміщення, що утворилася за час випаровування, та визначити ступінь її вибухонебезпеки;
- час, протягом якого фактична середня концентрація пари в даному приміщенні стане рівною нижній концентраційній межі поширення полум'я;
- час, за який рідина повністю випарується за даних умов, та порівняти з часом, необхідним для утворення в об'ємі приміщення нижньої КМПП;
- масу рідини, необхідну для створення нижньої КМПП у вільному об'ємі приміщення за умов, наведених у таблиці.

№	Горюча рідина	Параметри приміщення				Об'єм рідини, л	$t_0$ , °C	$P_{\text{атм}}$ , кПа	Час випару, хв.	Швидкість вітру, м·с <sup>-1</sup>
		L, м	F, м	H, м	$\eta$					
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
7	2-гексен	14	8	3	0,15	2	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	дітиламін	12	4	2,5	0,1	25	25	100	36	-
29	детиловий 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	метилциклопентан	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

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:

- розміри зони загазованості через заданий час випаровування;
- надлишковий тиск вибуху пароповітряної хмари, що утворилася внаслідок аварійного випаровування рідини всередині приміщення.

№	Горюча рідина	Параметри приміщення				Об'єм рідини, л	$t_0$ , °C	$P_{\text{атм}}$ , кПа	Час випару, хв.	Швидкість вітру, м·с <sup>-1</sup>
		L, м	F, м	H, м	$\eta$					
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
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	акролейн	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	пропілацетат	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], [16].

Розвиток 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 за нижню КМПП; 3) займання й вибух газової хмари у разі дії на 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 – *розпилим*. При розпиленому факелі фронт полум'я має розвинену поверхню, що збільшує поверхню випромінювання. Через пульсацію газового потоку контури зон є умовними, а їх розміри можуть змінюватися.

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.

Висота компактного газового фонтана залежить від витрати газу, тобто дебіту свердловини, і визначається емпіричною формулою:

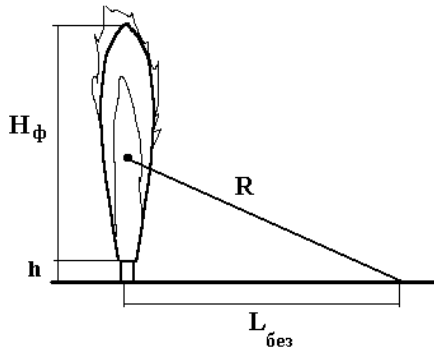
$$H_{\phi} = 23g_{\phi}^{0,4}, \text{ м}, \quad (4.74)$$

де  $H_{\phi}$  – висота факела газового фонтана, м;  $g_{\phi}$  – витрата (дебіт) свердловини, млн. м<sup>3</sup>·доба<sup>-1</sup>.

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 [15]. Якщо фонтан є вертикальним, то зона теплового впливу представляє собою півсферу, розміри якої визначаються критичною густиною потоку випромінювання  $q_{кр}$  (див. рис. 4.6).



**Рис. 4.6 – Визначення безпечної відстані від вертикального фонтана**

Густина 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 (теплота пожежі), кДж·с<sup>-1</sup>;  $R$  – радіус зони теплового впливу, м;  $f$  – коефіцієнт випромінювання факела, що враховує частку тепла, яка втрачається випромінюванням у навколишнє середовище:

$$f = 0,05\sqrt{\mu_{\text{сер}}}, \quad (4.77)$$

де  $\mu$  – середня молярна маса газу, що згоряє, кг·кмоль<sup>-1</sup>:  $\mu_{\text{сер}} = \sum_i \mu_i r_i$ , (4.78)

де  $\mu_i$  – молярна маса  $i$ -го компонента газового фонтана;  $r_i$  – об'ємна частка  $i$ -

го компонента газового фонтана.

Кількість енергії, що виділяється за одиницю часу при згорянні газу у фонтані, можна визначити як:

$$Q_{\text{пож}} = \eta Q''_{\phi} g_{\phi}, \text{ кДж}\cdot\text{с}^{-1}, \quad (4.79)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт повноти згорання;  $g_{\phi}$  – витрата (дебіт) свердловини,  $\text{м}^3\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $Q''_{\phi}$  – нижча об'ємна теплота згорання газового фонтана як суміші,  $\text{кДж}\cdot\text{м}^{-3}$ :

$$Q''_{\phi} = \sum_i (Q''_{\text{ні}i} \cdot r_i), \text{ кДж}\cdot\text{м}^{-3}, \quad (4.80)$$

де  $Q''_{\text{ні}i}$  – нижча об'ємна теплота згорання  $i$ -го компонента газового фонтана.

Якщо дебіт газового фонтана  $g_{\phi}$  відомий у мільйонах метрів кубічних за добу, то теплоту пожежі можна виразити рівнянням:

$$Q_{\text{пож}} = 11,577\eta Q''_{\phi} g_{\phi}, \text{ кДж}\cdot\text{с}^{-1}, \quad (4.81)$$

де  $g_{\phi}$  – 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  $q_{\text{кр}} = 0,56 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$ , у 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 газового фонтана за формулою:

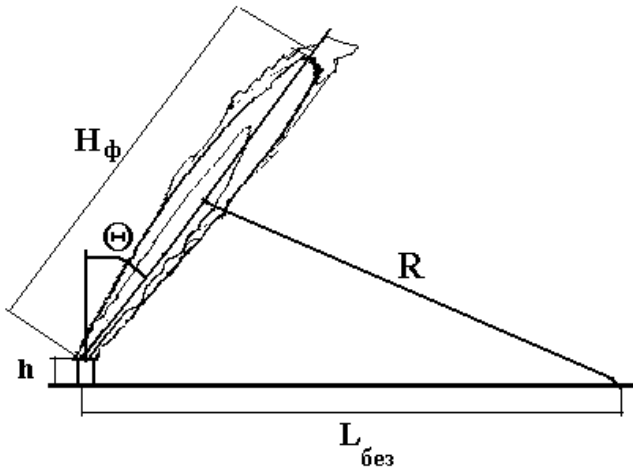
$$L_{\text{без}} = \sqrt{R^2 - \left(h + \frac{H_{\phi}}{2}\right)^2}, \text{ м}, \quad (4.83)$$

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). Зона теплового впливу в цьому випадку приймає форму еліпса, а безпечну відстань можна розрахувати за формулою:

$$L_{\text{без}} = \sqrt{R^2 - \left(h + \left(\frac{H_{\phi}}{2} - h\right) \cos\Theta\right)^2} + \left(\frac{H_{\phi}}{2} - h\right) \sin\Theta, \text{ м}, \quad (4.84)$$

де  $\Theta$  – кут нахилу факела полум'я



**Рис. 4.7 – Визначення безпечної відстані від нахиленого газового фонтана**

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. 13 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 складу:  $\text{CH}_4$  – 92 %;  $\text{C}_2\text{H}_6$  – 4,5 %;  $\text{C}_3\text{H}_8$  – 1 %;  $\text{N}_2$  – 2 %;  $\text{CO}_2$  – 0,5 %. Дебіт свердловини дорівнює 0,1 млн.м<sup>3</sup>доба<sup>-1</sup>; коефіцієнт повноти згорання  $\eta = 0,8$ ; висота зони відриву  $h = 1$  м.



## Розв'язання

1. Визначаємо об'ємні теплоти згорання горючих компонентів газового фонтана за табл. 7 додатків:  $Q''_{н\text{CH}_4} = 35880 \text{ кДж}\cdot\text{м}^{-3}$ ;  $Q''_{н\text{C}_2\text{H}_6} = 64360 \text{ кДж}\cdot\text{м}^{-3}$ ;  $Q''_{н\text{C}_3\text{H}_8} = 93180 \text{ кДж}\cdot\text{м}^{-3}$ .

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. Розрахуємо 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. Розрахуємо середню молярну масу газу  $\mu_{\text{сеп}}$  за формулою (4.78), якщо  $\mu_{\text{CH}_4} = 16 \text{ кг}\cdot\text{кмоль}^{-1}$ ;  $\mu_{\text{C}_2\text{H}_6} = 30 \text{ кг}\cdot\text{кмоль}^{-1}$ ;  $\mu_{\text{C}_3\text{H}_8} = 44 \text{ кг}\cdot\text{кмоль}^{-1}$ ;  $\mu_{\text{N}_2} = 28 \text{ кг}\cdot\text{кмоль}^{-1}$ ;  $\mu_{\text{CO}_2} = 44 \text{ кг}\cdot\text{кмоль}^{-1}$ :

$$\mu_{\text{сеп}} = 16 \cdot 0,92 + 30 \cdot 0,045 + 44 \cdot 0,01 + 28 \cdot 0,02 + 44 \cdot 0,005 = 17,3 \text{ кг}\cdot\text{кмоль}^{-1}.$$

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 для особового складу у бойовому одязі  $q_{\text{кр}} = 4,2 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$ :

$$R = \sqrt{\frac{0,21 \cdot 34097}{4 \cdot 3,14 \cdot 4,2}} = 11,6 \text{ м}.$$

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 для особового складу в бойовому одязі від даного палаючого газового вертикального фонтана 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]. Якщо  $\frac{P_{\text{сис}}}{P_{\text{атм}}} < 2$  – режим витоку є докритичним, якщо  $\frac{P_{\text{сис}}}{P_{\text{атм}}} > 2$  – критичним. Масову витрату, з якою газ витікає через отвір, можна розрахувати за формулами:

• у докритичному режимі:

$$g_{\Gamma} = K_{\text{отв}} S_{\text{отв}} P_{\text{сис}} \sqrt{\frac{1}{R_{\text{пит}} T} \cdot \frac{2k}{k-1} \left[ \left( \frac{P_{\text{атм}}}{P_{\text{сис}}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P_{\text{атм}}}{P_{\text{сис}}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}; \quad (4.85)$$

• 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 ( $K_{\text{отв}} = 0,64$ );  $k$  – коефіцієнт адіабати 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, Па;  $P_{\text{атм}}$  – тиск у середовищі, в яке відбувається витік газу, Па;  $S_{\text{отв}}$  – площа отвору, через який витікає газ, м<sup>2</sup>;  $T$  – температура в системі подавання газу, К;  $R_{\text{пит}}$  – питома газова стала, Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>:

$$R_{\text{пит}} = \frac{R}{\mu_{\Gamma} \cdot 10^{-3}}, \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}, \quad (4.87)$$

де  $R$  – універсальна газова стала,  $R = 8,31 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ;  $\mu_{\Gamma}$  – молярна маса газу, що витікає, кг·кмоль<sup>-1</sup>.

За час витоку у навколишнє середовище надійде певна маса газу:

$$m_{\Gamma} = g_{\Gamma} \tau_{\text{вит}}, \text{ кг}, \quad (4.88)$$

де  $m_{\Gamma}$  – маса газу, що вийшла із пошкодженого обладнання, кг;  $g_{\Gamma}$  – масова витрата надходження газу, кг·с<sup>-1</sup>;  $\tau_{\text{вит}}$  – час витоку газу, с.

Маса газу, що надійшла до повітряного простору під час аварійної розгерметизації установки, визначає рівень вибухонебезпеки технологічного процесу повну кількість енергії, що може бути виділена під час згоряння:  $Q_{\text{сум}} = m_{\Gamma} Q'_{\text{н}}$ , кДж, де  $Q'_{\text{н}}$  – масова нижча теплота згоряння горючого газу, кДж·кг<sup>-1</sup>.

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, описує формула:

$$R_{\text{заг}} = 14,56 \left( \frac{m_r}{\rho_r \phi_n} \right)^{0,33}, \text{ м}, \quad (4.89)$$

де  $m_r$  – маса горючого газу, що надійшов до відкритого простору під час аварійної ситуації, кг;  $\rho_r$  – густина горючого газу за даних умов,  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ;  $\phi_n$  – об'ємна нижня концентраційна межа поширення полум'я горючого газу, %.

Зовнішня частина газоповітряної хмари має вибухонебезпечні концентрації горючого газу ( $\phi_n \geq \phi_r \geq \phi_v$ ). 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 досягає 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 (ТНТ),  $4520 \text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}$ .

Можливу руйнівну дію ударної хвилі під час вибуху можна оцінити за значенням надлишкового тиску  $\Delta P$  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 зовнішньому шарі зони загазованості. Всередині газоповітряної хмари концентрація горючої речовини може перевищувати верхню КМПП. 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:

$$m_{\Gamma} = \rho_{\Gamma} \frac{T_0 P_{\text{ан}} V_{\text{ан}}}{T_{\text{ан}} P_{\text{атм}}}, \text{ м}^3, \quad (4.91)$$

де  $\rho_{\Gamma}$  – густина газу за температури навколишнього середовища  $T_0$ ,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $T_{\text{ан}}$  – температура газу в апараті,  $\text{K}$ ;  $P_{\text{атм}}$  – атмосферний тиск,  $\text{kPa}$ ;  $P_{\text{ан}}$  – тиск газу в апараті,  $\text{kPa}$ ;  $V_{\text{ан}}$  – об'єм апарата,  $\text{м}^3$ .

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 (1.52):

2.3. Розрахувати тротиловий еквівалент вибуху 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  $\text{kPa}$ , атмосферний тиск – 101  $\text{kPa}$ , температура навколишнього середовища – 20  $^{\circ}\text{C}$ .

*Розв'язання*

1. Визначаємо молярну масу та нижню об'ємну КМПП етилену за довідником [7]:  $\mu_{C_2H_4} = 28 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ;  $\varphi_H = 3,2 \%$ .

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) з врахуванням питомої газової сталості:

$$R_{\text{пит}} = \frac{8,314}{28 \cdot 10^{-3}} = 296,9 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}.$$

$$g_r = 0,64 \cdot 3,14 (1,5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 150 \cdot 10^3 \times \\ \times \sqrt{\frac{1}{296,9 \cdot 293} \cdot \frac{2 \cdot 1,3}{1,3 - 1} \left[ \left( \frac{101 \cdot 10^3}{150 \cdot 10^3} \right)^{\frac{2}{1,3}} - \left( \frac{101 \cdot 10^3}{150 \cdot 10^3} \right)^{\frac{1,3+1}{1,3}} \right]} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

4. Розраховуємо масу газу, що вийшов із отвору за час витоку 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 витоку 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 витоку у навколишнє середовище метану об'ємом 1000 м<sup>3</sup>, якщо температура навколишнього середовища дорівнює 5 С, 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 КМПП метану за довідником [7]:  $\varphi_n = 5,28 \%$ .

1.2. Розраховуємо густину метану за даних умов за формулою (4.40):

$$\rho_r = \frac{16 \cdot 98}{2269 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 5)} = 0,68 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

1.3. Розраховуємо масу метану, що надійшов до повітряного простору за даних умов:

$$m_r = V_r \rho_r = 1000 \cdot 0,68 = 680 \text{ кг}.$$

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]:  $Q_n = 802 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ .

$$Q'_n = \frac{802 \cdot 1000}{16} = 50125 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

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:

$$R_{\text{руйн}}(\Delta P = 100 \text{ кПа}) = \frac{3,8 \cdot \sqrt[3]{680}}{\left[ 1 + \left( \frac{3180}{680} \right)^2 \right]^{\frac{1}{6}}} = 19,8 \text{ м};$$

• зона значних пошкоджень конструкцій, 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 виникла під час розгерметизації трубопроводу і витoku у навколишнє середовище 1000 м<sup>3</sup> 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 – 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 витoku пропану із пошкодженого шланга автозаправної колонки через отвір площею  $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$  протягом 15 хв. Робочий тиск колонки дорівнює  $2,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ , атмосферний тиск – 101 кПа,  $t_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### *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 витoku 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 витoku є критичним, витрату газу через отвір розраховуємо за формулою (4.86) з урахуванням питомої газової сталої:

$$R_{\text{шт}} = \frac{8,314}{44 \cdot 10^{-3}} = 189 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}.$$

$$g_{\text{г}} = 0,64 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 2,2 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{1}{189 \cdot 263} \cdot \frac{2 \cdot 1,3}{1,3 + 1} \left(\frac{2}{1,3 + 1}\right)^{\frac{2}{1,3 - 1}}} = 0,84 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

1.2. Розраховуємо масу газу, що надійшов до повітряного простору за 15хв. = 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):

$$R_{\text{вс}} = 2,66 \cdot 756^{0,327} = 23,3 \text{ м.}$$

2.2. Розраховуємо час життя вогненної сфери за формулою (4.54):

$$\tau_{\text{вс}} = 0,92 \cdot 756^{0,303} = 6,8 \text{ с.}$$

2.3. Розраховуємо радіус зони 50 % смертельного ураження людей випромінюванням вогненної сфери:

$$R_{\text{оп1}} = 2,3 \cdot 23,3 = 53,6 \text{ м.}$$

2.4. Розраховуємо радіус опіків шкіри:

$$R_{\text{оп2}} = 5,5 \cdot 23,3 = 128,1 \text{ м.}$$

Висновок: у разі згорання газової хмари, що утворилась під час витoku пропану з пошкодженого шлангу автозаправної колонки за даних умов, 50 % смертельного ураження людей випромінюванням вогненної сфери можливе на відстані до 53,6 м, опіки відкритих ділянок шкіри – 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.

Для визначення можливості виникнення горіння необхідно порівняти фактичну середню концентрацію горючого газу з нижньою КМПП цього газу. Середню фактичну концентрацію газу, що утворилася у приміщенні внаслідок аварійного натікання, можна розрахувати за формулами:



$$\varphi'_{\text{сер}} = \frac{m_{\Gamma}}{V_{\text{прим}}(1-\eta)} = \frac{m_{\Gamma}}{V_{\text{вільн}}}, \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}, \quad (4.92)$$

або

$$\varphi_{\text{сер}} = \frac{100m_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma} V_{\text{вільн}}}, \%, \quad (4.93)$$

де  $\varphi'_{\text{сер}}$ ,  $\varphi_{\text{сер}}$  – масова та об’ємна середня фактична концентрація газу у вільному об’ємі приміщення  $V_{\text{вільн}}$ ;  $m_{\Gamma}$  – маса газу, що надійшла до приміщення за час аварійної ситуації, кг;  $V_{\text{прим}}$  – загальний об’єм приміщення,  $\text{м}^3$ ;  $\eta$  – частка об’єму приміщення, що зайнята обладнанням або меблями.

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:

$$m_{\Gamma} = g_{\Gamma}^{\text{надх}} \tau, \quad (4.94)$$

де  $g_{\Gamma}^{\text{надх}}$  – масова витрата, з якою горючий газ надходить у приміщення,  $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}$ ; розраховують залежно від режиму вигоку за формулами (4.85) або (4.86);  $\tau$  – 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 КМПП:

$$\tau_{\text{нкмп}} = \frac{V_{\text{вільн}} \varphi'_{\text{н}}}{g_{\Gamma}^{\text{надх}}}, \text{ с}, \quad (4.95)$$

де  $\varphi'_{\text{н}}$  – масова нижня КМПП 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 вигоку газу через отвори із потоком повітря можна виразити диференціальним рівнянням:

$$\frac{dm_{\Gamma}}{d\tau} = V_{\text{вільн}} \frac{d\varphi'_{\Gamma}}{d\tau} = g_{\Gamma}^{\text{надх}} - g_{\Gamma\text{с}}^{\text{вит}} \frac{\varphi'_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma\text{с}}}, \quad (4.96)$$

де  $\varphi'_{\Gamma}$  – середня масова концентрація горючого газу у приміщенні на момент часу  $\tau$ ,  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ;  $g_{\Gamma\text{с}}^{\text{вит}}$  – 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);  $\rho_{\Gamma\text{с}}$  – 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:

$$m_r = \frac{g_r^{\text{надх}} \rho_{гс} V_{\text{вільн}}}{g_{гс}^{\text{виг}}} \left( 1 - e^{-\frac{g_{гс}^{\text{виг}} \tau}{\rho_{гс} V_{\text{вільн}}}} \right), \text{ кг.} \quad (4.97)$$

Вирішення рівняння матеріального балансу (4.96) у межах  $\tau = 0$ ,  $\varphi_r = 0$  та  $\tau = \tau_{\text{нкмпп}}$ ,  $\varphi_r = \varphi_n$  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:

$$\tau_{\text{нкмпп}} = \frac{V_{\text{вільн}} \rho_{гс}}{g_{гс}^{\text{виг}}} \ln \frac{g_r^{\text{надх}}}{g_r^{\text{надх}} - \frac{g_{гс}^{\text{виг}} \varphi_n'}{\rho_{гс}}}, \text{ с.} \quad (4.98)$$

Із формули (4.98) випливає, що за певних умов 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:

$$g_r^{\text{надх}} \leq \frac{g_{гс}^{\text{виг}} \varphi_n'}{\rho_{гс}}. \quad (4.99)$$

За певний час виходу горючого газу нижня КМПП 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:

$$X_{\text{нкмпп}} = 1,1314 \cdot L \cdot \sqrt{\ln \left( \frac{1,38 \varphi_0}{\varphi_n} \right)}, \text{ м,} \quad (4.100)$$

$$Y_{\text{нкмпп}} = 1,1314 \cdot F \cdot \sqrt{\ln \left( \frac{1,38 \varphi_0}{\varphi_n} \right)}, \text{ м,} \quad (4.101)$$

де  $L$  – довжина приміщення, м;  $F$  – ширина приміщення, м;  $\varphi_n$  – об'ємна нижня КМПП горючого газу, %;  $\varphi_0$  – передекспоненціальний множник, який визначають за емпіричними формулами:

- у нерухомому середовищі:

$$\varphi_0 = 3,77 \cdot 10^3 \frac{m_r}{\rho_r V_{\text{вільн}}} = 3,77 \cdot 10^3 \frac{\varphi'_{\text{сер}}}{\rho_r} = 37,7 \varphi_{\text{сер}}, \text{ \%}, \quad (4.102)$$

- 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:

$$H_{\text{нкмпн}} = kH \sqrt{\ln \left( \frac{1,38 \varphi_0}{\varphi_n} \right)}, \text{м}, \quad (4.104)$$

де  $H$  – висота приміщення,  $\text{м}$ ;  $k$  – коефіцієнт 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 умови, що горючий газ важчий за повітря, або до стелі за умови, що горючий газ легший за повітря,  $\text{м}$ .

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:

$$\tau_{\text{ДЗ}} = \frac{m_{\Gamma}}{g_{\Gamma}^{\text{надх}}} = 1,92 \cdot 10^{-4} \frac{\rho_{\Gamma} V_{\text{вільн}} \varphi_n}{g_{\Gamma}^{\text{надх}}} e^{\left( \frac{R}{1,1314 \cdot L} \right)^2}, \text{с}, \quad (4.106)$$

- у рухомому середовищі:

$$\tau_{\text{ДЗ}} = 2,4 \cdot 10^{-3} \frac{\rho_{\Gamma} V_{\text{вільн}} v_{\text{пов}} \varphi_n}{g_{\Gamma}^{\text{надх}}} e^{\left( \frac{R}{1,1314 \cdot L} \right)^2}, \text{с}, \quad (4.107)$$

де  $R$  – відстань від джерела витoku газу до умовного джерела запалювання,  $\text{м}$ .

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 лише зовнішня частина зони загазованості. Для приміщень у формі прямокутного паралелепіпеда з відношенням довжини до ширини не більше 5 за умови, що  $\varphi_{\text{сер}} < 0,5 \varphi_n$  коефіцієнт участі горючого газу у вибуху  $Z$  можна розраховувати за формулами:

- за умови, що  $X_{\text{нкмпн}} \leq 0,5L$  та  $Y_{\text{нкмпн}} \leq 0,5F$ :

$$z = \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot \pi}{m_g} \rho_g \left( \varphi_o + \frac{\varphi_n}{1,38} \right) X_{\text{нкмпп}} Y_{\text{нкмпп}} H_{\text{нкмпп}}; \quad (4.108)$$

- за умови, що  $X_{\text{нкмпп}} > 0,5L$  та  $Y_{\text{нкмпп}} > 0,5F$ :

$$z = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{m_g} \rho_g \left( \varphi_o + \frac{\varphi_n}{1,38} \right) S_{\text{підл}} H_{\text{нкмпп}}, \quad (4.109)$$

де  $m_g$  – маса горючого газу, що надходить до об’єму приміщення, кг;  $S_{\text{підл}}$  – площа підлоги приміщення, м<sup>2</sup>.

Для наближених розрахунків коефіцієнт участі газів у вибуху у приміщенні приймають для водню  $z = 1,0$ ; для інших горючих газів –  $z = 0,5$ .

Надлишковий тиск, що виникає в ударній хвилі, може спричинити руйнування будівель і технологічних установок, травмування і загибелі людей. До травмування і загибелі людей можуть призводити і вторинні явища вибухів, такі як ураження уламками будівельних конструкцій, скла, частинами технологічного обладнання та інше. Для надзвичайних ситуацій, що викликані вибухами, при оперативному прогнозуванні обстановки прийнято розглядати чотири ступеня руйнування будівель: слабкий, середній, сильний та повний (табл. 4.5). В таблиці 4.6 приведені інтервали тисків, що викликають той чи інший ступінь руйнування житлових, громадських і виробничих будівель при вибухах вибухових речовин та горючих сумішей.

Таблиця 4.5. Характеристика ступенів руйнування будівель

Ступінь руйнування	Характеристика руйнування
Слабкий	Часткове руйнування внутрішніх перегородок, покриття, дверних та віконних рам, легких конструкцій та ін. Основні несучі 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.

Таблиця 4.6. Ступінь руйнування будівель від надлишкового тиску вибуху горючих сумішей

Типи будівель	Ступінь руйнування і надлишковий тиск, кПа			
	Слабкий	Середній	Сильний	Повний
Цегляні та кам'яні: малоповерхові багатоповерхові.	8–20	20–35	35–50	50–70
	8–15	15–30	30–45	45–60
Залізобетонні крупнопанельні: малоповерхові багатоповерхові	10–30	30–45	45–70	70–90
	8–25	25–40	40–60	60–80
Залізобетонні монолітні: багатоповерхові, підвищеної поверховості	25–50	50–115	115–180	180–250
	25–45	45–105	105–170	170–215
Залізобетонні крупнопанельні з залізобетонним і металевим каркасом і крановим обладнанням вантажопід'ємністю в тоннах: до 50 від 50 до 100	5–30	30–45	45–75	75–120
	15–45	45–60	60–90	90–135
Будівлі зі стінами типу «сандвіч» і крановим обладнанням вантажопід'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

Таблиця 4.7. Критичні значення тисків, які викликають різні ступені руйнування окремих конструктивних елементів будівлі

$\Delta P$ , 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	Залізобетонні колони

### *Методика розрахунку параметрів надзвичайної ситуації при аварійному надходженні горючого газу у приміщення*

1. Визначити за довідником [7] або розрахувати за попередніми методами молярну масу, об'ємну нижню КМПП, молярну теплоту згоряння та максимальний тиск вибуху горючого газу.

2. Розрахувати густину газу, що надходить у 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 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 вигоку.

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 витoku 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 витoku, 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 витoku горючого газу із приміщення у процесі його аварійного надходження.

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, 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 « $z$ » 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  $3 \times 4 \times 2,5$  м за умов аварійного виходу метану протягом 10 хв. із пошкодженої магістралі газової плити. Діаметр отвору, через який витікає газ, - 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  $25^\circ\text{C}$ , температура повітря зовні  $-0^\circ\text{C}$ , атмосферний тиск - 101,3 кПа.

*Розв'язання*

1. Визначаємо за довідником [7] молярну масу та об'ємну нижню КМПП 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 вигоку 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 вигоку 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  $k = 1,3$ .

$$g_{\text{r}}^{\text{надх}} = 0,64 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot 140 \cdot 10^3 \times$$

$$\times \sqrt{\frac{1}{520 \cdot 298} \left( \frac{2 \cdot 1,3}{1,3 - 1} \right) \left[ \left( \frac{101,3}{140} \right)^{\frac{2}{1,3}} - \left( \frac{101,3}{140} \right)^{\frac{1,3+1}{1,3}} \right]} = 4,4 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

3.2. Розраховуємо масову витрату, з якою газоповітряна суміш виходить із приміщення через відкритий отвір, за формулою (4.31).

Площа відкритого отвору:  $S_{\text{отв}} = 0,5 \cdot 1,2 = 0,6 \text{ м}^2$ .

$$g_{\text{пов}}^{\text{внт}} = \frac{2}{3} \cdot 0,65 \cdot 0,6 \sqrt{\frac{2 \cdot 9,8 \cdot 1,2 \cdot 1,3 \cdot 1,18(1,3 - 1,18)}{(\sqrt[3]{1,3} + \sqrt[3]{1,18})^3}} = 0,17 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

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 накопився у приміщенні за 10 хв. аварійного вибою за наявності газообміну через відкритий отвір, за формулою (4.97):

$$m_{\text{г}} = \frac{4,4 \cdot 10^{-4} \cdot 1,18 \cdot 27}{0,17} \left( 1 - e^{-\frac{0,17 \cdot 600}{1,18 \cdot 27}} \right) = 7,9 \cdot 10^{-2} \text{ кг}.$$

4. Розраховуємо середню фактичну концентрацію метану, що утворилася у вільному об'ємі приміщення за час вибою, за формулою (4.93):

$$\varphi_{\text{сер}} = \frac{100 \cdot 7,9 \cdot 10^{-2}}{0,65 \cdot 27} = 0,45 \text{ \%}.$$

Отже середня концентрація метану за даних умов є меншою за нижню КМПП  $\varphi_{\text{н}} = 5,28 \text{ \%}$ , тому середня фактична концентрація метану є безпечною.

5. Визначимо, чи можливе виникнення вибухонебезпечної загазованості приміщення за даних умов вибою метану і 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  $\frac{g_{\text{гс}}^{\text{внт}} \varphi'_{\text{н}}}{\rho_{\text{гс}}}$  і порівнюємо його з масовою витратою метану, що надходить у приміщення внаслідок аварійної ситуації:

$$\frac{g_{\text{гс}}^{\text{внт}} \varphi'_{\text{н}}}{\rho_{\text{гс}}} = \frac{0,17 \cdot 0,035}{1,18} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1} > 4,4 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Отже, за даних умов вибою 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 метану 0,45 %, яка є безпечною. За даних умов вибою 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 нижньої КМПП за умови аварійного виходу метану через пошкодження магістралі газової плити площею  $1 \text{ см}^2$ , якщо тиск у системі подавання газу дорівнює  $140 \text{ кПа}$ ,  $10\%$  об'єму приміщення зайнято меблями, 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 КМПП за умови, що вікно закрито. Температура повітря у приміщенні дорівнює  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , атмосферний тиск –  $101,3 \text{ кПа}$ .

*Розв'язання*

1. Визначаємо за довідником [7] молярну масу та об'ємну нижню КМПП метану:  $\mu_{\text{CH}_4} = 16 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ;  $\varphi_{\text{н}} = 5,28\%$ .

2. Розраховуємо густину метану і газоповітряної суміші у приміщенні за формулою (4.39):

$$\rho_{\text{CH}_4} = \frac{16}{22,4(1 + 0,00367 \cdot 25)} = 0,65 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$\rho_{\text{пов}}^{25^\circ\text{C}} = \frac{29}{22,4(1 + 0,00367 \cdot 25)} = 1,18 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

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 КМПП  $\varphi'_{\text{н}}$  метану за даних умов:

$$\varphi'_{\text{н}} = \frac{5,28 \cdot 0,65}{100} = 0,034 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

5. Розраховуємо масову витрату метану, що надходить у приміщення, з урахуванням, що режим витоку є докритичним, питома газова стала метану дорівнює  $520 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , а коефіцієнт політропи  $k = 1,3$ .

$$g_{\text{Г}}^{\text{надх}} = 0,64 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 140 \cdot 10^3 \times \\ \times \sqrt{\frac{1}{520 \cdot 298} \left( \frac{2 \cdot 1,3}{1,3 - 1} \right) \left[ \left( \frac{101,3}{140} \right)^{\frac{2}{1,3}} - \left( \frac{101,3}{140} \right)^{\frac{1,3+1}{1,3}} \right]} = 0,014 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

6. Розраховуємо час, за який середня концентрація метану в об'ємі приміщення досягне значення нижньої КМПП з урахуванням витоку газу із приміщення у процесі його аварійного надходження, за формулою (4.98):

$$\tau_{\text{нкмпп}} = \frac{27 \cdot 1,18}{0,17} \ln \frac{0,014}{0,014 - \frac{0,17 \cdot 0,034}{1,18}} = 81 \text{ с}.$$

7. Розраховуємо час, за який середня концентрація метану в об'ємі приміщення досягне значення нижньої КМПП за умови відсутності витoku газу із приміщення, за формулою (4.95):

$$\tau_{\text{нкмпп}} = \frac{27 \cdot 0,034}{0,014} = 66 \text{ с.}$$

Висновок: у даному приміщенні за умови аварійного виходу метану через пошкодження магістралігазової плити середня концентрація горючого газу досягне значення нижньої КМПП через 81 с з урахуванням витoku газу із приміщення або через 66 с за умови відсутності витoku газу із приміщення.

### *Приклад розв'язання задачі*

Під час проведення газозварювальних робіт у приміщенні розмірами  $4 \times 10 \times 3$  м через нещільності переносного ацетиленового генератора виходить газ із 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 КМПП, 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. У приміщенні температура повітря дорівнює  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , швидкість руху повітря –  $0,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , атмосферний тиск –  $101,3 \text{ кПа}$ .

### *Розв'язання*

1. Визначаємо молярну масу та нижню концентраційну межу поширення полум'я ацетилену за довідником [7]:  $\mu_{\text{C}_2\text{H}_2} = 26 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ;  $\varphi_{\text{н}} = 2,5 \text{ \%}$ .

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 КМПП, 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  $4 \times 12 \times 2,8$  м біля електричного вимикача, який знаходиться на висоті 1,7 м від підлоги, якщо промишлова 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  $10^\circ\text{C}$ , атмосферний тиск – 100 кПа, швидкість руху повітря у приміщенні внаслідок інфільтрації дорівнює  $0,2 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ .

*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):

$$\rho_{\text{C}_3\text{H}_6} = \frac{42}{22,4(1 + 0,00367 \cdot 10)} = 1,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}.$$

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:  $\frac{P_{\text{сис}}}{P_{\text{атм}}} = \frac{1400}{100} = 14 > 2$ .

Отже, режим витоку є критичним; витрату газу через отвір розраховуємо за формулою (4.86) з використанням питомої газової сталої; пропілен є багатомним газом, тому коефіцієнт політропи  $k = 1,3$ .

$$R_{\text{пит}} = \frac{8,314}{42 \cdot 10^{-3}} = 198 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}.$$

$$g_{\text{г}}^{\text{надх}} = 0,64 \cdot 3,14 (0,5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1,4 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{1}{198 \cdot 283} \left( \frac{2 \cdot 1,3}{1,3 + 1} \right) \left( \frac{2}{1,3 + 1} \right)^{\frac{2}{1,3 - 1}}} = 0,002 \text{ кг}\cdot\text{с}^{-1}.$$

3.2. Оскільки у приміщенні немає відкритих отворів і не працює промишлова вентиляція, прийемо, що витікання горючого газу із приміщення не відбувається. Розраховуємо масу пропілену, що надійшов до приміщення за 2 хв. = 120 с, за формулою (4.94):

$$m_{\text{г}} = 0,002 \cdot 120 = 0,24 \text{ кг}.$$

4. Розраховуємо середню концентрацію газу, що утворилася у приміщенні за час витоку, за формулою (4.93):

$$V_{\text{вільн}} = (1 - 0,25) 12 \cdot 4 \cdot 2,8 = 100,8 \text{ м}^3.$$

$$\Phi_{\text{сер}} = \frac{100 \cdot 0,24}{1,8 \cdot 100,8} = 0,13 \%$$

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  $\phi_0$  за формулою (4.103):

$$\phi_0 = \frac{3 \cdot 0,13}{0,2} = 1,95 \%$$

5.2. Розраховуємо горизонтальні розміри зони вибухонебезпечної загазованості за формулами (4.100) та (4.101):

$$X_{\text{нкмп}} = 1,1314 \cdot 4 \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{1,38 \cdot 1,95}{2,4}\right)} = 1,5 \text{ м.}$$

$$Y_{\text{нкмп}} = 1,1314 \cdot 12 \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{1,38 \cdot 1,95}{2,4}\right)} = 4,6 \text{ м;}$$

5.3. Розраховуємо вертикальний розмір зони загазованості за формулою (4.105):

$$Z_{\text{нкмп}} = 0,02828 \cdot 2,8 \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{1,38 \cdot 1,95}{2,4}\right)} = 0,03 \text{ м;}$$

$$H_{\text{нкмп}} = 1,1 + 0,03 = 1,13 \text{ м.}$$

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 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 КМПП, молярну теплоту згоряння і молярну масу компонентів пропан-бутанової суміші:

пропан:  $\phi_{\text{н}} = 2,3 \%$ ;  $Q_{\text{н}} = 2044 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ ;  $\mu = 44 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ;

бутан:  $\phi_{\text{н}} = 1,8 \%$ ;  $Q_{\text{н}} = 2657 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ ;  $\mu = 58 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ .

2. Розраховуємо нижню КМПП суміші за її відсотковим складом та значенням нижньої КМПП компонентів за формулою (3.10):

$$\varphi_{\text{нсум}} = \frac{60 + 40}{\frac{60}{2,3} + \frac{40}{1,8}} = 2,07\%$$

3. Розрахуємо 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, 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, її частина ( $12 \text{ л} = 0,012 \text{ м}^3$ ) 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):

$$\varphi_{\text{сер}} = \frac{5,97}{2,06 \cdot 129,6} 100 = 2,24\%$$

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 на підставі молярної теплоти згоряння за формулою (1.52) та масових часток компонентів у суміші:

$$Q'_{\text{нс}_3\text{H}_8} = \frac{2044 \cdot 1000}{44} = 46454 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}; \quad Q'_{\text{нс}_4\text{H}_{10}} = \frac{2657 \cdot 1000}{58} = 45810 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1};$$

$$g_{\text{C}_3\text{H}_8} = \frac{0,6 \cdot 44}{0,6 \cdot 44 + 0,4 \cdot 58} = 0,53; \quad g_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = \frac{0,4 \cdot 58}{0,6 \cdot 44 + 0,4 \cdot 58} = 0,47;$$

$$Q'_{\text{н,сум}} = 46454 \cdot 0,53 + 45810 \cdot 0,47 = 46048 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

8.2. Розраховуємо надлишковий тиск вибуху за формулою (4.71). Приймаємо, що теплоємність повітря дорівнює  $1,01 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , а коефіцієнт участі газів у вибуху у приміщенні  $z = 0,5$ .

$$\Delta P = \frac{100 \cdot 46048 \cdot 5,97 \cdot 0,5}{129,6 \cdot 1,2 \cdot 1,01 \cdot 293 \cdot 3} = 99,5 \text{ кПа}.$$

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 КМПП та максимальний тиск вибуху водню за довідником [7]:  $\varphi_{\text{н}} = 4,1 \%$ ;  $P_{\text{max}} = 730 \text{ кПа}$ .

2. Розраховуємо густину водню, що вийшов у приміщення за даних умов, за формулою (4.39):

$$\rho_{\text{H}_2} = \frac{2}{22,4(1 + 0,00367 \cdot 20)} = 0,083 \text{ кг} \cdot \text{м}^3.$$

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):

$$m_{\text{H}_2} (\text{реакт}) = 0,083 \frac{0,09 \cdot 200 \cdot 293}{1473 \cdot 101,3} = 0,003 \text{ кг}.$$

3.2. Розраховуємо масу водню, що надійшов у приміщення із трубопро-

воду. 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 вигоку є критичним:

$$R_{\text{пит}} = \frac{8,314}{2 \cdot 10^{-3}} = 4157 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}.$$

$$g_{\text{H}_2}^{\text{надх}} = 0,64 \cdot 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot 3 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{1}{4157 \cdot 293} \cdot \frac{2 \cdot 1,4}{1,4 + 1} \left( \frac{2}{1,4 + 1} \right)^{\frac{2}{1,4 - 1}}} = 0,006 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

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):

$$m_{\text{H}_2}(\text{гр.}) = 0,083 \frac{15 \cdot 3,14 \cdot 0,01^2 \cdot 300 \cdot 293}{293 \cdot 101,3} = 0,001 \text{ кг}.$$

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):

$$\Phi_{\text{сер}} = \frac{100 \cdot 0,724}{0,083 \cdot 1134} = 0,77 \text{ \%}.$$

Середня концентрація водню у приміщенні є меншою, за його нижню концентраційну межу поширення полум'я ( $\phi_n = 4,1 \text{ \%}$ ), 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):

$$\Phi_0 = \frac{3 \cdot 0,77}{0,1} = 23,1 \text{ \%}.$$

6.2. Розраховуємо горизонтальні розміри зони вибухонебезпечної загазованості за формулами (4.100) та (4.101):

$$X_{\text{нкмш}} = 1,1314 \cdot 14 \sqrt{\ln \left( \frac{1,38 \cdot 23,1}{4,1} \right)} = 22,7 \text{ м},$$

$$Y_{\text{нкмпп}} = 1,1314 \cdot 18 \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{1,38 \cdot 23,1}{4,1}\right)} = 29,1 \text{ м.}$$

6.3. Розраховуємо висоту зони вибухонебезпечних концентрацій за формулою (4.104):

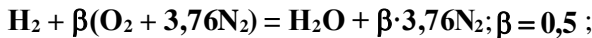
$$H_{\text{нкмпп}} = 0,02828 \cdot 6 \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{1,38 \cdot 23,1}{4,1}\right)} = 0,24 \text{ м.}$$

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  $Y_{\text{нкмпп}} > 0,5F$ :

$$z = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{0,724} \cdot 0,083 \left( 23,1 + \frac{4,1}{1,38} \right) 14 \cdot 18 \cdot 0,24 = 0,92$$

8. Розраховуємо надлишковий тиск вибуху газоповітряної хмари, що утворюється у приміщенні внаслідок аварійної ситуації.

8.1. Розраховуємо стехіометричну концентрацію реакції горіння водню за формулою (1.8):



$$\varphi_{\text{стм}} = \frac{100}{1 + 0,5 \cdot 4,76} = 29,6 \text{ \%}.$$

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 з коефіцієнтом повноти згоряння 0,85 та параметрами, наведеними у таблиці, розрахувати безпечну відстань від факела:
- для людей без захисного одягу;
  - для особового складу у бойовому одязі;
  - для пожежної техніки.

№	Склад газового фонтана, об. %				Дебіт, млн. м <sup>3</sup> ·доба <sup>-1</sup>	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

2\*. Визначити безпечну відстань розташування біля газового фонтана, що горить, пожежної техніки й особового складу у бойовому одязі. Склад газового фонтана: CH<sub>4</sub> – 85 %, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> – 4 %, N<sub>2</sub> – 2 %, CO<sub>2</sub> – 9 %. Висота факела дорівнює 10 м, висота зони відриву – 1,5 м, кут нахилу – 25°.

3\*. 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.

4. Для наведених горючих газів, які через нещільність системи заданого розміру надходять певний час у навколишнє середовище з пошкодженого апарату, який працював за відомих температури та тиску, розрахувати такі параметри надзвичайної ситуації:

- а) радіус зони вибухонебезпечної загазованості; б) надлишковий тиск в ударній хвилі вибуху на заданій відстані від місця вибою газу;  
в) радіус зон ураження ударною хвилею вибуху;  
г) радіус ураження людей випромінюванням «вогневої сфери».

№	Газ	Діаметр отвору, мм	Тиск в апараті, кПа	t в апараті, °C	Час вибою газу, хв.	t <sub>0</sub> , °C	P <sub>0</sub> , кПа	Відстань від місця вибою 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
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	етилену оксид	11	380	120	16	5	102,5	40
35	формамід	12	390	130	15	15	103,5	41

5. Для наведених горючих газів, витік яких стався у навколишнє середовище внаслідок повного аварійного руйнування технологічного апарата, який працював за відомих температури та тиску, 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.

№	Газ	Об'єм апарата, м <sup>3</sup>	Тиск в апараті, кПа	Температура газу в апараті, °С	t <sub>0</sub> , °С	P <sub>0</sub> , 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
14	етилен	300	300	60	35	100,5
15	етилен	50	250	20	15	96,5
16	пропан	2000	130	250	40	101,5
17	пропан	700	500	350	20	102,5
18	пропан	350	800	0	-5	103,5
19	пропілен	2300	160	140	20	104,5
20	пропілен	750	220	70	0	101,3
21	пропілен	250	520	50	0	103,5
22	аміак	1000	170	50	20	103
23	аміак	400	130	0	-20	104
24	аміак	150	170	200	20	101
25	епоксіетан	1300	260	300	-15	97,5
26	епоксіетан	550	350	35	5	98,5
27	епоксіетан	250	150	120	-5	99,5
28	оксид карбону (II)	1700	300	60	35	100,5
29	оксид карбону (II)	300	800	0	-5	103,5
30	оксид карбону (II)	350	200	100	15	96

6\*. Для силану SiH<sub>4</sub>, витік якого стався у навколишнє середовище внаслідок повного аварійного руйнування технологічного апарата об'ємом 300 м<sup>3</sup>, 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<sub>атм</sub> = 100 кПа, T<sub>0</sub> = 280 К.

7. Для наведених 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 КМПП за даних умов газообміну.

№	Газ	Діаметр отвору в трубі, мм	Параметри приміщення				Розміри вікна		Температура, °С		Час витoku газу, хв.	Тиск у системі, кПа
			L, м	F, м	H, м	η	h, м	b, м	назовні	у приміщенні		
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
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

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

8. Для горючого газу, що надходять за стандартних умов унаслідок аварійної ситуації в ізольоване приміщення з заданими параметрами, розрахувати:
- чи буде досягнута за час аварійного витoku вибухонебезпечна концентрація газу біля джерела запалювання (ДЗ) на заданій відстані від місця витoku газу;
  - за який час утвориться вибухонебезпечна концентрація газу біля джерела запалювання, що знаходиться на заданій відстані від місця витoku газу;
  - розміри зони вибухонебезпечної загазованості на заданий час розвитку аварійної ситуації.

№	Газ	Діаметр отвору витoku, мм	Параметри приміщення				Швидкість руху повітря, м·с <sup>-1</sup>	Висота місця 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	бутан	2,7	4	3	2,7	0,20	0,1	1,2	10	2,0	400
9	бутан	8	5	4	3	0,25	0	1,3	10	2,0	950
10	бутан	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
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

9\*. 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 вибою 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 вибою.

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.

10\*. У закритому приміщенні компресорної станції розмірами  $8 \times 6 \times 3$  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 вибою вибухонебезпечна концентрація метану біля джерела запалювання, що знаходиться на відстані 3 м від місця вибою 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 загального об'єму.

11\*. 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  $3 \text{ см}^2$  із технологічної системи, яка складається з реактора об'ємом  $3 \text{ м}^3$  та вхідного трубопроводу довжиною 10 м і діаметром 4 см. Тиск у реакторі дорівнює 900 кПа. Час автоматичного аварійного вимкнення подачі газу дорівнює 180 с.

Прийняти, що 30 % приміщення зайнято обладнанням, температура пропану у технологічному реакторі дорівнює  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , у трубопроводі –  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Тиск у трубопроводі дорівнює 500 кПа. Рух повітря у приміщенні відбувається зі швидкістю  $0,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Атмосферний тиск дорівнює 101,3 кПа, температура повітря –  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

12. 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.

№	Газ	Параметри приміщення				Швидкість руху повітря, м/с	Температура в апараті, °С	Тиск в апараті, $P \cdot 10^{-5}$ Па	Об'єм апарата, $m^3$
		L, м	F, м	H, м	$\eta$				
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
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

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:  $T = 299$  К,  $P = 100$  кПа.

Розділ 4. Параметри розвитку пожежі

14. Розрахувати тиск вибуху при надзвичайній ситуації, що сталася в ізолюваному 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, атмосферний тиск наведено у таблиці.

№	Газ	Склад суміші, %, (об. %)	P <sub>0</sub> , кПа	Швидкість руху повітря, м/с	Параметри приміщення				Тиск в апараті, P·10 <sup>-5</sup> Па	Об'єм апарата, м <sup>3</sup>
					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								



## 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:*

$$q(+)=Q_n\varphi_{гр}^n\varphi_{ок}^m k_o \exp\left(-\frac{E_{акт}}{RT}\right),$$

де  $Q_n$  – нижча теплота згоряння горючої речовини;  $\varphi_{гр}$  – концентрація горючої речовини;  $\varphi_{ок}$  – концентрація окисника;  $m, n$  – стехіометричні коефіцієнти відповідно при горючій речовині й окиснику в реакції горіння;  $k_o$  – константа швидкості хімічної реакції;  $E_{акт}$  – енергія активації;  $R$  – універсальна газова стала;  $T$  – температура системи.

За температур вищих, за температуру самоспалахування, поступово відбувається зниження концентрації реагентів унаслідок їх вигорання. За рахунок цього швидкість хімічної реакції та інтенсивність тепловиділення за температур, близьких до температури горіння, прагнуть не до нескінченності, а асимптотично наближаються до деякого максимального значення. Тому функція  $q(+)=f(T)$  має точку перегину, рис. 5.1.

*Інтенсивність тепловіддачі від поверхні фронту полум'я визначається променистою і конвективною теплопередачею й описується рівнянням:*

$$q(-)=\alpha S_{ТВ}(T_{гор}-T_o)+\sigma\varepsilon S_{ТВ}(T_{гор}^4-T_o^4),$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт конвекційної теплопередачі;  $S_{ТВ}$  – площа тепловіддачі;  $\sigma$  – стала Больцмана;  $\varepsilon$  – ступінь чорноти полум'я;  $T_{гор}$  – температура у фронті полум'я;  $T_o$  – 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 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.

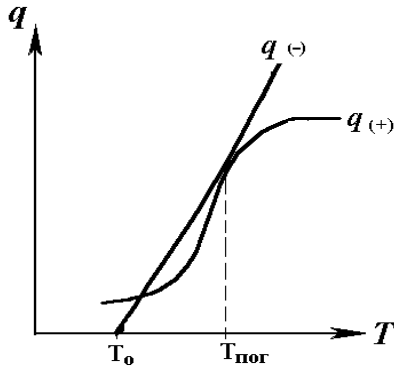


Рис. 5.1 – Графічне відображення критичних умов припинення горіння

Припинення горіння в системі відбудеться за умови зниження температури у зоні реакції горіння на деяку критичну величину  $\Delta T$ . Максимально можливий розмір зниження температури залежить від режиму горіння. Так, за умови дифузійного горіння температура погасання дорівнює:

$$T_{\text{пог}} = T_{\text{ад}} - \frac{3RT_{\text{ад}}^2}{E_{\text{акт}}}, \text{ К}, \quad (5.1)$$

а за умови кінетичного горіння: 
$$T_{\text{пог}} = T_{\text{ад}} - \frac{RT_{\text{ад}}^2}{E_{\text{акт}}}, \text{ К}, \quad (5.2)$$

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 шляхом 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, шляхом зменшення швидкості або припинення надходження окисника чи горючої речовини в зону горіння або додавання в систему негорючих компонентів;

- збільшення енергії активації горючої системи шляхом додавання інгібіторів;
- зниження температури середовища навколо зони горіння шляхом подавання речовин з низькою температурою, високою теплоємністю і теплотою фазового переходу;
- збільшення коефіцієнтів тепловіддачі шляхом інтенсифікації надходження 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) зони горіння до температури, меншої за температуру погасання; 1.2) поверхні конденсованої горючої речовини до температури, меншої за критичну (для рідин – температура спалаху, для твердих горючих матеріалів – температура піролізу).

2. Розбавлення: 2.1) зони горіння негорючими розріджувачами; 2.2) горючих рідин взаємно розчинними негорючими домішками.

3. Ізоляція: 3.1) горючої речовини від зони горіння; 3.2) окисника від зони горіння; 3.3) зони горіння як джерела запалювання від горючої суміші.

4. Хімічне гальмування реакції горіння.

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 пожежі 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 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 інгібують*.

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. Визначальною умовою вибору вогнегасного засобу є клас пожежі.

**Забораються** 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.

Існують **параметри пожежогасіння**, які описують процес припинення горіння та подавання вогнегасних засобів; їх використовують для визначення показників роботи підрозділів під час гасіння пожежі, вибору вогнегасного засобу, вирішального напрямку, прийомів і способів подавання вогнегасного засобу. Такими показниками є час гасіння, вогнегасна ефективність, інтенсивність подавання, 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 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:

$$G = \frac{m}{\Pi_{\text{пож}}}, \quad (5.4)$$

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 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).

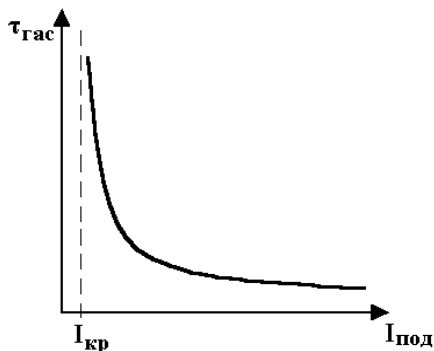


Рис. 5.2 – Залежність часу гасіння від інтенсивності подавання вогнегасного засобу

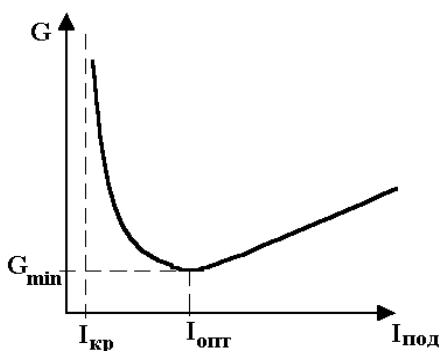


Рис. 5.3 – Залежність загальної витрати вогнегасного засобу від інтенсивності його подавання

Залежність загальної витрати від інтенсивності подавання вогнегасної речовини має більш складний характер, 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, 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. 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 *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  $\tau$  – 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 ефективне їх застосування для 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, рис. 5.4. 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.

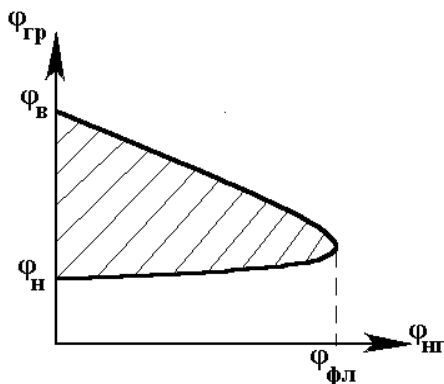


Рис. 5.4 – Залежність області займання від концентрації негорючого газу в суміші «горюча речовина – окисник – негорючий газ»

Негорючі гази можуть бути використані для запобігання виникненню горіння в замкнених об'ємах. Запобігання утворенню горючого середовища в газовому просторі за допомогою газів-розріджувачів називають *флегматизацією*. Флегматизацію використовують для забезпечення безаварійної роботи технологічного устаткування та під час пуску або зупинення обладнання, де 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).

**Флегматизуюча концентрація** – це найменша концентрація негорючого газу в суміші горючої речовини та окисника, 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 [37]:

$$\Phi_{\text{фл}} = \frac{100F}{F + \gamma \left( 1 + \frac{\Phi_{\text{O}_2}}{100\beta_{\text{CO}}} \right)}, \% \quad (5.11)$$

де  $\gamma$  – емпіричний параметр, див. табл. 5.1;  $\Phi_{\text{O}_2}$  – концентрація кисню в окисному середовищі, %;  $\beta_{\text{CO}}$  – стехіометричний коефіцієнт кисню в реакції згоряння речовини до CO та H<sub>2</sub>O ( $\beta_{\text{CO}} = 0,5n_{\text{C}} + 0,25n_{\text{H}} - 0,5n_{\text{O}}$ , де  $n_{\text{C}}$ ,  $n_{\text{H}}$ ,  $n_{\text{O}}$  – 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<sup>-1</sup>;  $h_{\text{f}}$  – коефіцієнт,  $h_{\text{f}} = 0,0258$  моль·кДж<sup>-1</sup>; j – тип атома в молекулі горючої речовини;  $h_j$  – коефіцієнт j-го типу атома в молекулі горючої речовини ( $h_{\text{C}} = 2,373$ ;  $h_{\text{H}} = 2,757$ ;  $h_{\text{O}} = -0,522$ ;  $h_{\text{N}} = -0,494$ );  $n_j$  – число атомів j-го типу в горючій речовині.

Таблиця 5.1 – Емпіричний параметр  $\gamma$  для визначення флегматизуючої концентрації різних газів-розріджувачів

Флегматизатор	$\gamma$	Флегматизатор	$\gamma$	Флегматизатор	$\gamma$
N <sub>2</sub>	1,0	SF <sub>6</sub>	3,9	C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>	6,1
H <sub>2</sub> O	1,2	CCl <sub>4</sub>	4,8	C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>	4,3
CO <sub>2</sub>	1,6	CFCl <sub>3</sub>	4,0	C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>	2,7
C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> Br <sub>2</sub>	21,3	CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	4,5	C <sub>3</sub> HF <sub>7</sub>	3,0
CF <sub>3</sub> Br	16,2	C <sub>2</sub> F <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub>	5,6	C <sub>2</sub> HF <sub>5</sub>	2,5
CF <sub>3</sub> I	15,5	C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>	6,0	CHF <sub>3</sub>	1,6
CF <sub>4</sub>	2,4	C <sub>2</sub> F <sub>5</sub> Cl	6,0	-	-
C <sub>2</sub> F <sub>5</sub> I	5,6	CHF <sub>2</sub> Cl	3,3	-	-

Концентрацію горючої речовини в суміші, склад якої відповідає точці флегматизації, розраховують за формулою:



$$\Phi_{\text{ГР(фл)}} = \frac{100 - \Phi_{\text{фл}}}{1 + \frac{100\beta_{\text{CO}}}{\Phi_{\text{O}_2}}}, \% \quad (5.13)$$

Унаслідок флегматизації концентрація окисника в системі стає меншою, ніж критичне значення, при цьому концентрація кисню зменшується до **мінімальної вибухонебезпечної концентрації кисню**. Мінімальний вибухонебезпечний вміст кисню в потрійній суміші «горюча речовина – окисник – флегматизатор» розраховують за формулою:

$$\Phi_{\text{МВКК}} = \frac{\Phi_{\text{O}_2}}{100} (100 - \Phi_{\text{фл}} - \Phi_{\text{ГР(фл)}}), \% \quad (5.14)$$

Відносна середня квадратична похибка розрахунку за формулами (5.11) і (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 [30] можна розрахувати за формулою:

$$\Phi_{\text{фл}} = 100 \frac{h_f \Delta H_f^0 + h'_f + \sum_j h'_j m_j}{h''_f - 1 + \sum_j h''_j m_j}, \% \quad (5.115)$$

де  $\Delta H_f^0$  – стандартна теплота утворення горючої речовини в газоподібному стані, кДж·моль<sup>-1</sup>;  $h_f$  – коефіцієнт при теплоті утворення горючої речовини, моль·кДж<sup>-1</sup>;  $j$  – тип атома в молекулі горючої речовини;  $m_j$  – число атомів  $j$ -го типу в горючій речовині;  $h'_f$  та  $h''_f$  – коефіцієнти для даного флегматизатора;  $h'_j$  і  $h''_j$  – коефіцієнти  $j$ -го типу для даного флегматизатора (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Коефіцієнти формули (5.115) визначення флегматизуючої концентрації негорючих газів

Коефіцієнти	Значення коефіцієнтів при розведенні суміші		
	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O (пара)	CO <sub>2</sub>
$h_f$	0,865·10 <sup>-2</sup>	0,802·10 <sup>-2</sup>	0,736·10 <sup>-2</sup>
$h'_f$	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
$h''_f$	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

Якщо флегматизується паро- або газоповітряна суміш декількох горючих речовин, то замість значень  $\Delta H_f$  і  $m_j$  використовують середню теплоту утворення горючих складових суміші та середнє число атомів даного типу, які розраховують як узагальнені параметри для суміші горючих газів за формулами (3.17) і (3.18).

**Мінімальну вибухонебезпечну концентрацію кисню** можна пов'язати з флегматизуючою формулою:

$$\varphi_{\text{МВКК}} = 2,09 \cdot 10^{-3} \left( 100 - \varphi_{\text{ф.л}} \right) \left( 100 - E \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{атм}}} \right), \% \quad (5.126)$$

де  $E$  – відносна вологість повітря за даних умов, %;  $p_{\text{H}_2\text{O}}$  – парціальний тиск пари води за даних умов, кПа;  $P_{\text{атм}}$  – атмосферний тиск, кПа.

За стандартних умов (температура повітря – 25 °С, атмосферний тиск – 101,3 кПа, відносна вологість повітря – 70 %) формулу (5.126) набуває вигляду:

$$\varphi_{\text{МВКК}} = \frac{100 - \varphi_{\text{ф.л}}}{4,86}, \% \quad (5.137)$$

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 теплоємності 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:

$$\varphi'_{\text{ф.л}} = \varphi_{\text{ф.л}} \frac{\mu_{\text{нг}}}{100V_{\mu}}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (5.15)$$

де  $\mu$  – молярна маса газу флегматизатора;  $V_{\mu}$  – молярний об'єм моль газу.

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 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  $\phi'_{нг}$  на момент часу гасіння  $\tau_i$ .

Рівняння матеріального балансу негорючого газу, поданого у приміщення, можна виразити наступним диференціальним рівнянням:

$$V_{\text{ввл}} d\phi'_{нг} = g_{нг}^{\text{под}} d\tau_{\text{под}} - \frac{g_{гс}^{\text{вит}}}{\rho_{гс}} \phi'_{нг} d\tau_{\text{под}}, \quad (5.160)$$

де  $V_{\text{ввл}}$  – вільний об'єм приміщення, в якому відбувається гасіння пожежі,  $V_{\text{вільн}} = V_{\text{прим}}(1 - \eta)$ ,  $\text{м}^3$  ( $\eta$  – частка об'єму приміщення, яка зайнята меблями та обладнанням);  $\phi'_{нг}$  – середня масова концентрація негорючого газу у приміщенні на момент часу подавання  $\tau_{\text{под}}$ ,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $g_{нг}^{\text{под}}$  – масова витрата, з якою подають негорючий газ у приміщення,  $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $g_{гс}^{\text{вит}}$  – масова витрата, з якою газова суміш витікає із приміщення,  $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $\rho_{гс}$  – густина газової суміші, що витікає із приміщення через отвори та має температуру 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 витіку. 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 (5.160) у межах  $\tau_{\text{под}} = 0$ ,  $\phi'_{нг} = 0$  та  $\tau_{\text{под}} = \tau_{\text{гас}}$ ,  $\phi'_{нг} = \phi'_{\text{вогн}}$  дає вираз для розрахунку часу гасіння пожежі у приміщенні з урахуванням витіку негорючого газу назовні у процесі його подавання:

$$\tau_{\text{гас}} = \frac{V_{\text{ввл}} \rho_{гс}}{g_{гс}^{\text{вит}}} \ln \frac{g_{нг}^{\text{под}}}{g_{нг}^{\text{под}} - \frac{g_{гс}^{\text{вит}}}{\rho_{гс}} \phi'_{\text{вогн}}}, \quad (5.171)$$

де  $\phi'_{\text{вогн}}$  – масова **вогнегасна концентрація** як 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 (5.17) дорівнює нулю, то час гасіння прямує до нескінченності, отже припинення горіння не станеться. Таким чином, *критична витрата вогнегасної речовини дорівнює:*

$$g_{нг \text{ кр}}^{\text{под}} = g_{гс}^{\text{вит}} \frac{\phi'_{\text{вогн}}}{\rho_{гс}}, \quad \text{кг} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (5.182)$$

Критична витрата негорючого газу залежить не тільки від вогнегасної кон-

центрації негорючого газу для конкретної горючої речовини, але й від параметрів пожежі – від часу вільного розвитку й умов газообміну, які впливають на витрату газової суміші, що витікає із приміщення через отвори,  $g_{гс}^{внт}$ .

Інтенсивність подавання негорючого газу на гасіння пожежі в об'ємі приміщення можна визначити за формулою:

$$I = \frac{g_{нг}^{под}}{V_{віль}}, \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}. \quad (5.193)$$

Якщо інтенсивність подавання помножити на час гасіння, то можна отримати загальну витрату негорючого газу на процес гасіння  $G_{нг}$ :

$$G_{нг} = \frac{g_{нг}^{под} \rho_{гс}}{g_{гс}^{внт}} \ln \frac{g_{нг}^{под}}{g_{нг}^{под} - \frac{g_{гс}^{внт} \phi'_{вогн}}{\rho_{гс}}}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}. \quad (5.204)$$

Після ряду математичних перетворень і спрощень можна отримати оптимальну питому витрату вогнегасної речовини, за якої загальна витрата негорючого газу буде мінімальною:

$$g_{нг \text{ опт}}^{под} = 2,4 g_{нг \text{ кр}}^{под}, \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (5.215)$$

Для розрахунку нормативної загальної витрати негорючих газів уведуть коефіцієнт запасу, який враховує нерівномірність розподілу негорючих газів по всьому об'єму приміщення:

$$G_{нг}^{норм} = k_{зап} G_{нг}^{опт}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (5.226)$$

де  $k_{зап}$  – коефіцієнт запасу (1,5÷3,2).

Тоді нормативну інтенсивність подавання негорючого газу на гасіння пожежі в об'ємі приміщення можна визначити за формулою:

$$I_{норм} = \frac{G_{нг}^{норм}}{\tau_{гас}}, \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}. \quad (5.237)$$

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 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  $\Delta H_f^\circ$  за довідниками [7], [9] або таблицею 14 додатків.

2. Визначити число атомів  $j$ -го типу в горючій речовині та значення коефіцієнтів  $\beta_{CO}$  і  $\gamma$  із таблиці 5.2 або коефіцієнтів  $h_b, h'_f, h''_f, h'_j, h''_j$  із таблиці 5.2 для даного виду негорючого газу.

3. Розрахувати об'ємну флегматизуючу концентрацію даного негорючого газу за формулою (5.11) або (5.15). У разі потреби, перерахувати об'ємну флегматизуючу концентрацію в масову за формулою (5.19).

4. Розрахувати мінімальну вибухонебезпечну концентрацію кисню за формулою (5.14) або (5.17).

5. Розрахувати безпечну концентрацію кисню за формулою (5.18).

**Приклад розв'язання задачі**

Розрахувати флегматизуючу концентрацію хладона  $C_3F_8$  і мінімальну вибухонебезпечну концентрацію кисню в повітряному просторі технологічного апарата, в якому переробляється тетраметилбензол  $C_{10}H_{14}$ .

*Розв'язання*

1. Із таблиці 14 додатків знаходимо значення теплоти утворення тетраметилбензолу:  $\Delta H_f = -41,9$  кДж·моль<sup>-1</sup>.

2. Визначаємо число атомів  $j$ -го типу в горючій речовині й значення коефіцієнтів  $h_b, h_j, \beta_{CO}$ , розраховуємо безрозмірну функцію  $F$  за формулою (5.12):  $n_C = 10$ ;  $n_H = 14$ ;  $h_f = 2,58 \cdot 10^{-2}$  моль·кДж<sup>-1</sup>;  $h_C = 2,373$ ;  $h_H = 2,757$ ;

$$\beta_{CO} = 0,5 \cdot 10 + 0,25 \cdot 14 = 8,5$$

$$F = \frac{21}{100 \cdot 8,5} \left( 2,58 \cdot 10^2 \cdot (-41,9) + 2,373 \cdot 10 + 2,757 \cdot 14 \right) - 1 = 0,513$$

3. Визначаємо значення параметра  $\gamma$  з табл. 5.1 для флегматизатора  $C_3F_8$  та розраховуємо флегматизуючу концентрацію хладона за формулою (5.11):

$$\gamma = 6,1;$$

$$\varphi_{фл} = \frac{100 \cdot 0,513}{0,513 + 6,1 \left( 1 + \frac{21}{100 \cdot 8,5} \right)} = 7,6 \%$$

4. Розраховуємо концентрацію тетраметилбензолу  $C_{10}H_{14}$  в суміші, склад якої відповідає точці флегматизації, за формулою (5.13):

$$\varphi_{Гр(фл)} = \frac{100 - 7,6}{1 + \frac{100 \cdot 8,5}{21}} = 2,2 \%$$

5. Розраховуємо мінімальну вибухонебезпечну концентрацію кисню в повітряному просторі технологічного апарата за формулою (5.14):

$$\varphi_{\text{МВКК}} = \frac{21}{100}(100 - 7,6 - 2,2) = 18,9 \%$$

Висновок: концентрація хладона  $\text{C}_3\text{F}_8$  при флегматизації тетраметилбензолу дорівнює 7,6 %, а мінімальна вибухонебезпечна концентрація кисню в повітряному просторі технологічного апарата становить 18,9 %.

### Приклад розв'язання задачі

Розрахувати об'ємну та масову флегматизуючу концентрацію вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ) для захисту внутрішнього об'єму технологічного обладнання, в якому за стандартних умов обертається вибухонебезпечна пароповітряна суміш ацетону  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ . 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:

$$m_C = 3; m_H = 6; m_O = 1.$$

3. Із таблиці 5.2 випишемо значення коефіцієнтів  $h_b$ ,  $h'_\phi$ ,  $h''_\phi$ ,  $h'_j$ ,  $h''_j$  для флегматизатора ( $\text{CO}_2$ ):  $h_f = 0,736 \cdot 10^{-2} \text{ моль} \cdot \text{кДж}^{-1}$ ;  $h'_\phi = 0,584$ ;  $h''_\phi = 2,020$ ;

$j$ –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

4. Розраховуємо об'ємну флегматизуючу концентрацію вуглекислого газу за формулою (5.115):

$$\varphi_{\text{ф.л}} = 100 \cdot \frac{0,736 \cdot 10^{-2} \cdot (-217,6) + 0,584 + 3 \cdot 1,292 + 6 \cdot 0,427 + 1 \cdot 0,570}{2,02 - 1 + 3 \cdot 4,642 + 6 \cdot 1,160 + 1 \cdot (-2,321)} = 30,6 \%$$

5. Розраховуємо масову флегматизуючу концентрацію  $\text{CO}_2$  за стандартних умов за формулою (5.159):  $\mu_{\text{CO}_2} = 44 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ;  $V_\mu = 24,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ;

$$\varphi'_{\text{ф.л}} = 30,6 \frac{44}{100 \cdot 24,4} = 0,55 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

6. Розраховуємо відносну похибку розрахунку:

$$\Delta = 100 \frac{30,6 - 28}{28} = 9 \%$$

Висновок: розрахункова величина флегматизуючої концентрації вуглекислого газу для захисту внутрішнього об'єму технологічного обладнання, який містить вибухонебезпечну повітряну суміш ацетону, дорівнює 30,6 %.

**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. Знаходимо за довідником [7] значення флегматизуючої концентрації азоту для запобігання горіння бензолу:  $\varphi_{\text{фл}} = 45$  %.

2. Розраховуємо мінімальну вибухонебезпечну концентрацію кисню за формулою (5.138):

$$\Phi_{\text{МВКК}} = \frac{100 - 45}{4,86} = 11,4 \text{ \%}.$$

3. Розраховуємо безпечну концентрацію кисню за формулою (5.149):

$$\Phi_{\text{без}} = 1,2 \cdot 11,4 - 4,2 = 9,4 \text{ \%}.$$

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  $g_{\text{ГС}}^{\text{ВІТ}}$ , 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 витрату подавання негорючого газу за формулами (5.18) і (5.21). За параметрами системи подавання негорючого газу (діаметр отвору і тиск у системі) можливо розрахувати фактичну питому масову витрату надходження негорючого газу у приміщення 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 (5.17). Якщо фактична питома масова витрата надходження негорючого газу є меншою, за значення  $\frac{\xi_{гс}^{вит}}{\rho_{гс}} \phi'_{фл}$ , то гасіння не відбудеться.

8. Розрахувати загальну витрату негорючого газу на гасіння (критичну, оптимальну за формулою (5.204) та нормативну з урахуванням коефіцієнта запасу за формулою (5.226)).

9. Розрахувати інтенсивність подавання негорючого газу (критичну, оптимальну або нормативну) за формулами (5.19) або (5.237).

### Приклад розв'язання задачі

Розрахувати час 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 м<sup>2</sup>, розміри приміщення – 7×20×2,9 м; 10 % об'єму приміщення зайнято обладнанням. Газообмін здійснюється через відкритий дверний отвір розмірами 1,2 × 2,3 м; t<sub>0</sub> = 15 °С, тиск – 101,3 кПа.

#### Розв'язання

1. Визначаємо середньооб'ємну температуру газової суміші, яка витікає з приміщення.

1.1. Визначаємо за табл. 11 додатків параметри горіння ацетону: масова теплота згоряння Q'<sub>н</sub> = 31360 кДж·кг<sup>-1</sup>; питомий теоретичний об'єм повітря v<sub>пов</sub> = 7,35 м<sup>3</sup>·кг<sup>-1</sup>; масова швидкість вигорання v<sub>м</sub> = 43,8·10<sup>-3</sup> кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>; коефіцієнт повноти згоряння η = 0,93.

1.2. Розраховуємо загальну площу відкритих отворів і площу отворів, що працюють на приплив повітря, площу підлоги та огорожувальних конструкцій приміщення: S<sub>отв</sub> = 1,2·2,3 = 2,76 м<sup>2</sup>, S<sub>прип</sub> = S<sub>отв</sub>/3 = 2,76/3 = 0,92 м<sup>2</sup>;

$$S_{підл} = 20 \cdot 7 = 140 \text{ м}^2; S_{огор} = 2 \cdot (20 \cdot 7 + 20 \cdot 2,9 + 7 \cdot 2,9) = 436,6 \text{ м}^2.$$

1.3. Розраховуємо співвідношення S<sub>пож</sub>/S<sub>підл</sub>, S<sub>прип</sub>/S<sub>пож</sub>, визначаємо тип і номер кривої за номограмою 18 додатків:

$$\frac{S_{пож}}{S_{підл}} = \frac{10}{140} = 0,07 < 0,25,$$

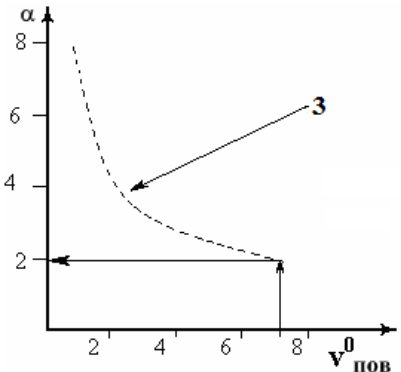
тип кривої – пунктирна;

$$\frac{S_{прип}}{S_{пож}} = \frac{0,92}{10} = 0,092 < 0,1,$$

номер кривої – № 3.

1.4. Визначаємо коефіцієнт надлишку повітря за номограмою 18 додатків: α = 2.

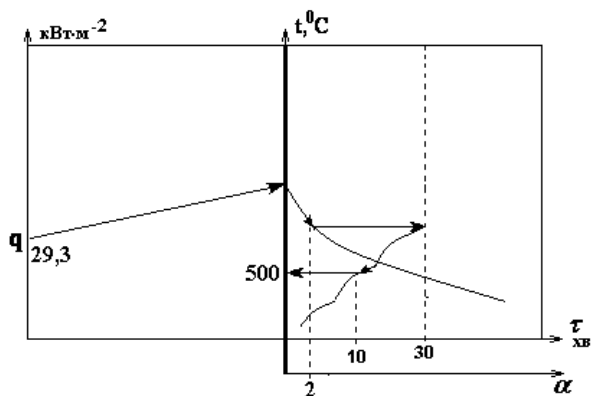
1.5. Розраховуємо величину густини теплового потоку за формулою (4.37):





$$q = \frac{0,93 \cdot 43,8 \cdot 10^{-3} \cdot 31360 \cdot 10}{436,6} = 29,3 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}.$$

1.6. Визначаємо температуру пожежі на 10-ту хвилину вільного розвитку за отриманих значень густини теплового потоку та коефіцієнта надлишку повітря, користуючись номограмою 19 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:

$$g_{\text{гс}}^{\text{виг}} = \frac{2}{3} \cdot 0,65 \cdot 2,76 \sqrt{\frac{2 \cdot 9,8 \cdot 2,3 \cdot 1,23 \cdot 0,46 (1,23 - 0,46)}{(1,23^{0,33} + 0,46^{0,33})^3}} = 2,02 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

4. Визначаємо об'ємну флегматизуючу концентрацію вуглекислого газу для ацетону за довідником [7]:  $\varphi_{\text{фл}} = 28 \text{ \%}$ .

5. Перераховуємо об'ємну флегматизуючу концентрацію вуглекислого газу для ацетону в масову за формулою (5.159):  $\mu_{\text{CO}_2} = 44 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ;

$$V_{\mu} = 22,4 \frac{101,3 \cdot (500 + 273)}{101,3 \cdot 273} = 63,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1};$$

$$\varphi'_{\text{фл}} = 28 \frac{44}{100 \cdot 63,4} = 0,19 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

6. Розраховуємо питому критичну та оптимальну витрати подавання негорючого газу за формулами (5.18) та (5.215) 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 питомої витрати подавання негорючого газу за формулою (5.17):

$$\tau_{\text{гас}} = \frac{7 \cdot 20 \cdot 2,9(1 - 0,1) \cdot 0,46}{2,02} \ln \frac{2,0}{2,0 - \frac{2,02 \cdot 0,19}{0,46}} = 44,9 \text{ с}.$$

Висновок: для гасіння пожежі ацетону на площі 10 м<sup>2</sup> в заданому приміщенні з відкритим дверним отвором із оптимальною питомою витратою подавання вуглекислого газу 2,0 кг·с<sup>-1</sup> потрібно 44,9 с.

### *Приклад розв'язання задачі*

Визначити питому критичну та оптимальну масову витрату подавання азоту на об'ємне гасіння пожежі толуолу C<sub>7</sub>H<sub>8</sub> у приміщенні із відкритим дверним отвором розмірами 2 м × 2 м, якщо середньооб'ємна температура у приміщенні під час пожежі дорівнює 400 °С, температура навколишнього повітря – 20 °С, атмосферний тиск – 101,3 кПа.

#### *Розв'язання*

1. Розраховуємо густину навколишнього повітря і газового середовища у приміщенні за формулою (4.39):

$$\rho_{\text{пов}}^{20^{\circ}\text{C}} = \frac{29}{22,4 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 20)} = 1,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$\rho_{\text{гс}}^{400^{\circ}\text{C}} = \frac{29}{22,4 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 400)} = 0,52 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

2. Розраховуємо питому масову витрату, з якою газова суміш витікає із приміщення, за формулою (4.31), через те що газообмін здійснюється через один отвір:

$$g_{\text{гс}}^{\text{вит}} = \frac{2}{3} 0,65 \cdot 2 \cdot 2 \sqrt{\frac{2 \cdot 9,8 \cdot 2 \cdot 1,2 \cdot 0,52(1,2 - 0,52)}{(1,2^{0,33} + 0,52^{0,33})^3}} = 2,77 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

3. Визначаємо за довідником [7] об'ємну флегматизуючу концентрацію азоту для толуолу: φ<sub>фл</sub> = 46 %.

4. Перерахуємо об'ємну флегматизуючу концентрацію азоту в масову за даних умов: μ<sub>N<sub>2</sub></sub> = 28 кг·кмоль<sup>-1</sup>;

$$V_{\mu} = 22,4 \frac{101,3 \cdot (400 + 273)}{101,3 \cdot 273} = 55,2 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1};$$

$$\varphi'_{\text{ф.л}} = 46 \frac{28}{100 \cdot 55,2} = 0,23 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

5. Розраховуємо питому критичну та оптимальну витрати подавання негорючого газу на об'ємне гасіння пожежі толуолу відповідно за формулами (5.18) та (5.215):

$$g_{\text{нг кр}}^{\text{под}} = 2,77 \frac{0,23}{0,52} = 1,22 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$g_{\text{нг опт}}^{\text{под}} = 2,4 \cdot 1,22 = 2,94 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Висновок: критична та оптимальна масові питомі витрати подавання азоту на об'ємне гасіння пожежі толуолу за даних умов газообміну – 1,22 кг·с<sup>-1</sup> та 2,94 кг·с<sup>-1</sup> відповідно.

### *Приклад розв'язання задачі*

Розрахувати загальну витрату та нормативну інтенсивність подавання водяної пари на гасіння пожежі метилового спирту  $\text{CH}_4\text{O}$  у приміщенні розмірами  $8 \times 15 \times 4$  м із вхідним отвором розмірами  $3 \times 3$  м і витяжним люком розмірами  $1,5 \times 1$  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  $350$  °С, а температура навколишнього повітря –  $10$  °С.

#### *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. Відстань між центрами отворів:  $H = 4 - 1,5 = 2,5$  м;

$$g_{\text{гс}}^{\text{виг}} = 0,65 \cdot 9 \cdot 1,5 \sqrt{\frac{2 \cdot 9,8 \cdot 2,5 \cdot 1,25 \cdot 0,57 (1,25 - 0,57)}{1,25 \cdot 9^2 + 0,57 \cdot 1,5^2}} = 4,2 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

3. Розраховуємо об'ємну флегматизуючу концентрацію водяної пари для метилового спирту  $\text{CH}_4\text{O}$ .

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 молекулі горючої речовини:  $m_C = 1$ ;  $m_H = 4$ ;  $m_O = 1$ .

3.3. Із таблиці 5.2 виписуємо значення коефіцієнтів  $h_f$ ,  $h'_f$ ,  $h''_f$ ,  $h'_j$ ,  $h''_j$  для флегматизатора – водяна пара.

$h_f$ , моль·кДж <sup>-1</sup>	$0,802 \cdot 10^{-2}$
$h'_f$	0,780
$h'_C$	1,651
$h'_H$	0,527
$h'_O$	0,446
$h''_f$	2,236
$h''_C$	5,000
$h''_H$	1,250
$h''_O$	-2,500

3.4. Розраховуємо об'ємну флегматизуючу концентрацію водяної пари для метилового спирту за формулою (5.115):

$$\varphi_{фл} = 100 \cdot \frac{0,802 \cdot 10^{-2} \cdot (-201,3) + 0,78 + 1,651 + 4 \cdot 0,527 + 0,446}{2,236 - 1 + 5,0 + 4 \cdot 1,25 + (-2,5)} = 38,6\%$$

4. Розраховуємо масову флегматизуючу концентрацію водяної пари за формулою (5.159):  $\mu_{H_2O} = 18 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ;

$$V_\mu = 22,4 \frac{101,3 \cdot (350 + 273)}{101,3 \cdot 273} = 51,1 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1};$$

$$\varphi'_{фл} = 30,6 \frac{18}{100 \cdot 51,1} = 0,136 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

5. Розраховуємо питому критичну та оптимальну витрати подавання водяної пари на об'ємне гасіння метилового спирту відповідно за формулами (5.18) та (5.215):

$$g_{нг\text{ кр}}^{\text{под}} = 4,2 \frac{0,136}{0,57} = 1,0 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$g_{нг\text{ опт}}^{\text{под}} = 2,4 \cdot 1,0 = 2,4 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

6. Розраховуємо час гасіння пожежі негорючим газом у даному приміщенні за оптимальної питомої витрати подавання водяної пари за формулою (5.17):

$$V_{вільн} = 8 \cdot 15 \cdot 4(1 - 0,2) = 384 \text{ м}^3;$$

$$\tau_{гас} = \frac{384 \cdot 0,57}{4,2} \ln \frac{2,4}{2,4 - \frac{4,2}{0,57} \cdot 0,136} = 28,2 \text{ с}.$$

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 (5.204):

$$G_{\text{нг}}^{\text{опт}} = \frac{2,4 \cdot 0,57}{4,2} \ln \frac{2,4}{2,4 - \frac{4,2 \cdot 0,136}{0,57}} = 0,17 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

7.2. Розраховуємо загальну витрату подавання водяної пари з урахуванням нерівномірності розподілу негорючого газу по об'єму приміщення за формулою (5.226), 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 (5.237):

$$I_{\text{нг}}^{\text{норм}} = \frac{0,26}{28,2} = 0,009 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}.$$

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 ( $\text{CO}_2$ ) у приміщенні розмірами  $8 \times 4 \times 3$  м, якщо тиск у системі подавання газу – 250 кПа, а загальна площа отворів, через які відбувається подавання газу, дорівнює  $10 \text{ см}^2$ . У приміщенні відкритий дверний отвір розміром  $2,2 \times 0,8$  м; 15 % об'єму приміщення зайнято обладнанням. Середньооб'ємна температура газового середовища у приміщенні під час пожежі досягла  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , 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:

$$S_{\text{отв}} = 0,8 \cdot 2,2 = 1,76 \text{ м}^2.$$

$$g_{\text{гас}}^{\text{виг}} = \frac{2}{3} \cdot 0,65 \cdot 1,76 \sqrt{\frac{2 \cdot 9,8 \cdot 1,76 \cdot 1,12 \cdot 0,57(1,12 - 0,62)}{(1,12^{0,33} + 0,62^{0,33})^3}} = 0,97 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

3. Розраховуємо об'ємну флегматизуючу концентрацію  $\text{CO}_2$  для октилбутирату  $\text{C}_{12}\text{H}_{24}\text{O}_2$  за формулою (5.115) за коефіцієнтами табл. 5.1. Визначасмо теплоту утворення октилбутирату за довідником [7]:  $\Delta H_f^0 = -711 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ .

$$\varphi_{\text{фл}} = 100 \cdot \frac{0,736 \cdot 10^{-2} \cdot (-711) + 0,584 + 12 \cdot 1,292 + 24 \cdot 0,427 + 2 \cdot 0,57}{2,02 - 1 + 12 \cdot 4,642 + 24 \cdot 1,160 \cdot 2 \cdot 2,321} = 33,6 \%$$

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 ( $\text{CO}_2$ ) надходить у приміщення через отвори площею  $10 \text{ см}^2$ , 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  $\text{CO}_2$  за формулою (4.87):

$$R_{\text{питг}} = \frac{8314}{44} = 188,95 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1};$$

$$g_{\text{г}}^{\text{под}} = 0,64 \cdot 10 \cdot 10^{-4} \cdot 2,5 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{1}{188,95 \cdot 298} \cdot \frac{2 \cdot 1,3}{1,3 + 1} \left( \frac{2}{1,3 + 1} \right)^{\frac{2}{1,3 - 1}}} = 0,59 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

6. Розраховуємо час гасіння пожежі вуглекислим газом у даному приміщенні за фактичної питомої масової витрати подавання негорючого газу за формулою (5.17):

$$V_{\text{вільн}} = 8 \cdot 3 \cdot 4(1 - 0,15) = 81,6 \text{ м}^3;$$

$$\tau_{\text{гас}} = \frac{81,6 \cdot 0,57}{0,97} \ln \frac{0,59}{0,59 - \frac{0,97}{0,32}} = 90,5 \text{ с}.$$

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 відкриті дверний отвір площею  $2,5 \text{ м}^2$  та кватирка 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 середовища у приміщенні  $65 \text{ }^\circ\text{C}$ .

*Розв'язання*

1. Розраховуємо густину газового середовища у приміщенні і назовні 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 (5.137):  $\varphi_{\text{нг}} = 100 - 4,86\varphi_{\text{O}_2} = 100 - 4,86 \cdot 11 = 46,5 \text{ \%}$ .

4. Перераховуємо об'ємну концентрацію азоту в масову за формулою (5.159):  $\mu_{\text{N}_2} = 28 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ;  $V_{\mu} = 22,4 \frac{101,3 \cdot (65 + 273)}{101,3 \cdot 273} = 27,7 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ;

$$\varphi'_{\text{фл}} = 46,5 \frac{28}{100 \cdot 27,7} = 0,47 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

5. Масова витрата натікання  $\text{N}_2$  у приміщення за умовою:  $g_{\text{нг}}^{\text{под}} = 0,5 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$ .

6. Розраховуємо час досягнення в вільному об'ємі приміщення заданої концентрації кисню при подаванні азоту за формулою (5.17):

$$V_{\text{вільн}} = 4 \cdot 4 \cdot 2,5 \cdot 0,93 = 37,2 \text{ м}^3;$$

$$\tau_{\text{под}} = \frac{37,2 \cdot 1,05}{0,24} \ln \frac{0,5}{0,5 - \frac{0,24}{1,05} \cdot 0,47} = 39 \text{ с}.$$

Висновок: час досягнення концентрації кисню 11 %, за умови подавання  $\text{N}_2$  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	амилацетат	$C_7H_{14}O_2$	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
23	бензиловий спирт	$C_7H_8O$	водяна пара
24	м-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. 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 парою 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.

№	Горюча речовина	Площа отворів, м <sup>2</sup>		Параметри приміщення			Параметри пожежі		t <sub>0</sub> , °C
		нижнього	верхнього	площа, м <sup>2</sup>	висота, м	η	площа, м <sup>2</sup>	час розвитку, хв	
1	акрилова кислота C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	2,0	-	25	2,5	0,05	10	3	20
2	амілацетат C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	3,0	-	30	2,7	0,1	7	5	-10
3	аміловий спирт C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	3,0	2,0	35	2,9	0,06	4	7	30
4	анілін C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N	2,0	3,0	40	3,1	0,07	2	9	15
5	ацетон C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	1,0	-	45	3,3	0,08	20	11	25
6	сірковуглець CS <sub>2</sub>	2,0	-	50	3,5	0	17	13	10
7	бензол C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	2,0	1,0	55	3,7	0,11	14	15	5
8	стирол C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	2,0	2,0	60	3,9	0,12	11	20	35
9	бутанон-2 C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	3,5	-	65	4,1	0,13	8	30	40
10	бутилацетат C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	3,5	-	70	4,3	0,14	30	25	-5
11	бутиловий спирт C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	3,0	1,0	75	2,5	0,15	27	3	-15
12	пнен C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	2,0	3,0	80	2,7	0	24	5	20
13	гексан C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	2,0	3,0	40	3,3	0,1	20	6	30
14	гексилловий спирт C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	3,0	-	45	3,5	0,06	17	11	15
15	гліцерин C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	3,0	-	50	3,7	0,07	14	13	25
16	пентан C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	2,0	1,0	55	3,9	0,08	11	15	10
17	толуол C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	1,0	2,0	60	4,1	0	8	20	5
18	детиловий ефір C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	2,0	-	65	4,3	0,11	30	30	35
19	етилацетат C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	2,0	-	70	2,5	0,12	27	25	20
20	етилбензол C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	3,1	1,0		2,7	0,13	24	3	10
21	етиленгліколь C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	4,5	3,0	85	2,9	0,17	21	7	30
22	етиловий спирт C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	2,5	-	90	3,1	0,18	18	9	15
23	метилформіат C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	4,0	1,5	95	3,3	0,19	15	11	35
24	ізопентан C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	4,5	4,0	100	3,5	0,2	12	13	-25
25	хлорбензол C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl	4,0	-	20	3,7	0,21	9	15	10
26	ізопропіловий спирт C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	5,0	-	25	3,9	0	6	20	-10
27	ізопропілформіат C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	5,0	1,0	30	4,1	0,23	3	30	-15
28	камфен C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	1,0	5,0	35	4,3	0,24	1	17	-5
29	ксилол C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	2,0	3,0	90	3,3	0,2	18	20	35
30	метиловий спирт CH <sub>4</sub> O	3,1	-	95	3,5	0,21	15	30	-25

4. 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,  $P_0 = 101,3$  кПа, висота нижніх отворів приміщення – 2,2 м від підлоги, верхніх – 0,5 м від стелі. Середньооб'ємну температуру пожежі у приміщенні визначити за допомогою номограм.

№	Горюча речовина	Площа отворів, м <sup>2</sup>		Параметри приміщення			Параметри пожежі		t <sub>0</sub> , °C
		нижнього	верхнього	площа, м <sup>2</sup>	висота, м	η	площа, м <sup>2</sup>	час розв'итку, хв.	
1	акрилова кислота C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	1,8	-	25	2,5	0,25	10	3	10
2	амілацетат C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	2,0	-	50	3,5	0	17	13	-10
3	аміловий спирт C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	3,0	-	85	2,9	0,13	21	7	0
4	анілін C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N	3,5	-	70	4,3	0,16	30	35	35
5	ацетон C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	2,5	-	90	3,1	0,11	18	9	-5
6	сірковуглець CS <sub>2</sub>	4,0	1,5	95	3,3	0,1	15	11	30
7	бензол C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	3,5	-	20	3,7	0,08	9	15	20
8	стирол C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	2,0	-	65	4,1	0,17	8	30	40
9	бутанон-2 C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	5,0	-	25	3,9	0	6	20	-5
10	бутилацетат C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	5,0	1,0	30	4,1	0,06	3	30	15
11	бутиловий спирт C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	1,8	4,0	100	3,5	0,09	12	13	-25
12	пінен C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	3,0	-	75	2,5	0,15	27	3	-15
13	гексан C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	1,9	5,0	35	4,3	0,05	1	35	5
14	гексилловий спирт C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	2,0	3,0	40	3,1	0,22	2	9	25
15	гліцерин C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	4,0	-	70	4,3	0,25	18	35	40
16	пентан C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	3,5	1,0	90	3,1	0	15	9	-5
17	толуол C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	2,0	4,0	95	3,3	0,13	9	11	15
18	диетилловий ефір C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	5,0	-	20	3,7	0,16	8	15	-25
19	етилацетат C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	5,0	5,0	65	4,1	0,11	6	30	-15
20	етилбензол C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	1,8	3,0	25	3,9	0,1	3	20	5
21	етиленгліколь C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	3,0	2,0	30	4,1	0,08	12	30	25
22	етилловий спирт C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	2,0	-	100	3,5	0,17	27	13	
23	метилформіат C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	1,9	3,0	80	2,7	0	1	5	-20
24	ізопентан C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	3,0	-	30	2,7	0,24	7	5	-10
25	хлорбензол C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl	3,0	-	35	3,3	0,19	4	11	10
26	ізопропанол C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	2,5	1,0	45	3,7	0,18	20	15	45
27	ізопропілформіат C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	3,0	2,0	35	2,9	0,23	4	7	20
28	камфен C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	2,5	-	45	3,3	0,21	20	11	30
29	циклогексанол C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	2,0	1,0	55	3,7	0,19	14	15	10
30	циклогексанон C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O	1,0	2,0	60	3,9	0,18	11	20	45

5\*. 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

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

досягнута в об'ємі камери при подаванні водяної пари з питомою масовою витратою 1,5 кг с<sup>-1</sup>. 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.

6. Розрахувати час, за який концентрація кисню у приміщенні при подаванні негорючого газу із заданою масовою витратою досягне заданого значення при подаванні:

а) оксиду карбону (IV); б) азоту; в) пари води.

Параметри приміщення, отворів та температура навколишнього середовища наведені у таблиці. Прийняти, що відстань між центрами отворів за умови їх розташування на різному рівні дорівнює 1,7 м.

№	Площа отворів, м <sup>2</sup>		Параметри приміщення			Температура, °С		Концентрація кисню у приміщенні, %.	Витрата подавання негорючого газу, кг·с <sup>-1</sup>
	нижнього	верхнього	площа, м <sup>2</sup>	висота, м	η	у приміщенні	назовні		
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
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

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

7. Для наведених речовин розрахувати можливість та час гасіння пожежі негорючим газом, якщо відомі об'єм приміщення, масова витрата витікання газова суміші з приміщення назовні, діаметр отвору та тиск у системі подавання негорючого газу: а) оксид карбону (IV); б) азот; в) пара води.

Прийняти, що атмосферний тиск дорівнює 101,3 кПа.

№	Горюча речовина	Подавання негорючого газу		Приміщення		Витрата витікання газової суміші назовні, кг·с <sup>-1</sup>
		Діаметр отвору, мм	Тиск у системі, кПа	Вільний об'єм, м <sup>3</sup>	Температура, °С	
1	гексан C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	5	200	100	200	0,01
2	пропіонова кислота C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	13	130	70	100	1,5
3	<i>n</i> -кілол C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	10	260	40	900	0,02
4	фенол C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	3	190	20	85	1,4
5	пропанол C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	6	320	20	500	0,03
6	етилпропілкетон C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	4	350	170	1000	1,3
7	пропаналь C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	7	380	140	800	0,04
8	пентанол-2 C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	8	410	110	450	1,2
9	метилформіат C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	10	210	80	400	0,05
10	толуол C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	11	240	300	135	1,1
11	бензиловий спирт C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	12	170	270	150	0,06
12	<i>m</i> -метилфенол C <sub>7</sub> H <sub>9</sub> O	10	300	240	700	1,0
13	етилбензол C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	14	330	210	600	0,07
14	етилпропіонат C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	25	160	180	150	0,9
15	ацетон C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	16	390	150	300	0,08
16	нонан C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	15	220	120	250	0,8
17	пропілбензол C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	17	250	90	70	0,09
18	метилпропілкетон C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	18	180	600	100	0,7
19	пропілформіат C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	19	310	300	150	0,1
20	гексильовий спирт C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	12	210	300	400	0,2
21	гептан C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	10	240	270	135	0,3
22	декан C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	14	170	240	150	0,4
23	дцаетоновий спирт C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	25	300	210	700	0,5
24	крезол C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	16	330	180	600	0,6
25	ксилідин C <sub>8</sub> H <sub>11</sub> N	15	160	150	150	1,3
26	кумол C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	17	390	120	300	0,04
27	мезитилен C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	18	220	90	250	1,2
28	метилгексан-2 C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	19	250	600	700	0,05
29	метанол CH <sub>4</sub> O	10	180	300	100	1,1
30	етиленгліколь C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	20	340	100	150	0,06

8\*. Визначити загальну витрату та час гасіння пожежі пропаналю C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O азотом у приміщенні розмірами 18×8×3,5 м, якщо тиск у системі подавання негорючого газу – 350 кПа, загальна площа отворів подавання газу – 30 см<sup>2</sup>. У приміщенні відкритий дверний отвір розміром 2,2×1,8 м, 25 % об'єму приміщення зайнята обладнанням. Середньооб'ємна температура пожежі – 250 °С, умови повітряного середовища назовні приміщення є стандартними.

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 масовою витратою, при гасінні:

а) оксидом карбону (IV); б) азотом; в) паром води.

Прийняти умови середовища назовні нормальними, а відстань між центрами отворів за умови їх розташування на різному рівні дорівнює 1,2 м.

№	Горюча речовина	Площа отворів, м <sup>2</sup>		Вільний об'єм приміщення, м <sup>3</sup>	t <sub>пож</sub> , °С	Витрата подавання негорючого газу, кг·с <sup>-1</sup>
		нижнього	верхнього			
1	пропіонова кислота C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	1,0	-	100	40	1,0
2	гексан C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	3,0	-	70	50	1,5
3	пропаном C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	3,0	-	40	90	2,0
4	n-ксилол C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	2,0	3,0	20	85	2,5
5	фенол C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	1,5	-	20	50	3,0
6	пропаналь C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	2,0	-	170	100	3,0
7	етилпропілкетон C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	2,0	1,0	140	80	3,5
8	кумол C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	1,0	2,0	110	45	4,0
9	пентанол-2 C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	2,0	-	80	40	4,5
10	бензиловий спирт C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	3,5	-	300	135	5,0
11	толуол C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	3,0	1,0	270	65	5,5
12	етилбензол C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	1,0	3,0	240	70	6,0
13	m-метилфенол C <sub>7</sub> H <sub>9</sub> O	2,5	-	210	60	6,5
14	ацетон C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	2,5	-	180	150	7,0
15	етилпропіонат C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	4,0	1,5	150	30	7,5
16	пропілбензол C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	1,5	4,0	120	75	8,0
17	нонан C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	3,0	-	90	70	8,5
18	пропілформіат C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	5,0	-	600	110	9,0
19	метилпропілкетон C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	5,0	1,0	300	155	9,5
20	декан C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	2,0	-	170	40	3,0
21	ноніловий спирт C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> O	1,0	-	140	135	3,5
22	октан C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	2,0	1,0	110	65	4,0
23	октаналь C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	3,5	3,0	80	70	4,5
24	піридин C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N	3,0	-	300	60	5,0
25	пірол C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> N	1,0	-	270	150	5,5
26	пропаналь C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	2,5	1,5	240	30	6,0
27	пропіламін C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> N	2,5	4,0	210	75	6,5
28	цимол C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	4,0	-	180	70	7,0
29	етилацетат C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	2,5	-	150	110	7,5
30	метилформіат C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	1,0	5,0	120	155	10,0

10\*. У фарбувальній камері розмірами  $4 \times 4 \times 2,8$  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  $1,5 \text{ кг с}^{-1}$ . У приміщенні відкритий дверний отвір розміром  $2 \times 1,5$  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  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ .

11\*. Визначити загальну витрату та час гасіння пожежі пропанало  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$  азотом у приміщенні розмірами  $18 \times 8 \times 3,5$  м, якщо тиск в системі подавання негорючого газу –  $350 \text{ кПа}$ , а загальна площа присків, через які відбувається подавання газу, дорівнює  $30 \text{ см}^2$ . У приміщенні відкритий дверний отвір розміром  $2,2 \times 1,8$  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  $5 \times 10 \times 3,0$  м відбувається горіння аварійного розливу октану на площі  $15 \text{ м}^2$ . 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  $2,0 \times 2,5$  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  $10 \times 10 \times 3,5$  м із вхідним отвором розмірами  $2 \times 3$  м і витяжним люком розмірами  $0,5 \times 1$  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 частіше 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. Майже 90 % всіх пожеж гасять за допомогою води або вогнегасних складів на основі води. Вода є надійним й ефективним засобом під час гасіння пожеж, пов'язаних з горінням речовин в усіх агрегатних станах.

Припинення горіння охолодженням знижує температуру в зоні реакції горіння до температури погасання за рахунок: 1) охолодження самої зони горіння; 2) 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. Виконати цю умову можна, якщо забезпечити певну інтенсивність тепловідводу із зони реакції горіння.

Дійсна температура горіння більшості вуглеводнів – 1400–1500 К. Якщо початкова температура горючої системи становила 300 К, то можна вважати, що температура системи підвищилась на 1200 К. На це підвищення температури витрачається приблизно 60 % загального тепла  $Q_n$ , яке виділяється під час горіння даної речовини (з урахуванням тепловтрат у навколишнє середовище шляхом променистої теплопередачі). Температура погасання більшості вуглеводнів становить – 1200–1300 К. Тому для припинення горіння методом охолодження зони горіння потрібно знизити температуру полум'я приблизно на 200 °С. Тобто, для того щоб припинити горіння вуглеводнів методом охолодження зони горіння, необхідно відвести:

$$Q_{відв} \approx \frac{200}{1200} 0,6Q'_n = 0,1Q'_n \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}. \quad (5.24)$$

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 про-

дуктів газифікації (пари чи газів розкладання) в зону реакції знизиться, концентрація горючої речовини стане меншою за нижню концентраційну межу поширення полум'я  $\varphi_n$ , унаслідок чого горіння припиняється.

Для охолодження поверхневого шару горючої речовини до критичної температури ( $t_{сн}$  або  $t_{нпр}$ ) необхідно компенсувати тепло, яке підводиться до поверхні речовини випромінюванням і конвекцією із зони горіння під час гасіння. Ця умова реалізовується, якщо буде відведено:

$$Q_{відв} \geq \tau_{гас}(q_{пром} + q_{конв}) + Q_{зап_{пш}}, \text{ кДж}\cdot\text{м}^{-2}, \quad (5.25)$$

де  $Q_{відв}$  – питоме відведення тепла від одиниці площі поверхнігорючої 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 прогрітом у шарі горючої речовини на одиниці площі її поверхні,  $\text{кДж}\cdot\text{м}^{-2}$ :

$$Q_{зап} = c_{р_{пш}}\rho_{пш}\delta_{пш}(t_s - t_{кр}), \text{ кДж}\cdot\text{м}^{-2}, \quad (5.26)$$

де  $c_{р_{пш}}$  – питома масова теплоємність матеріалу,  $\text{кДж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ;  $\rho_{пш}$  – густина матеріалу,  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ;  $\delta_{пш}$  – товщина прогрітого шару, м;  $t_{кр}$  – критична температура матеріалу ( $t_{сн}$  або  $t_{нпр}$ ),  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_s$  – температура поверхні матеріалу,  $^{\circ}\text{C}$ ;

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:

$$Q_{погл} \geq Q_{відв}. \quad (5.27)$$

Питому кількість енергії, що поглинає 1 кг води, можна оцінити як:

$$q_{погл} = q_{наг}^{рід} + \Delta H_{вип} + q_{наг}^{пар}, \text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1},$$

де  $\Delta H_{вип}$  – теплота пароутворення;  $q_{наг}^{рід}$  – кількість енергії, що поглинає 1 кг води при нагріванні від початкової температури до температури кипіння;  $q_{наг}^{пар}$  – кількість енергії, що поглинає 1 кг пари води при нагріванні від температури кипіння до температури зони горіння.

Такий розрахунок передбачає, що вся вода, яку подано 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, на-



гріваться 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 питомою кількістю теплоти, яку поглинає 1 кг води, можна оцінити як:

$$q_{\text{погл}} = 0,7c_p^{\text{рід}}(80 - t_0) + 0,55\Delta H_{\text{вип}} + 0,4c_p^{\text{пар}}(t_{\text{гор}} - 80), \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}, \quad (5.28)$$

де  $c_p^{\text{рід}}$  – питома масова теплоємність води у рідкому стані, 4,2 кДж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>;  $c_p^{\text{пар}}$  – питома масова теплоємність пари води, 1,96 кДж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>.

Оскільки густина води дорівнює 1 кг·л<sup>-1</sup>, теоретичну загальну витрату вогнегасного засобу для припинення горіння визначає співвідношення:

$$G_{\text{теор}} = \frac{Q_{\text{відв}}}{q_{\text{погл}}}, \text{ л} \cdot \text{кг}^{-1} \text{ або л} \cdot \text{м}^{-2}. \quad (5.29)$$

Тоді з урахуванням рівнянь (5.29) і (5.25) загальна витрата вогнегасного засобу на гасіння методом охолодження зони горіння буде становити:

$$G_{\text{теор}} = \frac{0,1Q'_n}{q_{\text{погл}}}, \text{ л} \cdot \text{кг}^{-1}. \quad (5.30)$$

З урахуванням масової швидкості вигорання горючої речовини теоретично необхідну інтенсивність подавання охолоджуючого вогнегасного засобу на гасіння можна розрахувати як:

$$I_{\text{теор}} = \eta v_m K_n G_{\text{теор}}, \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (5.31)$$

де  $v_m$  – масова швидкість вигорання речовини, кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>;  $K_n$  – коефіцієнт поверхні, який враховує можливість вигорання горючої речовини з вертикальних та похилих поверхонь;  $\eta$  – коефіцієнт повноти згорання горючої речовини;  $G_{\text{теор}}$  – теоретична витрата води на гасіння, л·кг<sup>-1</sup>.

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. Доведено, що успішно гасити розпиленою водою вдається лише рідини із температурою спалаху, вищою за 100 °С. Розрахунок критичної інтенсивності подавання розпиленої води на гасіння горючих рідин згідно [37] проводять за формулою:

$$I_{\text{кр}} = 220 \cdot v_m^2 \cdot \sqrt[3]{\frac{v_m \cdot D}{v \cdot \rho_{\text{гр}}}} \left[ \frac{\rho_{\text{гр}} \cdot T_{\text{гр}}}{\rho_v \cdot (T_{\text{сер}} - T_0)} - 2 \right]^{-2}, \quad (5.32)$$

де  $T_{\text{кип гр}}$  – температура кипіння горючої рідини;  $T_{\text{сер}}$  – середня температура поверхневого шару горючої рідини;  $T_{\text{сер}} = \frac{T_{\text{гр}} + T_{\text{сп}}}{2}$ ;  $T_{\text{сп}}$  – температура спалаху горючої рідини;  $T_0$  – температура навколишнього середовища;  $\rho_{\text{гр}}$  – гус-

тина горючої рідини;  $v$  – кінематична в'язкість горючої рідини,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $v_m$  – масова швидкість вигорання горючої рідини,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $D$  – середній розмір крапель розпиленої води,  $\text{м}$ ; (для зрошувача ДП–15  $D=3 \cdot 10^{-3}$  м.).

Для визначення часу гасіння для заданої інтенсивності подавання розпиленої води, розраховують безрозмірну інтенсивність подавання води за формулою:

$$y = \sqrt{\frac{I_{\text{кр}}}{I}}. \quad (5.33)$$

На основі безрозмірної інтенсивності подавання води розраховують безрозмірний час гасіння  $\tau$  за формулою:

$$\tau = -y - \ln(1 - y). \quad (5.34)$$

Виходячи із величини безрозмірного часу гасіння, розраховуємо розмірний час гасіння  $\tau_{\text{гас}}$ , за формулою:

$$\tau_{\text{гас}} = 1,12 \cdot 10^{-7} \left( \frac{\rho_{\text{гр}}}{v_m} \right) \cdot \tau, \text{ с}. \quad (5.35)$$

Проте необхідно відмітити, що точно розрахувати кількість тепла, що необхідно відвести від палаючого матеріалу, за формулою (5.25) 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.

$$K_{\text{гас}} = \frac{q_{\text{відв}}}{q_{\text{вид}}}, \quad (5.36)$$

де  $q_{\text{відв}}$  – інтенсивність, з якою необхідно відводити тепло від зони горіння або з одиниці поверхні 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:

$$q_{\text{вид}} = \eta v_m Q'_{\text{н}}, \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (5.37)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт повноти згорання;  $v_m$  та  $Q'_{\text{н}}$  – масова швидкість вигорання,  $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ , та нижча масова теплота згорання горючої речовини,  $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ .

Підставивши числові значення величин у формулу (5.36), можна побачити, що для гасіння пожежі методом охолодження зони горіння коефіцієнт гасіння становить  $K_{\text{гас}} = 0,1$ , 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), (5.29), (5.36) та (5.37), розрахувати необхідну інтенсивність подавання вогнегасної речовини:

$$I = \frac{K_{\text{гас}} \eta v_m Q'_n}{q_{\text{погл}}}, \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (5.38)$$

**Методика розрахунку параметрів припинення горіння охолоджуючими вогнегасними засобами**

1. Визначити для горючої речовини за довідником [17] або з табл. 11 додатків параметри: масову швидкість вигорання  $v_m$ , температуру горіння  $T_{\text{гор}}$ , нижчу масову теплоту згорання  $Q'_n$ , коефіцієнт повноти згорання  $\eta$  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 (5.28).

3. Розрахувати теоретичну загальну витрату води на гасіння методом охолодження зони полум'я за формулою (5.30).

4. Розрахувати теоретичну інтенсивність подавання води на гасіння: а) зони полум'яного горіння за формулою (5.31); б) поверхні палаючої конденсованої горючої речовини за відомого коефіцієнта гасіння за формулою (5.38).

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 С.

*Розв'язання*

1. Визначаємо для бутилового спирту за довідником [17] та з таблиці 11 додатків масову швидкість вигорання речовини  $v_m = 0,0135 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ; температуру горіння  $T_{\text{гор}} = 1000 \text{ }^\circ\text{С}$ ; коефіцієнт повноти згорання речовини  $\eta = 0,93$ ; нижчу масову теплоту згорання  $Q'_n = 36805 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ .

2. Розраховуємо питому теоретичну охолоджувальну здатність води з урахуванням втрат за формулою (5.28):

$$q_{\text{погл}} = 0,7 \cdot 4,19(80 - 25) + 0,55 \cdot 2260 + 0,4 \cdot 1,96(1000 - 80) = 2126 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

3. Розраховуємо теоретичну загальну витрату води на гасіння методом охолодження зони полум'я за формулою (5.30):

$$G_{\text{теор}} = \frac{0,1 \cdot 36805}{2126} = 1,73 \text{ л} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

4. Визначаємо теоретичну інтенсивність подавання води за формулою (5.31):

$$I_{\text{теор}} = 0,0135 \cdot 1,73 = 0,023 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

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 °С. Коефіцієнт поверхні  $K_n$  вважати рівним 3.

*Розв'язання*

1. Вважаємо, що основним горючим матеріалом в бібліотеці є книги на стелажах. Визначаємо для книг на стелажах за довідником [17] та з таблиці 11 додатків масову швидкість вигорання  $v_m = 0,01 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , температуру горіння  $T_{\text{гор}} = 700 \text{ °С}$ ; 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 (5.28):

$$q_{\text{погл}} = 0,7 \cdot 4,19(80 - 20) + 0,55 \cdot 2260 + 0,4 \cdot 1,96(700 - 80) = 1905 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

3. Розраховуємо теоретичну загальну витрату води на гасіння за формулою (5.30):

$$G_{\text{теор}} = \frac{0,1 \cdot 13400}{1905} = 0,7 \text{ л} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

4. Розраховуємо теоретичну інтенсивність подавання води за формулою (5.31):

$$I_{\text{теор}} = 0,01 \cdot 0,7 \cdot 3 = 0,021, \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

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, коефіцієнт її використання на гасіння пожежі на складі пиломатеріалів вологістю 10 %, якщо початкова  $t_0 = 22 \text{ °С}$ ; коефіцієнт гасіння  $K_{\text{гас}}$  вважати рівним 0,3.

*Розв'язання*

1. Визначаємо для деревини у штабелях за довідником [17] та з табл. 11 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  $Q'_n = 16600 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ ; 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 (5.28):

$$q_{\text{погл}} = 0,7 \cdot 4,19(80 - 22) + 0,55 \cdot 2260 + 0,4 \cdot 1,96(900 - 80) = 2056 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

3. Розраховуємо інтенсивність подавання води на гасіння з урахуванням коефіцієнта гасіння за формулою (5.38):

$$I = \frac{0,3 \cdot 0,97 \cdot 0,12 \cdot 16600}{2056} = 0,28 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

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 пило-матеріалів 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. Розраховуємо критичну інтенсивність подавання води на гасіння дибутилфталату за формулою(5.32):  $T_{\text{сер}} = \frac{613 + 421}{2} = 517 \text{ К}$  ;

$$I_{\text{кр}} = 220 \cdot 0,03^2 \sqrt[3]{\frac{0,03 \cdot 3 \cdot 10^{-4}}{2,39 \cdot 10^{-5} \cdot 1047} \left[ \frac{1047 \cdot 613}{1000 \cdot (517 - 293)} - 2 \right]^{-2}} = 0,0188 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}.$$

3. Розраховуємо безрозмірну інтенсивність подавання води за формулою(5.33):

$$y = \sqrt{\frac{0,0188}{0,038}} = 0,703 .$$

4. Розраховуємо безрозмірний час гасіння за формулою(5.34):

$$\tau = -0,703 - \ln(1 - 0,703) = 0,512 .$$

5. Розраховуємо розмірний час гасіння за фактичної інтенсивності подавання води  $0,38 \text{ л} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  за формулою (5.35):

$$\tau_{\text{гас}} = 1,12 \cdot 10^{-7} \left( \frac{1047}{0,03} \right) \cdot 0,512 = 69,8$$

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 тонкорозпи-леними струменями;
- б) коефіцієнт використання та коефіцієнт втрат води за фактичної інтенсив-ності подавання води на гасіння.

№	Матеріал, що горить	Коефіцієнт поверхні горіння $K_n$	Початкова температура води, °С	Фактична інтенсивність подавання води на гасіння, $л \cdot м^{-2} \cdot с^{-1}$
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  $20 \text{ м}^2$  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. Для матеріалів, представлених у таблиці, розрахувати такі параметри гасіння пожежі компактним струменем водою: загальну та питому витрати води, інтенсивність подавання, коефіцієнт використання води.

№	Матеріал, що горить	Коефіцієнт поверхні, $K_n$	Площа пожежі, $M^2$	Об'єм води, витрачений на гасіння, $M^3$	Час гасіння пожежі, хв	$t_0$ води, $^{\circ}C$
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	1,5	150	12,0	7	25
10	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
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

4\*. 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  $10 \text{ м}^2$ , масова швидкість вигорання диметилфталату дорівнює  $0,04 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , температура навколишнього середовища  $25 \text{ }^{\circ}C$ .

## Розділ 5. Параметри гасіння пожежі вогнегасними засобами

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	0,26	120	22	14
8	у виробках	0,38	150	7	10
9	органічне скло	0,27	10	10	11
10	костріця з льону	0,29	150	28	22
11	костріця 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
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. Для ізоляції від окисника осередків гетерогенного горіння (тління) і при гасінні пожеж класу D використовують **вогнегасні порошки спеціального призначення**. Порошок подають на поверхню гетерогенного горіння, де він 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. Тобто, необхідно, щоб концентрація продуктів газифікації горючої речовини (унаслідок випаровування, сублімації 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 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 низький поверхневий натяг і здатні різко змінювати його залежно від концентрації. Такі речовини називають **поверхнево-активними (ПАР)** – вони при розчиненні у воді накопичуються на поверхні розділу фаз та зменшують поверхневий натяг розчину.

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), фторпротеїнові, синтетичні (вуглеводневі), фторсинтетичні плівкоутворюючі (AFFF) та фторпротеїнові плівкоутворюючі (FFFP).

Залежно від сфери застосування піноутворювачі для гасіння пожеж поділяють на 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.

*Кратність піни* – відношення об’єму піни до об’єму робочого розчину піноутворювача, з якого її отримано:

$$K_{\text{пін}} = \frac{V_{\text{пін}}}{V_{\text{розч}}} \quad (5.39)$$

де  $V_{\text{пін}}$ ,  $V_{\text{розч}}$  – об’єм піни та розчину піноутворювача, з якого її отримано.

Розрізняють піни низької ( $K_{\text{пін}} < 20$ ), середньої ( $K_{\text{пін}} = 21 \div 200$ ) та високої кратності ( $K_{\text{пін}} > 200$ ). Залежно від способу отримання, значення кратності піни, утвореної з того ж самого розчину, може відрізнятися на декілька порядків. Піни однакової кратності можуть мати різну структуру, яку характеризують дисперсністю і товщиною рідинних оболонок.

*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

пінні залежить від умов її отримання.

*Стійкість пінни* – здатність пінни до збереження своєї структури протягом проміжку часу:

$$S_{\text{пін}} = \frac{V_{\text{пін}} \Delta t}{V_{\text{руїн}}}, \text{ с}, \quad (5.40)$$

де  $V_{\text{пін}}$  – початковий об'єм пінни;  $V_{\text{руїн}}$  – об'єм пінни, що руйнується за встановлений проміжок часу  $\Delta t$ .

Стійкість характеризує опір пінни руйнуванню (величина, обернена до інтенсивності руйнування) і може визначатися *часом напіврозпаду пінни*, тобто часом, протягом якого з пінни виділиться половина рідини.

Стійкість пінни залежить від її кратності, виду піноутворювача, його концентрації в розчині і структури пінни. Так, стійкість пінни є максимальною за кратності 80÷150, а підвищення кратності пінни більше за 500 призводить до зменшення її стійкості, через те що рідинні плівки стають настільки тонкими, що міцність пінни різко зменшується, пінна легко руйнується, здувається вітром і висхідними потоками продуктів згорання. Фторовані піноутворювачі утворюють пінну, яка майже не руйнується на поверхні вуглеводнів і погано руйнується на поверхні водорозчинних рідин.

*Ізолююча здатність пінни* – здатність пінни перешкоджати випаровуванню горючої рідини. Чисельно ізолюючу здатність виражають часом, протягом якого пара горючої рідини (зазвичай бензолу, нагрітого до 70 °С) проходить через певний шар пінни й утворює над цим шаром пароповітряну суміш, що займається від джерела запалювання.

Вогнегасна дія повітряно-механічної пінни полягає в ізоляції поверхні палива від факела полум'я, в охолодженні рідини, що горить, зменшенні унаслідок цього швидкості випаровування палива та кількості горючих парів, що надходять до зони горіння. Під час подавання пінни відбувається її руйнування від факела полум'я та нагрітої поверхні палива. Шар пінни, що накопичується, захищає частину поверхні горючої рідини від променистого теплового потоку полум'я, зменшує кількість пари, що надходить у зону горіння, знижує інтенсивність горіння. Швидкій ізоляції піною поверхні горючої рідини сприяє водна плівка, що утворюється з робочого розчину піноутворювача під час руйнування пінни, яка розтікається по поверхні горючої рідини. Одночасно розчин піноутворювача, що виділяється з пінни, охолоджує нагрітий поверхневий шар палива. Крім цього, під час гасіння в об'ємі горючої рідини відбувається конвекційний тепломасообмін, унаслідок якого конвекційні потоки, які спрямовані від місця виходу пінни до стінок резервуара, зрівнюють температуру рідини по всьому об'єму (за винятком «карманів», в яких тепломасообмін відбувається неалежно від основної маси рідини).

На вогнегасні властивості пінни 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 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 піни 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.

Плівкоутворюючі піноутворювачі спеціального призначення частіше є більш 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 плівкоутворюючого 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 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 під напругою (пожежа підкласу Е), через добру електропровідність водного розчину, для гасіння речовин та матеріалів, які вступають у хімічну взаємодію з

водою, що входить до складу піни, а саме, 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 ПУ-6ТС, необхідний для гасіння резервуара РВС-5000 із дизельним паливом, якщо площа дзеркала резервуара становить  $408 \text{ м}^2$ . Робочий розчин піноутворювача має  $6 \%$  концентрацію, інтенсивність подавання розчину піноутворювача дорівнює  $0,05 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ; нормативний час гасіння –  $15 \text{ хв}$ . Вважати, що втрати робочого розчину на стабілізацію піни становлять  $10 \%$ . 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  $408 \text{ м}^2$  протягом  $15 \text{ хв}$ . потрібно  $3635,3 \text{ л}$  піноутворювача ПУ-6ТС.

### **Приклад розв'язання задачі**

Розрахувати кратність та стійкість піни, якщо протягом  $75 \text{ с}$  об'єм піни зменшився з  $5 \text{ л}$  до  $4,85 \text{ л}$ , а при повному руйнуванні всього об'єму піни виділилося  $0,083 \text{ л}$  робочого розчину піноутворювача.

#### *Розв'язання*

1. Розраховуємо кратність піни за формулою (5.39):

$$K_{\text{пін}} = \frac{5}{0,083} = 60.$$

2. Розраховуємо стійкість піни за формулою (5.40):

$$S_{\text{пін}} = \frac{5 \cdot 75}{5 - 4,85} = 2500 \text{ с.}$$

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 м<sup>2</sup>, 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 л<sup>3</sup>·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>.

#### *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 фактичну інтенсивність подавання робочого розчину піноутворювача за формулою (5.6):

$$I_{\text{ф}} = \frac{3000}{300 \cdot 3,5 \cdot 60} = 0,14 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

3. Розраховуємо коефіцієнт використання піни за формулою (5.9):

$$K_{\text{вик}} = \frac{0,08}{0,14} = 0,57.$$

Висновок: фактична інтенсивність подавання 5%-ного розчину піноутворювача на гасіння бензину дорівнює 0,14 л·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>, 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

Розділ 5. Параметри гасіння пожежі 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 <sup>2</sup>	Об'єм розчину на гасіння, м <sup>3</sup>	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.

Дослід 1

№	Площа пожежі, м <sup>2</sup>	Час гасіння, с	Об'єм розчину піноутворювача, л
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

№	Площа пожежі, м <sup>2</sup>	Час гасіння, с	Об'єм розчину піноутворювача, л
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

№	Площа пожежі, м <sup>2</sup>	Час гасіння, с	Об'єм розчину піноутворювача, л
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

4. Визначити кратність піни за наведених у таблиці параметрів її подавання для гасіння пожежі резервуара.

№	Інтенсивність подавання піни, л·м <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup>	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

Таблиця 1 — Молярна ентальпія продуктів горіння за постійного тиску

Температура, К	Ентальпія, кДж·моль <sup>-1</sup>							
	Повітря	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	HF	HCl	HBr	SO <sub>2</sub>
298,15	8,66	9,35	9,91	8,67	8,60	35,99	76,50	44,61
400	11,64	13,36	13,36	11,64	11,56	38,96	79,50	78,86
600	17,62	22,25	20,41	17,56	17,40	44,83	85,40	88,15
800	23,86	32,14	27,93	23,71	23,28	50,82	91,50	98,33
1000	30,36	42,72	35,94	30,13	29,25	57,04	97,80	109,04
1200	37,09	53,77	44,48	36,78	35,36	63,48	104,40	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

Таблиця 2 — Об'ємна ентальпія продуктів горіння за постійного тиску

Температура, К	Ентальпія, кДж·м <sup>-2</sup>							
	Повітря	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	HF	HCl	HBr	SO <sub>2</sub>
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

Таблиця 3 — Молярна внутрішня енергія продуктів горіння за постійного об'єму

Температура, К	Внутрішня енергія продуктів горіння, кДж·моль <sup>-1</sup> ,							
	Повітря	СО <sub>2</sub>	Н <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	HF	HCl	HBr	SO <sub>2</sub>
298,15	6,24	6,93	7,49	6,25	6,18	33,57	74,10	42,19
400	8,39	10,11	10, 11	8,39	8,31	35,71	76,20	75,61
600	12,74	17,37	15,53	12,68	12,52	39,96	80,50	83,28
800	17,36	25,64	21,43	17,21	16,78	44,32	85,00	91,83
1000	22,23	34,59	27,81	22,00	21,12	48,91	89,70	100,92
1200	27,34	44,02	34,73	27,03	25,61	53,73	94,70	110,33
1400	32,62	53,81	42,13	32,23	30,25	58,74	99,80	119,98
1600	38,05	63,87	49,97	37,58	35,08	63,94	105,10	129,77
1800	43,57	74,07	58,19	43,02	40,07	69,27	110,60	139,69
2000	49,18	84,46	66,77	48,55	45,19	74,74	116,20	149,70
2200	54,88	94,94	75,53	54,09	50,39	80,20	121,70	159,68
2400	60,63	105,54	84,64	59,75	55,75	85,84	127,50	169,77
2600	65,45	116,19	93,95	65,44	61,19	91,54	133,30	180,09
2800	72,30	126,94	103,46	71,15	66,72	97,33	138,90	190,41
3000	78,22	137,72	113,18	76,92	72,36	103,26	145,10	200,78
3200	84,16	148,55	123,04	82,70	78,03	109,05	151,00	211,24
3400	90,14	159,43	133,06	88,51	83,77	114,99	157,10	221,74
3600	96,15	170,36	143,21	94,35	89,58	120,98	163,10	232,34
3800	102,20	181,31	153,49	100,20	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

Таблиця 4 — Теплоємність та теплота утворення простих речовин і продуктів горіння

Речовина	Теплоємність молярна $c_p$ , Дж·моль <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>	Коефіцієнти рівняння				Теплота утворення, $\Delta H_f^\circ$ кДж·моль <sup>-1</sup>
		$c_p = a + bT$ , Дж·моль <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>		$c_p = a + bT$ , Дж·м <sup>-3</sup> ·К <sup>-1</sup>		
		a	b·10 <sup>5</sup>	a	b·10 <sup>5</sup>	
повітря	29,16	28,62	4,08	1172,95	167,21	0,00
O <sub>2</sub>	29,36	31,46	3,39	1289,34	138,93	0,00
N <sub>2</sub>	29,10	27,87	4,27	1142,21	175,00	0,00
NO	29,83	29,58	3,85	1212,30	157,79	90,37
NO <sub>2</sub>	37,11	42,93	8,54	1759,43	350,00	33,89
CO	29,15	28,41	4,10	1164,34	168,03	-110,5
CO <sub>2</sub>	37,13	44,14	9,04	1809,02	370,49	-393,51
C (графіт)	8,53	17,15	4,27	—	—	0
H <sub>2</sub>	28,83	27,28	3,26	1118,03	133,61	0
H <sub>2</sub> O (газ)	33,56	30,00	10,71	1229,51	438,93	-241,84
H <sub>2</sub> O (рідина)	75,31	—	—	—	—	-285,84
HF	29,16	27,70	2,93	1135,25	120,08	-268,61
HCl	29,16	26,53	4,60	1087,30	188,52	-92,30
HBr	29,16	26,15	5,86	1071,72	240,16	-35,98
HJ	29,16	26,32	5,94	1078,69	243,44	25,94
SO <sub>2</sub>	39,87	42,55	12,55	1743,85	514,34	-296,90
SO <sub>3</sub>	50,63	57,32	26,86	2349,18	1100,82	-395,20
H <sub>2</sub> S	33,93	29,37	15,40	1203,69	631,15	-20,15
NH <sub>3</sub>	36,65	29,80	26,48	1221,31	1085,25	-46,19

Таблиця 5 – Вміст карбонових кислот у складі жирів

Жир, оля, масло	Вміст кислот у складі гліцеридів жиру, %																		
	олеїнова	пальмітолеїнова	лінолеїнова	олеостеаринова	ліноленова	ерукова (C <sub>20</sub> –C <sub>24</sub> )	рицинолева	петрозелінова	вакценова	ліканова	масляна	капронова	каприлова	капринова	лауринова	міристинова	пальмітинова	стеаринова	загальний вміст ненасичених кислот
кокосова	<10	0,5	<1									<2	6-9	<10	<51	<20	<10	1-5	
пальмоядрова	<10	0,5	<1									<2	6-9	<10	<51	<20	<10	1-5	
какао-масло	38		2														25	35	
пальмова	<52	<2	8-9												+	1-3	<45	4-6	
тунгова	4-9		<15	<83															4-5
ойтисикова	6			0,5					81										11
льняна	<20		<59		<45														5-10
перилова	<23		16		<70														6-7
конопляна	<16		<70		27												9		10
соєва	26	<1	54		7-9											+	<10	+	12-15
макова	<30		<73																10
соняшникова	<35		<72		<1														8-12
рижійна	27		50		19	<5													6-7
кунжутна	<49	0,5	<48													0,1	7-8	4-6	12-16
кукурудзяна	44		46														6-7		10
бавовняна	<44	<1	<50														<25	1-2	19-31
гірчична	28		20		2	50													4
коріандрова	32		7				53												8
рапсова	16		15		7-9	47											2		3
арахісова	<26																		13-22
оливкова	<85	<1	<20														+	+	9-12
касторова	3-9		3				85												3
вершкове	33	<5	4							3,7	<2	1	<3	<3	8-9		25	11	45
яловичий	<44	2,5	2-5		0,4				3						2-3		28	<29	

\* – кислоти з трьома ненасиченими зв'язками;

+ – кислота наявна у складі гліцеридів жиру.

Таблиця 6 — Хімічні формули деяких карбонових кислот

№	Назви кислот		Формули кислот	№	Назви кислот		Формули кислот
	систематичні	тривіальні			систематичні	тривіальні	
<i>Насичені кислоти</i>				<i>Ненасичені кислоти олійного ряду</i>			
1	метанова	мурашина	$\text{HCOOH}$	31	деценова		$\text{C}_9\text{H}_{17}\text{COOH}$
2	етанова	оцтова	$\text{CH}_3\text{COOH}$	32	додеценова	лауроолеїнова	$\text{C}_{11}\text{H}_{21}\text{COOH}$
3	пропанова	пропіонова	$\text{C}_2\text{H}_5\text{COOH}$	33	тетрадеценова	міристоолеїнова	$\text{C}_{13}\text{H}_{25}\text{COOH}$
4	бутанова	масляна	$\text{C}_3\text{H}_7\text{COOH}$	34	гексадеценова	пальмітоолеїнова	$\text{C}_{15}\text{H}_{29}\text{COOH}$
5	пентанова	валеріанова	$\text{C}_4\text{H}_9\text{COOH}$	35	октадеценова	олеїнова петрозелінова вакценова	$\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COOH}$
6	гексанова	капронова	$\text{C}_5\text{H}_{11}\text{COOH}$				
7	гептанова	енантова	$\text{C}_6\text{H}_{13}\text{COOH}$				
8	октанова	каприлова	$\text{C}_7\text{H}_{15}\text{COOH}$	36	ейкозанова	гадолеїнова	$\text{C}_{19}\text{H}_{37}\text{COOH}$
9	нонанова	пеларгонова	$\text{C}_8\text{H}_{17}\text{COOH}$	37	докозенова	цетолеїнова ерукова	$\text{C}_{21}\text{H}_{41}\text{COOH}$
10	деканова	капринова	$\text{C}_9\text{H}_{19}\text{COOH}$	38	тетракозенова	нервонова	$\text{C}_{23}\text{H}_{45}\text{COOH}$
11	гендеканова	ундеканова	$\text{C}_{10}\text{H}_{21}\text{COOH}$	<i>Ненасичені кислоти поліолефінового ряду</i>			
12	додеканова	лаурінова	$\text{C}_{11}\text{H}_{23}\text{COOH}$				
13	тридеканова		$\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{COOH}$	39	гексадекатриєнова	хірагонова	$\text{C}_{15}\text{H}_{25}\text{COOH}$
14	тетрадеканова	міристинова	$\text{C}_{13}\text{H}_{27}\text{COOH}$	40	октадекадієнова	лінолева	$\text{C}_{17}\text{H}_{31}\text{COOH}$
15	пентадеканова		$\text{C}_{14}\text{H}_{29}\text{COOH}$	41	октадекатриєнова	ліноленова елеостеаринова	$\text{C}_{17}\text{H}_{29}\text{COOH}$
16	гексадеканова	пальмітинова	$\text{C}_{15}\text{H}_{31}\text{COOH}$	42	октадекатетраєнова	парінарова	$\text{C}_{17}\text{H}_{27}\text{COOH}$
17	гептадеканова	маргарінова	$\text{C}_{16}\text{H}_{33}\text{COOH}$	43		абієтинова	$\text{C}_{19}\text{H}_{29}\text{COOH}$
18	октадеканова	стеаринова	$\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$	44	ейкозатетраєнова	арахідонова	$\text{C}_{19}\text{H}_{31}\text{COOH}$
19	нонадеканова		$\text{C}_{18}\text{H}_{37}\text{COOH}$	45	докозапентаєнова	клупанодонова	$\text{C}_{21}\text{H}_{33}\text{COOH}$
20	ейкозанова	арахінова	$\text{C}_{19}\text{H}_{39}\text{COOH}$	46	тетракозагексаєнова	нізинова	$\text{C}_{23}\text{H}_{35}\text{COOH}$
21	генейкозанова		$\text{C}_{20}\text{H}_{41}\text{COOH}$	<i>Ненасичені кислоти з додатковими оксигенвмісними групами</i>			
22	докозенова	бегенова	$\text{C}_{21}\text{H}_{43}\text{COOH}$	47	гідроксіолеїнова	рицинолева	$\text{C}_{27}\text{H}_{32}\text{OHCOOH}$
23	трикозанова		$\text{C}_{22}\text{H}_{45}\text{COOH}$	48	кетоелеостеаринова	ліканова	$\text{C}_{17}\text{H}_{27}\text{O}\text{COOH}$
24	тетракозанова		$\text{C}_{23}\text{H}_{47}\text{COOH}$				
25	пентакозанова		$\text{C}_{24}\text{H}_{49}\text{COOH}$				
26	гексакозанова	цератинова	$\text{C}_{25}\text{H}_{51}\text{COOH}$				
27	гептакозанова		$\text{C}_{26}\text{H}_{53}\text{COOH}$				
28	октакозанова	монтанова	$\text{C}_{27}\text{H}_{55}\text{COOH}$				

Таблиця 7 – Константи Таубкіна для розрахунку умов теплового самозаймання

№	Речовина або матеріал	$A_p$	$p_p$	$A_b$	$p_b$
1	бавовна	2,018	0,140	2,332	0,057
2	бавовна об'ємна 2-й сорт	1,986	0,157	2,334	0,061
3	барвник азопігмент жовтий світлостійкий $C_{16}H_{12}O_4N_4Cl_2$ (основної речовини 23 %)	1,983	0,144	2,396	0,175
4	барвник азопігмент бордо ЖВ $C_{21}H_{18}O_5N_4$	2,124	0,093	2,298	0,092
5	барвник азопігмент яскраво червоний 4ЖВ $C_{24}H_{17}O_3N_3Cl_2$ (основної речовини 40 %)	2,023	0,142	2,323	0,054
6	барвник дисперсний червоний Ж $C_{16}H_{18}O_3N_4$ (основної речовини 6 %)	1,894	0,146	2,198	0,096
7	барвник дисперсний бордо 2С $C_{17}H_{19}O_4N_4$	2,046	0,073	2,268	0,100
8	барвник дисперсний червоно-коричневий $C_{16}H_{16}O_3N_3Cl_2$	1,922	0,146	2,259	0,059
9	барвник дисперсний фіолетовий 4К $C_{17}H_{19}O_6N_5$	1,928	0,100	2,182	0,071
10	барвник диспергатор НФ	1,997	0,156	2,432	0,154
11	барвник зелений пігмент	1,900	0,150		
12	барвник нігрозин спирторозчинний	1,708	2,220	2,254	0,260
13	барвник кислотний фіолетовий $C_{37}H_{35}O_6N_3S_2Na$ (основної речовини 25 %)	2,117	0,060	2,248	0,024
14	барвник кислотний зелений $C_{37}H_{35}O_6N_2S_2Na$ (основної речовини 30 %)	2,105	0,067		
15	барвник бутиловий ксантогенат калію	1,853	0,133	2,196	0,132
16	барвник цианол блакитний 4 „3„	1,793	0,167	2,181	0,178
17	барвник кубазол „Сірий С„	2,009	0,100	2,340	0,225
18	барвник 4,8-діаміно 1,5-діоксиатрахінон	2,020	0,173	2,628	0,340
19	бітум нафтовий окиснений	1,724	0,259	2,291	0,122
20	борошно вітамінне з листя	1,897	0,157	2,268	0,106
21	борошно вітамінне з хвої	1,772	0,230	2,282	0,121
22	борошно кормове	1,507	0,322	2,103	0,244
23	борошно житнє	1,815	0,235	2,360	0,130
24	борошно шламове фосфорне	1,112	0,512	2,354	0,418
25	брикетоване трав'яне різання	1,888	0,177	2,266	0,124
26	повсть будівельна	1,726	0,279	2,350	0,140
27	повсть мінеральна по бігумній основі	1,724	0,259	2,291	0,122
28	вітамін В <sub>2</sub>	1,716	0,220	2,140	0,300
29	вугілля активоване марки АП-14	1,921	0,161	2,221	0,085
30	вугілля активоване марки Б	1,697	0,289	2,209	0,388
31	граніголь (шкірозамінник з нітроцелюлозним покриттям)	1,307	0,390	2,160	0,150
32	гіпсотермін у вигляді крихти	1,792	0,272	2,362	0,107
33	гудрон нафтовий	1,743	0,259	2,310	0,122
34	дерматин (шкірозамінник з покриттям на нітроцелюлозній основі)	1,661	0,230	2,160	0,090
		1,661	0,230	2,53	0,231

## Продовження таблиці 7

№	Речовина або матеріал	А <sub>p</sub>	п <sub>p</sub>	А <sub>b</sub>	п <sub>b</sub>
35	дріжджі кормові	1,895	0,174	2,279	0,168
36	дріжджі хлібні	2,307	0,041	2,147	0,073
37	добриво для теплиць	2,078	0,089	2,356	0,110
38	ізіп (бактеріальний препарат)	1,744	0,177	2,100	0,098
39	іонообмінна смола СГ № 30 (полідисперсний порошок)	2,146	0,106	2,350	0,048
40	картон покрівельний	1,974	0,159	2,334	0,142
41	каталізатор К-14	1,776	0,225	2,174	0,229
48	нітроамофоска НАФК, марка А (1:1:1)	1,950	0,121	2,249	0,491
49	нітроамофоска з кубовими залишками амінів в індустріальній олії НАФК КОА (1:1:1)	2,021	0,110	2,271	0,041
50	нітроамофоска із сечовиною	1,835	0,188	2,283	0,075
51	плита ДВП ізоляційна	1,864	0,207	2,381	0,075
52	плита ДВП напівтверда	1,834	0,227	2,332	0,104
53	плита мінераловатна з вмістом бітуму 19 %	2,202	0,134	2,313	0,119
54	плита торф'яна	1,760	0,248	2,271	0,117
55	полілак (смола поліакрилонітрильна)	1,956	0,113	2,230	0,100
56	препарат № 30"М", нанесений на бавовну (1:1)	1,923	0,132	2,220	0,050
57	препарат № 30"М", нанесений на шлаковату (1:2,8)	1,792	0,175	2,250	0,150
58	поліміцин	1,762	0,275	2,332	0,121
59	сіно	2,103	0,109	2,311	0,058
60	сірка	2,062	0,119	2,327	0,073
61	силос	1,884	0,182	2,300	0,113
62	солома пшениці	2,169	0,067	2,438	0,035
63	сланцевий пил	1,611	0,288	2,255	0,145
64	тирса соснова	1,855	0,219	2,296	0,096
65	торф	2,554	0,181	1,298	0,031
66	торф фрезерний	1,781	0,264	2,396	0,180
67	тізолін	1,707	0,228		
68	товарні дріжджі, вологість 8 %	1,867	0,184	2,254	0,077
69	потюн неферментований 4-й сорт	1,869	0,207	2,314	0,126
70	потюн ферментований 2 сорт	1,986	0,137	2,322	0,111
71	фітобактеріюміцин	1,937	0,204	2,353	0,175
72	целолігнін карбонізований ЦБК	1,902	0,170	2,192	0,102
73	цинеб 80 %	1,626	0,194	2,078	0,093
74	цинеб 80 % у суміші із ТНТД-80 у співвідношенні 17:3	1,650	0,146	1,973	0,151
75	шевелін	1,889	0,237	2,358	0,192



Таблиця 8 – Значення Гаусова інтеграла помилок (функції Крампа)

A	erf(A)	A	erf(A)	A	erf(A)	A	erf(A)
0,00	0,0000	0,50	0,5205	1,00	0,8427	1,50	0,9661
0,02	0,0216	0,52	0,5379	1,02	0,8508	1,52	0,9684
0,04	0,0451	0,54	0,5549	1,04	0,8586	1,54	0,9706
0,06	0,0676	0,56	0,5716	1,06	0,8661	1,56	0,9726
0,08	0,0901	0,58	0,5876	1,08	0,8733	1,58	0,9745
0,10	0,1125	0,60	0,6039	1,10	0,8802	1,60	0,9763
0,12	0,1348	0,62	0,6194	1,12	0,8868	1,62	0,9780
0,14	0,1569	0,64	0,6346	1,14	0,8931	1,64	0,9796
0,16	0,1790	0,66	0,6494	1,16	0,8991	1,66	0,9811
0,18	0,2009	0,68	0,6638	1,18	0,9048	1,68	0,9826
0,20	0,2227	0,70	0,6778	1,20	0,9103	1,70	0,9838
0,22	0,2443	0,72	0,6914	1,22	0,9155	1,72	0,9850
0,24	0,2657	0,74	0,7047	1,24	0,9205	1,74	0,9861
0,26	0,2869	0,76	0,7175	1,26	0,9252	1,76	0,9872
0,28	0,3079	0,78	0,7300	1,28	0,9297	1,78	0,9882
0,30	0,3286	0,80	0,7421	1,30	0,9340	1,80	0,9892
0,32	0,3491	0,82	0,7538	1,32	0,9381	1,90	0,9928
0,34	0,3694	0,84	0,7651	1,34	0,9419	2,00	0,9953
0,36	0,3893	0,86	0,7761	1,36	0,9456	2,10	0,9970
0,38	0,4090	0,88	0,7867	1,38	0,9460	2,20	0,9981
0,40	0,4284	0,90	0,7969	1,40	0,9523	2,30	0,9989
0,42	0,4475	0,92	0,8068	1,42	0,9554	2,40	0,9993
0,44	0,4662	0,94	0,8163	1,44	0,9583	2,50	0,9996
0,46	0,4847	0,96	0,8254	1,46	0,9611	2,60	0,9998
0,48	0,5027	0,98	0,8312	1,48	0,9637	2,70	0,9999

Таблиця 9 — Показники пожежовибухонебезпеки пилу органічних речовин

№	Вид пилу	Температура самоспалахування, °С		Нижня КМПП, г·м <sup>-3</sup>	Енергія запалювання, E <sub>min</sub> , мДж	Тиск вибуху P <sub>max</sub> , кПа	Швидкість зростання тиску, кПа·с <sup>-1</sup>
		аерозоль	аерогель				
1	арахіс	460	210	45	50	829	57140
2	бавовна	407	—	>44	25	630	17500
3	блок яйця	610	—	140	640	414	3570
4	борошно житнє	415	325	—	5,5	250	—
5	борошно кукурудзяне	—	—	37	46,4	—	—
6	борошно пшеничне	380	360	50	50	779	26430
7	борошно соєве	550	340	60	100	670	5710
8	борошно ячне	—	—	33	85	—	—
9	ванадій	500	490	220	8,0	350	6900
10	вітамін С	460	280	70	60	630	34290
11	вугілля	605	210	120	120	443	2860
12	вугілля деревне	530	180	140	20	714	12860
13	горох	560	—	50	40	710	43000
14	гума	350	—	25	50	—	26200
15	декстрин	410	440	50	40	707	64290
16	декстрин зерновий	410	390	40	40	886	50000
17	дріжджі	520	260	50	50	880	25000
18	желатина сушена	620	480	500	—	560	8570
19	кава	450	350	17	160	350	1800
20	казеїн	>460	—	45	60	460	3500
21	какао	500	200	65	120	493	8570
22	карбамід	450	—	70	80	600	14000
23	качан кукурудзяний	450	240	45	45	907	26430
24	келлін	—	—	24	4,6	465	13800
25	кора березова	450	250	20	60	710	52000
26	кориця	440	230	60	30	864	27860
27	крохмаль картопляний	420	320	40–60	45	670	15800
28	- // - кукурудзяний	390	—	40	30	1036	67860
29	- // - пшеничний	430	—	45	25	714	46430
30	лігнін	450	300	40	20	710	35000
31	лікоподій	480	310	25	40	610	50000
32	лвоцерна	460	—	100	320	460	7100
33	макуха солодкова	470	—	50	25	670	4290
34	молоко сухе	490	200	50	50	680	16430
35	метилцелюлоза	340	—	30	20	968	37900
36	папір	440	270	55	60	690	25710
37	пектин	410	200	75	35	943	57140
38	поліпропілен	—	325	40	3,4	590	39000
39	поліуретан	510	390	25	15	670	26000
40	поліетилен (н.т.)	—	417	33	5,6	630	37000
41	пробка	460	210	35	35	686	53570
42	протеїн сої	540	—	50	60	700	46430
43	рис	440	240	50	50	750	19290
44	сахароза	420	—	45	40	614	39290

Продовження таблиці 9

№	Вид пилу	Температура самоспалахування, °С		Нижня КМПП, г·м <sup>-3</sup>	Енергія запалювання, Е <sub>мін</sub> , мДж	Тиск вибуху Р <sub>max</sub> , кПа	Швидкість зростання тиску, кПа·с <sup>-1</sup>
		аерозоль	аерогель				
45	сечовинова смола	430	–	20	34	786	11430
46	сіно	490	180	70	260	440	4200
47	сірка	190	–	35	15	560	32400
48	торф	460	240	45	50	743	15710
49	целюлоза	410	300	45	40	836	57140
50	цитрусова шкірка	500	330	60	100	407	8570
51	цукор	370	400	45	30	780	35710
52	шеллак	390	–	>15	10	510	24800
53	шрот соняшниковий	775	–	7	13,8	–	–
54	етилцелюлоза	310	293	>25	10	840	49000
55	ячмінь солодовий	400	250	55	35	680	31430

Таблиця 10 – Показники пожежовибухонебезпеки пилу деяких кормів

№	Речовина	Елементний склад, мас. %					Показники пожежовибухонебезпеки				Q <sub>н</sub> , кДж·кг <sup>-1</sup>
		С	Н	О	N	S	Ф'н, г·м <sup>-3</sup>	Р <sub>max</sub> , кПа	dP/dt, мПа·с <sup>-1</sup>	Ф <sub>МВКК</sub> , об. %	
1	висівки пшеничні	43,6	7,0	44,7	3,4	1,25	55	483	6,2	11,8	17677
2	дріжджі кормові	35,6	6,2	44,58	7,9	5,8	36	650	9,2	11,0	19087
3	кукурудза дроблена	43,5	5,4	47,15	2,6	1,35	37	651	6,9	11,5	17543
4	пшениця дроблена	47	6,95	41,11	3,7	1,3	38	524	14,2	12,8	17322
5	ячмінь дроблений	43,5	6,0	46,01	3,1	1,42	47	645	11,4	12,3	17372
6	горох дроблений	45,8	6,5	42,8	3,6	1,3	52	620	19,3	11,8	18292
7	овес дроблений	46,6	6,77	43,23	3,1	0,34	54	650	4,67	12,0	19206
8	просо дроблене	44,1	6,82	46,02	2,5	0,58	36	–	–	–	18972
9	шрот соняшниковий	41,7	6,46	44,44	6,1	1,25	40	532	9,4	11,3	18368
10	шрот соєвий	43	6,57	42,32	6,9	1,2	49	673	12,5	16,0	18485
11	шрот бавовни	45,1	6,41	41,72	5,3	1,56	42	547	4,07	12,5	21786

Таблиця 11 – Параметри процесу горіння деяких речовин і матеріалів

№	Речовина	Об'єм повітря	Об'єм продуктів згорання	Коефіцієнт повноти згорання	Масова швидкість, вигорання	Лійна швидкість вигорання	Швидкість поширення горіння	Теплота згорання	Температура горіння	Температура самозапалювання	Мінімальна енергія запалювання
		$V^0_{\text{пов}}, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	$V^0_{\text{пр}}, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	$\eta$	$V_m, 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}}$	$V_h, 10^{-6} \text{ м/с}$	$V_l, \text{ м/с}$	$Q^0_{\text{в}}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$T_{\text{гор}}, \text{ К}$	$T_{\text{СС}}, \text{ }^\circ\text{С}$	$E_{\text{мін}}, \text{ мДж}$
1	аміак NH <sub>3</sub>	4,70	5,68	0,97	-	-	0,23	18618	1777	650	680
2	ацетилен C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	10,3	10,7	0,85	-	-	1,57	50038	2322	335	-
3	бутан C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	11,9	12,9	0,85	-	-	0,45	45810	-	405	0,25
4	водень H <sub>2</sub>	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 <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	12,4	13,6	0,85	-	-	-	52533	-	515	0,48
7	епоксіетан C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	6,06	6,83	0,93	-	-	0,9	27727	-	430	0,06
8	етилен C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	11,4	12,2	0,85	-	-	0,74	47071	-	435	0,12
9	сірководень H <sub>2</sub> S	4,71	5,03	0,97	-	-	0,41	15394	-	246	0,07
10	метан CH <sub>4</sub>	13,3	14,7	0,85	-	-	0,39	50125	1300	537	0,28
11	акрилова к-та C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	4,44	5,08	0,97	37,0	-	-	17763	-	440	-
12	амілацетат C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	7,80	8,56	0,93	-	-	0,4	29879	-	290	-
13	аміловий спирт C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	9,10	10,0	0,93	17,5	21,6	-	38385	-	300	-
14	анілін C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N	8,90	9,34	0,93	-	-	-	32385	-	617	-
15	ацетон C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	7,35	8,14	0,93	44	55,5	0,44	28890	-	535	0,41
16	бензол C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	10,3	10,7	0,85	72	83	0,48	38520	2300	560	0,22
17	бутанон-2 C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	8,14	8,92	0,93	66	-	0,58	34297	-	514	0,28
18	бутилацетат C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	7,35	8,14	0,93	52	-	0,4	28280	-	330	-
19	Бутанол C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	8,64	9,52	0,93	45,5	18	-	36805	-	340	0,28
20	гексан C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	11,8	12,7	0,85	103	-	0,39	45105	-	233	0,25
21	гексанол C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	8,0	8,92	0,93	43	-	-	39653	-	285	-
22	гліцерин C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	4,06	4,90	0,97	-	-	-	16102	-	400	-
23	дізпропіловий ефір C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	9,42	10,3	0,93	87,3	95-115	-	36552	-	443	1,1
24	дітиловий ефір C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	8,65	9,55	0,93	104	82	-	34147	-	446	-
25	етилацетат C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	6,06	6,83	0,93	55	22	-	23613	2213	446	0,28
26	етилбензол C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	10,6	11,1	0,85	88	-	-	41386	1592	446	0,2, 100°С
27	етиленгліколь C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	4,16	5,06	0,97	-	-	-	19319	-	412	-
28	етанол C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	6,95	7,91	0,93	33	33-42	0,56	27200	1800	400	0,25
29	ізопентан C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	11,9	12,8	0,86	105	167	0,37	45220	-	432	0,28
30	ізопропілбензол (кумол) C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	10,7	11,3	0,85	60	60-73	-	46663	1620	424	0,18
31	ізопропанол C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	8,0	8,92	0,93	31,3	42-45	0,42	30145	-	430	0,65
32	ізопропілформіат C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	6,06	6,83	0,93	73	-	-	23465	-	440	-
33	камфен C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	11,0	11,7	0,85	-	67-77	-	-	-	275	-
34	ксилол C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	10,6	11,1	0,85	29	33	0,4	41217	1557	490	0,53
35	метанол CH <sub>4</sub> O	4,99	6,06	0,97	26	20	0,57	23839	-	440	0,14

## Продовження таблиці 11

№	Речовина	$v^o_{пов}$	$v^o_{шт}$	$\eta$	$V_m, 10^{-3}$	$V_h, 10^{-6}$	$V_l$	$Q'_{ш}$	$T_{гор}$	$T_{сс}$	$E_{мін}$
		$\frac{м^3}{кг}$	$\frac{м^3}{кг}$		$\frac{кг}{м^2 \cdot с}$	м/с					
36	метилформіат $C_2H_4O_2$	9,52	11,5	0,97	60			19788	1691	456	0,4
37	пентан $C_5H_{12}$	11,9	12,8	0,86	90		0,39	45350		286	0,22
38	пінен $C_{10}H_{16}$	11,0	11,7	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 $C_8H_8$	11,9	10,7	0,85			0,57	42623	1590	490	0,99
41	толуол $C_7H_8$	10,5	11,9	0,85	63,0	60	0,39	40936	1635	535	0,26
42	хлорбензол $C_6H_5Cl$	6,63	7,03	0,93	45	28-47		27315	1530	637	
43	циклогексанол $C_6H_{12}O$	9,06	9,85	0,93	40	42-45		35114		300	$0,77$ $75^{\circ}C$
44	циклогексанон $C_6H_{10}O$	8,7	9,37	0,93	32	43-52	$0,7$ $100^{\circ}C$	34074		420	$1,3$ $50^{\circ}C$
45	капролактан $C_6H_{11}ON$	7,76	8,54	0,91	26	24		31849		400	
46	бензин	11,6	12,4	0,85	62,0	55-83		41870	1200	375	0,4
47	бітум	9,45	10,4	0,93				35000	-	390	-
48	газ	11,4	12,3	0,85	48	60-67		43540	-	240	-
49	дизельне пальне	11,5	12,0	0,85	42	55		48870	-	210	-
50	нафта	11,8	11,9	0,85	22-28	25-33		45000	1400	>222	
51	мазут	11,3	11,9	0,85	15,5	17		40000	1000	250	
52	паливо Т1	11,4	12,3	0,85	18,0			43040		220	$0,18$ $100^{\circ}C$
53	скипидар	11,0	11,6	0,85	-			44000		>245	$0,4$ $50^{\circ}C$
54	бавовна та вироби	3,95	4,64	0,97	5	220		15700			25А3
55	волокно штапельне	3,95	4,64	0,97	7			13800			
56	вугілля антрацит				-			32000		500	
57	вугілля буре				-			16300		410	
58	гумотехнічні вироби	10,2	10,8	0,85	15			33500		>350	50
59	дере- вина	вологість 10 %	4,20	4,86	0,97	19		13800	1200	>375	60
60		вологість 30 %	3,54	3,99	0,97	-					
61		меблі (штабель)				14(117)	16,6	(16600)			
63	калій				20	19,3					
64	карболітові вироби				6			26900			
65	каучук натуральний	10,0	10,8	0,85	18	14-17		42300		375	
66	каучук синтетичний	10,2	10,8	0,85	12	7-10		40200		>305	30
67	кіноплівка триацетатна	4,34	4,97	0,97	9			18800			
68	-/- - нітроцелюлозна	3,62	4,32	0,97	5			150642	1500	>120	
69	книги на стелажах	3,95	4,64	0,97	6-10			13400			
70	натрій				12-15			10880	900	330	
71	органічне скло				14			27737			
72	папір	3,95	4,64	0,97	11			13400			
73	полістирол	10,3	10,7	0,85	14			39000	1500	>439	3,4
74	поліпропілен у виробках	11,4	12,2	0,87	15			45600	1550	>325	3,4
75	поліетилен у виробках	11,4	12,2	0,85	10			47100	1950	>349	6-30
76	пінополіуретан	6,00	6,55	0,93	15	185		24300		20	
77	текстоліт А				7			22430		>500	
78	торф вологістю 10 %	5,01	5,66	0,93	10,6			16613	1100	405	
79	- / - / - 30 %	3,96	4,62	0,97	4-5	17-33		11300			

Таблиця 12 — Показники пожежної небезпеки технічних сумішей рідин

№	Продукт (склад суміші), % мас.	Сумарна формула	Молярна маса, кг·кмоль <sup>-1</sup>	Температура спалаху, °С	Температура само- спалахування, °С	Константи Ангуана				НКМШ, % (об)	Теплота згорання, кДж·кг <sup>-1</sup>
						А	В	С <sub>a</sub>	тем. інте- рвал, °С		
1	бензин Б-70 авіаційний	C <sub>7,267</sub> H <sub>14,796</sub>	102	-34	300	7,544	2629,7	384,2	-40- 100	0,79	44094
2	бензин А-72 (зимовий)	C <sub>6,991</sub> H <sub>13,108</sub>	97	-36	-	4,195	682,88	222,1	-60- 85	1,08	44239
3	бензин АІ-93 (літній)	C <sub>7,024</sub> H <sub>13,706</sub>	98	-36	-	4,123	664,98	221,7	-60- 95	1,06	43641
4	бензин АІ-93 (зимовий)	C <sub>6,911</sub> H <sub>12,168</sub>	95	-37	-	4,265	695,02	223,2	-60- 90	1,1	43641
5	дизельне пальне "З"	C <sub>12,343</sub> H <sub>23,889</sub>	172	>35	225	5,078	1255,7	199,5	40- 210	0,61	43590
6	дизельне пальне "Д"	C <sub>14,511</sub> H <sub>29,120</sub>	204	>40	210	5,001	1314,0	192,5	60- 240	0,52	43419
7	гас «20» освітлювальний	C <sub>13,595</sub> H <sub>28,860</sub>	192	>40	227	4,822	1211,7	194,7	40- 240	0,55	43692
8	гас «22» освітлювальний	C <sub>10,914</sub> H <sub>21,832</sub>	153	>40	245	5,596	1394,7	204,3	40- 190	0,64	43692
9	гас «25» освітлювальний	C <sub>11,054</sub> H <sub>21,752</sub>	155	>40	236	5,125	1223,9	203,3	40- 190	0,66	43692
10	ксілол (суміш ізомерів)	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106	+29	490	6,18	1478,2	220,5	0-50	1,1	43154
11	уайт-спірит	C <sub>10,5</sub> H <sub>21,0</sub>	147	>33	250	7,136	2218,3	273,2	20- 80	0,7	43996
12	масло трансформаторне	C <sub>21,74</sub> H <sub>42,28</sub> S <sub>0,04</sub>	304	>135	270	6,884	2524,2	174,0	164- 343	0,29	43111
13	масло АМТ-300	C <sub>22,25</sub> H <sub>33,48</sub> S <sub>0,34</sub> N <sub>0,07</sub>	313	>170	290	6,124	2240,0	167,9	170- 376	0,2	42257
14	масло АМТ-300Т	C <sub>19,04</sub> H <sub>24,58</sub> S <sub>0,196</sub> N <sub>0,04</sub>	260	>189	334	5,62	2023,8	164,1	171- 396	0,2	41778
15	розчинник Р-4 (н-бутилацетат 12, толуол 62, ацетон 26 %)	C <sub>5,452</sub> H <sub>7,606</sub> O <sub>0,535</sub>	82	-7	550	6,297	1373,7	242,8	-15- 100	1,65	40936
16	розчинник Р-4 (ксілол 15, толуол 70, ацетон 15 %)	C <sub>6,231</sub> H <sub>7,798</sub> O <sub>0,223</sub>	86	-4	-	6,279	1415,2	244,8	-15- 100	1,38	43154

## Продовження таблиці 12

№	Продукт (склад суміші), % мас.	Сумарна формула	Молярна маса, кг·кмоль <sup>-1</sup>	Температура спалаху, °С	Температура само- спалахування, °С	Константи Ангуана				НКМШ, % (об)	Теплота згорання, кДж·кг <sup>-1</sup>
						A	B	C <sub>a</sub>	темп. ін- тервал, °С		
17	розчинник Р-5 (н-бутилацетат 30, ксілол 40, ацетон 30 %)	C <sub>5,309</sub> H <sub>8,655</sub> O <sub>0,897</sub>	78	-9	-	6,303	1378,9	245,0	-15- 100	1,57	43154
18	розчинник Р-12 (н-бутилацетат 30, толуол 60, ксілол 10 %)	C <sub>6,837</sub> H <sub>9,217</sub> O <sub>0,515</sub>	99,6	10	-	6,173	1403,1	221,5	0- 100	1,26	43154
18	розчинник Р-12 (н-бутилацетат 30, толуол 60, ксілол 10 %)	C <sub>6,837</sub> H <sub>9,217</sub> O <sub>0,515</sub>	100	10	-	6,173	1403,1	221,5	0- 100	1,26	43154
19	розчинник М (н-бутилацетат 30, етилацетат 5, ізобутиловий спирт 5, етиловий спирт 60 %)	C <sub>2,761</sub> H <sub>7,147</sub> O <sub>1,187</sub>	59	6	397	8,057	2083,4	267,7	0-50	2,79	36743
20	розчинник РМЛ (толуол 10 %, етанол 64 %, етил- целозольв 16 %, н-бутанол 10 %)	C <sub>2,645</sub> H <sub>6,810</sub> O <sub>1,038</sub>	55	10	374	8,697	2487,7	290,9	0-50	2,85	40936
21	розчинник РМЛ- 218 (ксілол 21,5, н-бутилацетат 9, толуол 21,5, етил- целозольв 13, н-бутанол 3, етилацетат 16, етанол 16 %)	C <sub>4,791</sub> H <sub>8,318</sub> O <sub>0,974</sub>	82	4	399	7,202	1761,0	251,6	0-50	1,72	43154
22	розчинник РМЛ- 315 (ксілол 25, н-бутилацетат 18, толуол 25, етил- целозольв 17 %, н-бутанол 15 %)	C <sub>5,962</sub> H <sub>9,779</sub> O <sub>0,845</sub>	95	16	367	6,837	1699,7	241,0	0-50	1,25	43154

Таблиця 13 — Об'ємні теплоти згоряння та мінімальні енергії запалювання газів і рідин

Речовина		Теплота згоряння, кДж·м <sup>-3</sup>		Мінімальна енергія запалювання, мДж	Теплота утворення, ΔH <sub>f</sub> , кДж·моль <sup>-1</sup>	t <sub>св</sub> , °C
назва	формула	вища, Q'' <sub>в</sub>	нижча, Q'' <sub>н</sub>			
метан	CH <sub>4</sub>	39820	35880	0,28	-74,8	537
етан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	70310	64360	0,24	-84,68	515
пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	101210	93180	0,22	-103,8	470
н-бутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	133800	123570	0,25	-126,0	405
пентан	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	169270	150630	0,22	-146,4	286
н-гексан	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	187400	187400	0,25	-167,2	233
н-гептан	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	216880	200550	0,25	-187,7	223
циклогексан	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	—	—	0,22	-123,13	259
ізооктан	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	—	—	1,35	—	411
водень	H <sub>2</sub>	12750	10790	0,017	0	510
сульфід водню	H <sub>2</sub> S	25350	23700	0,068	—	246
сульфід карбону	CS <sub>2</sub>	—	—	0,009	88,7	102
оксид карбону	CO	12640	12640	—	-110,5	605
метанол	CH <sub>4</sub> O			0,14	-201,3	440
етилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>			0,12		435
ацетон	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O			0,41	-217,57	535
діетиловий ефір	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O			0,2	-252,2	180
етилцелюзолв	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>			0,15	-405,0	235
етилацетат	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>			0,282	-442,9	446
бензин АІ-92				0,3		435
уайт-спірит	C <sub>10,5</sub> H <sub>21</sub>	—	—	0,33		250
стирол	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>			0,99	155,6	450
толуол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>			0,26	50,17	535
п-ксилол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>			84,5	-24,4	528

Таблиця 14 – Теплота утворення та константи Антуана деяких рідин

Речовина	Формула	ΔH <sub>f</sub> , кДж·моль <sup>-1</sup>	Константи Антуана		
			А	В	С <sub>а</sub>
акрилова кислота	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	-336	7,0931	1913	236,0
акролеїн	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O	-58,5	6,190	1156,947	230,60
алловий спирт	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	-131,8	7,6594	1944,765	247,60
амілбензол	C <sub>11</sub> H <sub>16</sub>	-34,4	6,6832	2069,486	210,43
амілметилкетон	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	-291	9,2537	3336,004	310,07
аміловий спирт	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	-302,5	6,307	1287,625	161,33
амілциклогексан	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>	-233,8	6,33628	1808,242	213,89
анілін	C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N	109	6,04162	1457,02	176,19
ацетон	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	-217,57	6,3755	1281,721	237,09
ацетонітрил	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> N	-25,62	7,27	1838	273,00
бензилбензоат	C <sub>14</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	-372,84	9,2	4057	273,00
бензиловий спирт	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	-220,86	8,7223	2664,68	279,64
бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	82,9	5,6139	902,275	178,10
бутаналь	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	-205	7,0839	1768,4	273,00



## Додатки

Речовина	Формула	$\Delta H_f^\circ$ , кДж·моль <sup>-1</sup>	Константи Антуана		
			A	B	C <sub>a</sub>
бутандіол-2,3	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	-445,5	8,67	3024	273,00
бутанова кислота	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-486,3	7,4394	2158,56	233,66
бутанон	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	-238,3	6,1494	1292,79	232,34
бутилбензол	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	-13,7	6,5495	1882,49	230,94
бутилметилкетон	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	-272	6,6317	1613,425	221,67
бутанол	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	-274,6	8,7223	2664,68	279,64
бутилфенол	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O	-285,12	6,4777	1928,57	207,18
бутилформіат	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	-437,6	6,8194	1711,66	249,58
валеріанова кислота	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	-490,4	8,0456	2661,49	256,17
валеріановий альдегід	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	-227,8	6,4554	1460,27	225,18
валеролактон	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-421,14	7,331	2540,4	273,00
гексадекан	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	-373,3	5,9124	1656,405	136,87
гексадієн	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	-94,1	6,132	1184,99	227,70
гексан	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	167,2	5,9951	1166,27	223,66
гексилметилкетон	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	-311,7	6,9090	1980,4	230,92
гексилловий спирт	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	-319,8	6,1789	1293,83	152,63
гептан	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	-187,7	6,0764	1295,405	219,82
декан	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	-249,6	6,5202	1809,975	227,70
діацетоновий спирт	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	-425	7,216	2188	253,00
дибутиловий ефір	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	-333,9	6,4403	1648,4	230,00
дізопропілкетон	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	-291	7,1	2021,4	273,00
діоксан	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-434,16	6,989	1866,7	273,00
дипропіловий ефір	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	-293,4	6,240	1397,34	240,20
діетиламін	C <sub>4</sub> H <sub>11</sub> N	-137,34	7,22	1709	273,00
діетиленгліколь	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	-642,84	7,2767	2727,3	273,00
діетилізопропілметан	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	-211,2	5,9885	1318,12	215,30
діетилкетон	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	-252	6,3555	1477,021	237,52
діетилловий ефір	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	-252,2	6,1228	1098,945	232,37
додекан	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	-290,9	7,2957	2463,739	253,88
етилацетат	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-442,9	6,2267	1244,95	217,88
етилбензол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	29,9	6,3587	1590,66	229,58
етиленгліколь	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	-453,8	8,1375	2753,183	252,0
етилтолуол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	-1,6	6,4147	1732,11	228,10
етилформіат	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	-371,2	6,1339	1123,943	218,25
етилциклогексан	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	-171,7	5,9953	1384,036	215,13
ізобутилацетат	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	-535,5	6,24133	1332,3	205,57
ізопропенілбензол	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub>	-112,9	6,3696	1680,13	219,6
крезол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	-158	6,6329	1856,356	199,07
ксилідин	C <sub>8</sub> H <sub>11</sub> N	-85,26	6,7578	2035,4	216,00
кумол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	-21,5	6,0675	1461,643	207,56
мезитилен	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	-15,9	6,3584	1691,49	224,20
метиламінол	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	-344,2	7,5919	2174,869	257,78
метанол	CH <sub>4</sub> O	-201,3	7,352	1660,45	245,80
метилацетат	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	-409,1	6,1901	1157,63	219,73
метилбутират	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	-485	6,2263	1338	214,34
метилгексан-2	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	-194,9	5,9981	1236,026	219,55
метилпентальдегід	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	-249,1	6,465	1519,1	223,65
метилпропіонат	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-438,8	6,74	1667	273,00

## Додатки

Речовина	Формула	$\Delta H_f^0$ , кДж·моль <sup>-1</sup>	Константи Антуана		
			A	B	C <sub>a</sub>
метилпропілкетон	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	-258,6	6,9891	1870,4	273,20
метилформіат	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	-349,8	6,4589	1206,148	239,02
метилциклогексан	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	-154,7	5,9518	1272,864	221,63
метилциклопентан	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	-106,6	5,9877	1186,059	226,04
метоксиетилацетат	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	-573,6	6,2500	1447,037	196,10
мурашина кислота	CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	-210,6	4,9927	765,889	154,55
м-ксилол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	17,25	6,588	1906,8	234,9
нонан	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	-229	6,1777	1510,695	211,50
нонловий спирт	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> O	-387	5,8006	1276,626	123,10
октан	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	-208	6,0939	1379,556	211,89
октаналь	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	-643,96	6,7024	1815,764	218,61
октанова кислота	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	-565,3	5,2690	1014,81	72,77
октиловий спирт	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	-357	5,7209	1170	120,00
октилциклогексан	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>	-295,6	6,6848	2213,668	209,50
оцтова кислота	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	-437,3	7,1033	1906,53	255,97
оцтовий ангідрид	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	-328	6,274	1444,718	199,82
пентан	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	-146,4	5,9720	1062,555	231,81
пентанол-2	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	-314,13	6,3504	1254,854	169,60
піридин	C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N	140,6	6,007	1281,3	205,00
пірол	C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> N	63	6,4196	1501,563	210,40
пропаналь	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	-221,7	6,0657	1163,288	231,17
пропіламін	C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> N	-101,5	6,3854	1243,947	235,88
пропілбензол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	-7,9	6,2971	1627,827	220,49
пропілбутират	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	-556,8	6,6514	1756,37	234,96
пропіленгліколь	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-499,9	8,640	3039	273,00
пропанол	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	-257,7	7,4420	1751,981	225,13
пропілформіат	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-417	5,9724	1126,539	203,46
пропілциклогексан	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	-193,3	6,0135	1461,715	207,99
пропілциклопентан	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	-148	6,0796	1438,79	222,23
пропілетилкетон	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	-272	6,4469	1538,995	222,58
пропіонова кислота	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	-466	7,839	2410,0	273,00
пропіоновий ангідрид	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	-289	4,944	810,31	108,74
стирол	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	155,6	7,0654	2123,057	272,99
тетрагідрофуран	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	-214	6,1200	1202,29	226,25
тетраметилбензол	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	-41,9	6,2418	1693,156	195,23
тетраметилгептан	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	-276,2	6,2872	1715,271	216,61
тетраметилпентан	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	-273,2	5,9536	1397,483	213,70
толуол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	50,17	6,050	1328,171	217,71
тридекан	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	-311,5	7,0938	2468,91	250,31
триметилбензол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	-15,9	6,4429	1791,164	227,84
триметилгексан	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	-254	5,9602	1324,049	210,74
ундеканол	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O	-422,5	5,6520	1250,0	100,0
фенілетиловий ефір	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	-84	6,5277	1808,8	230,0
хлорбензол	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl	51,4	6,3861	1607,316	235,351
цимол	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	28,8	6,6498	1893,381	232,66

Таблиця 15 – Залежність тиску насиченої пари від температури

Речовина	Формула	Температура, °C, за тиску, кПа					
		0,133	1,333	5,333	13,33	53,33	101,3
акрилова кислота	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	3,5	39,0	66,2	86,1	122,0	141,0
акролеїн	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O	-64,5	-36,7	-15,0	2,5	34,5	52,5
аліловий спирт	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	-20,0	10,5	33,4	50,0	80,2	96,6
амлілбензол	C <sub>11</sub> H <sub>16</sub>	40,7	80,6	140,0	149,9	199,6	205,4
амілметилкетон	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	19,3	55,5	81,2	100,0	133,2	150,2
аміловий спирт	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	13,6	44,9	68,0	85,8	119,8	137,8
амілциклогексан	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>	34,9	75,3	82,4	131,1	140,2	202,8
анілін	C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N	31,0	68,2	96,9	119,4	160,9	184,0
ацетон	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	-59,4	-31,1	-9,4	7,7	39,5	56,5
ацетонітрил	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> N	-47,0	-16,3	7,0	25,8	61,0	80,0
бензилбензоат	C <sub>14</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	135,6	188,0	227,6	258,0	313,5	343,0
бензиловий спирт	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	50,5	89,2	106,5	141,2	183,0	205,1
бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	-45,0	-11,6	7,5	26,1	60,6	80,1
бутаналь	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	-50,8	-18,9	5,2	23,8	57,1	75,2
бутандіол-2,3	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	22,2	85,3	117,4	141,2	183,8	206,5
бутанова кислота	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	25,5	61,5	88,0	108,0	144,0	163,5
бутанон	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	-48,3	-17,7	6,0	25,0	60,0	79,6
ізобутилацетат	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	-21,2	12,8	39,2	59,7	97,5	118,0
бутилбензол	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	24,6	62,4	91,9	115,3	158,8	183,3
бутилметилкетон	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	7,7	38,8	62,0	79,8	111,0	127,5
бутанол	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	-1,2	30,2	53,4	70,1	100,8	117,5
бутилфенол	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O	64,6	106,5	125,0	163,5	195,7	235,0
бутилформіат	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	-26,4	6,1	31,6	51,0	86,2	106,0
валеріанова кислота	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	42,2	79,8	107,8	128,3	165,0	184,4
валеріановий альдегід	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	-12,0	17,9	39,8	56,8	86,8	103,3
валеролактон	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	37,5	79,8	101,9	136,5	182,3	207,5
гексадекан	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	105,0	149,0	182,8	209,5	259,0	286,8
гексадієн	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	-47,1	-17,7	4,2	23,4	67,2	76,0
гексан	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	-54,0	-25,0	-2,3	15,8	49,6	68,7
гексилметилкетон	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	23,6	60,9	89,8	111,7	151,0	172,9
гексильовий спирт	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	24,4	58,2	83,7	102,8	138,0	157,0
гептан	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	-33,0	-2,0	22,4	41,8	78,0	98,4
декан	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	21,0	57,7	86,0	108,6	150,5	174,1
діацетонний спирт	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	22,0	58,0	86,7	108,2	147,5	167,9
дибутиловий ефір	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	-43,8	-11,7	13,3	33,0	69,4	89,8
дизопропілкетон	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	5,2	36,7	59,6	77,0	108,0	123,7
діоксан	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-35,8	-1,2	25,2	45,1	81,8	101,1
дипропіловий ефір	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	-43,3	-11,8	13,2	33,0	69,5	89,5
діетиламін	C <sub>4</sub> H <sub>11</sub> N	-38,9	-33,0	-11,3	6,0	38,0	55,5
діетилгліколь	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	91,8	133,8	164,3	187,5	226,5	244,8
діетилізопропілметан	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	23,3	26,0	35,2	55,7	94,0	115,6
діетилкетон	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	-12,7	17,2	39,4	56,2	86,3	102,7
діетильовий ефір	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	-74,3	-48,0	-27,7	-11,5	18,9	34,6
додекан	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	52,0	91,6	122,0	146,1	191,0	216,3
етилацетат	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-43,4	-13,5	9,1	27,0	59,3	77,1
етилбензол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	-9,2	25,9	52,8	74,1	113,8	136,2
етилгліколь	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	53,0	92,1	120,0	141,8	178,5	197,8

## Продовження таблиці 15

Речовина	Формула	Температура, °С, за тиску, кПа					
		0,133	1,333	5,333	13,33	53,33	101,3
етилтолуол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	11,9	48,5	77,0	99,6	141,6	165,1
етилформіат	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	-60,5	-33,0	-11,5	5,4	37,1	54,3
етилциклогексан	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	-13,7	20,6	47,6	69,0	109,1	131,8
ізопропенілбензол	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub>	11,6	48,5	70,6	99,6	143,9	165,4
крезол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	46,9	85,7	103,0	137,7	179,0	201,9
ксилідин	C <sub>8</sub> H <sub>11</sub> N	50,7	90,9	109,1	145,5	188,0	214,0
кумол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	2,8	38,3	66,1	88,1	129,2	152,4
мезитилен	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	12,3	48,8	77,2	99,7	141,4	164,7
метиламінол	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	15,4	49,6	74,7	94,2	129,8	147,9
метилацетат	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	-57,2	-29,3	-7,9	9,4	40,0	57,8
метилбутират	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	-26,8	5,0	29,6	48,0	83,1	102,3
метилгексан-2	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	-39,7	-9,1	14,9	34,1	69,8	90,1
метанол	CH <sub>4</sub> O	-44,0	-16,2	5,0	21,2	49,9	64,7
метилпентальдегід	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	-16,7	16,0	41,1	60,8	97,0	117,0
метилпропіонат	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-42,0	-11,8	11,0	29,0	61,8	79,8
метилпропілкетон	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	-12,0	17,9	39,8	56,8	86,8	103,3
метилформіат	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	-74,2	-48,6	-28,7	-12,9	16,0	32,0
метилциклогексан	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	-35,2	3,2	22,0	42,1	79,6	100,9
метилциклопентан	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	-53,2	-23,7	-0,6	17,9	52,3	71,8
метоксиетилацетат	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	7,0	40,1	65,9	86,2	123,8	144,8
мурашина кислота	CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	-20,0	2,1	24,0	43,8	80,3	100,6
м-ксилол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	-7,2	28,2	55,3	76,8	116,7	139,1
нонан	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	4,0	39,1	66,3	87,9	128,1	150,8
нонловий спирт	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> O	59,5	99,7	129,0	151,3	192,1	213,5
октан	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	-14,0	19,2	45,1	65,7	104,0	125,7
октаналь	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	73,4	101,2	120,0	133,9	156,5	168,5
октанова кислота	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	92,3	124,0	150,6	172,2	218,9	237,5
октиловий спирт	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	54,0	88,3	115,2	135,2	173,8	195,2
октилциклогексан	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>	77,0	122,0	142,8	184,3	220,5	264,0
пентан	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	-76,0	-50,1	-29,3	-12,6	18,5	36,1
пентанол-2	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	1,5	32,2	54,1	70,7	102,3	119,7
піридин	C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N	-18,9	13,2	38,0	57,8	95,6	115,2
пірол	C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> N	-19,5	15,0	41,8	63,6	104,2	129,7
пропаналь	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	-63,6	-35,4	-13,3	4,3	36,9	55,4
пропіламін	C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> N	-64,4	-37,2	-16,0	0,5	31,5	48,5
пропілбензол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	7,4	43,4	71,6	94,0	135,7	159,2
пропілбутират	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	-1,6	34,0	61,5	82,6	121,7	142,7
пропіленгліколь	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	45,5	83,2	111,2	132,0	168,0	188,2
пропанол	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	-15,0	14,7	36,4	52,8	82,0	97,8
пропілформіат	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-43,0	-12,6	10,8	29,5	62,6	81,3
пропілциклогексан	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	4,2	40,2	68,5	91,0	133,0	156,7
пропілциклопентан	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	-12,6	21,3	47,9	69,1	108,6	130,9
пропілетилкетон	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	-12,4	20,9	46,5	66,6	103,5	124,0
пропонова кислота	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	4,6	39,7	65,8	85,1	122,0	141,1
пропіоновий ангідрид	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	20,6	57,7	85,6	107,2	146,0	167,0
стирол	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	-1,6	32,8	60,6	82,5	122,7	145,2
тетрагідрофуран	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	-54,4	-25,7	-3,3	14,4	47,4	66,0

Закінчення таблиці 15

Речовина	Формула	Температура °С, за тиску, кПа					
		0,133	1,333	5,333	13,33	53,33	101,3
тетраметилбензол	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	34,8	74,5	106,2	129,2	173,0	198,1
тетраметилгептан	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	37,0	75,1	104,6	127,9	171,4	195,9
тетраметилпентан	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	-13,0	20,8	48,0	69,6	110,1	133,0
толуол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	-26,1	6,4	31,8	51,9	89,5	110,6
тридекан	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	67,0	107,1	138,4	163,3	209,5	235,4
триметилбензол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	19,3	56,8	86,0	109,1	152,0	176,1
триметилгексан	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	-17,0	16,2	42,3	63,1	102,0	124,1
оцтова кислота	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	-17,2	17,1	42,4	62,2	98,1	117,9
оцтовий ангідрид	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	2,4	31,2	60,6	80,7	117,9	138,6
ундеканол	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O	71,1	112,8	143,7	167,2	209,8	232,0
фенілетилловий ефір	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	18,1	56,4	86,6	108,4	149,8	172,0
цимол	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	17,3	56,8	87,1	110,9	154,3	178,3

Таблиця 16 – Лінійна швидкість поширення полум'я під час пожежі на різних об'єктах

№	Вид об'єкта	Лінійна швидкість, м·с <sup>-1</sup> ·10 <sup>-2</sup>
1	Адміністративні будівлі	1,7-2,5
2	Бібліотеки, книгосховища, архіви	0,83-1,7
3	Деревообробні підприємства: лісопилльні цехи та будівлі I, II, III ступеня вогнестійкості //- та 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 м·с <sup>-1</sup> , вологість 40 %) сосна сфагнова ялина сосна - волога підстилка сосновий бор – суха підстилка	до 2,3 ≥ 7,0 ≥ 23,7 ≥ 30,0
8	Рослинність, лісова підстилка, підріст, деревостій під час верхових пожеж за швидкості вітру м·с <sup>-1</sup> : 8-9 10-12 на флангах і в тилу за швидкості вітру, м·с <sup>-1</sup> : 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
11	Морські і річкові судна: горюча надбудова під час внутрішньої пожежі - //- під час зовнішньої пожежі внутрішні пожежі за наявності синтетичного оздоблення і відкритих прорізів	2-4,5 3,3-10,0 1,7-3,3

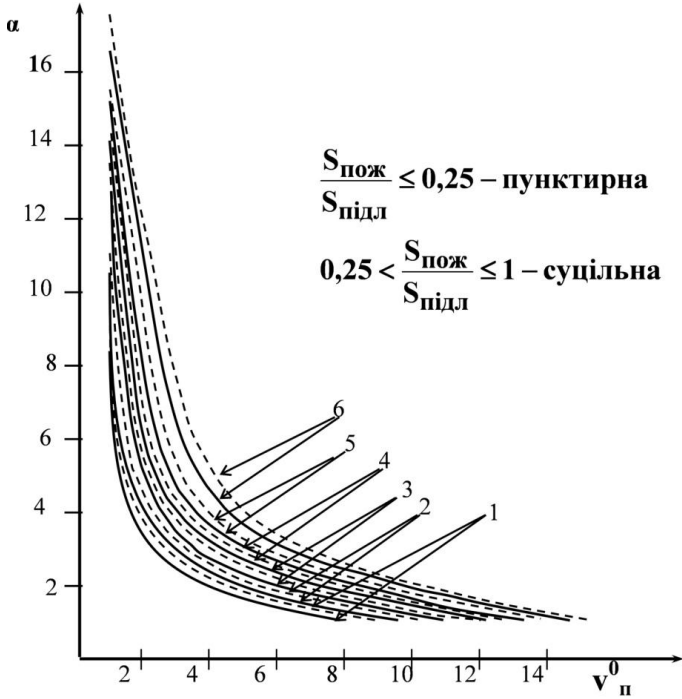
## Продовження таблиці 16

№	Вид об'єкта	Лінійна швидкість, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot 10^{-2}$
12	Пінополіуретан	1,2-1,5
13	Підприємства текстильної промисловості: приміщення текстильного виробництва - // - 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	Сушильні відділення шкірзаводів	2,5-3,7
17	Торговельні підприємства, склади і бази товаро-матеріальних цінностей	0,83-2
18	Склади: торф у штабелях льоноволокна текстильних виробів паперу в рулонах гумотехнічних виробів у приміщеннях - // -, штабелі на відкритих майданчиках 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
19	Театри і будинки культури (сцени)	1,7-5,0
20	Сільські населені пункти: житлова щільна забудова 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
21	Типографії	0,83-1,3
22	Фрезерний торф на місці видобування за швидкості витру, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ : 10-14 18-20	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

Таблиця 17 – Нормативна інтенсивність подавання води на гасіння пожежі деяких речовин і матеріалів

№	Матеріал, що горить	Нормативна інтенсивність подавання води, л·м <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup>
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	- // - круглі 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 $t_{\text{сн}} < 28^{\circ}\text{C}$	0,40
22	- // - $t_{\text{сн}} 28–60^{\circ}\text{C}$	0,30
23	- // - $t_{\text{сн}} > 60^{\circ}\text{C}$	0,20
24	Нафта і конденсат навколо свердловини	0,20
25	Спирти	0,40

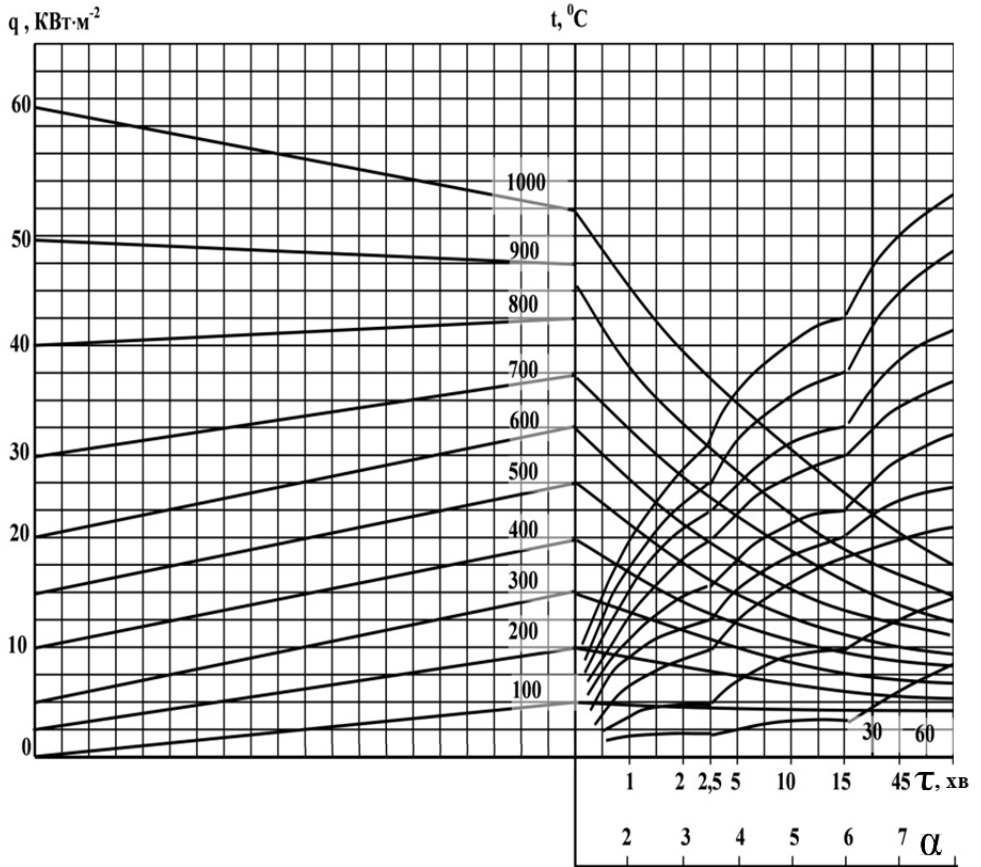
## Номограма 18 – Визначення коефіцієнта надлишку повітря





- Крива 1 –  $S_{\text{прип}}/S_{\text{пож}} \leq 0,04$   
 Крива 2 –  $0,04 < S_{\text{прип}}/S_{\text{пож}} \leq 0,06$   
 Крива 3 –  $0,06 < S_{\text{прип}}/S_{\text{пож}} \leq 0,10$   
 Крива 4 –  $0,10 < S_{\text{прип}}/S_{\text{пож}} \leq 0,17$   
 Крива 5 –  $0,17 < S_{\text{прип}}/S_{\text{пож}} \leq 0,25$   
 Крива 6 –  $0,25 < S_{\text{прип}}/S_{\text{пож}}$



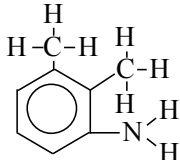
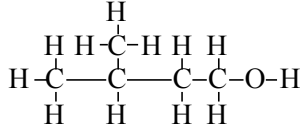
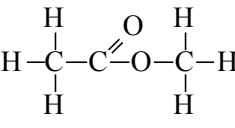
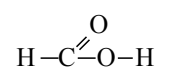
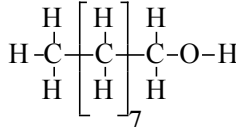
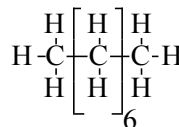
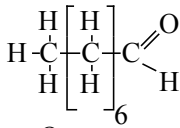
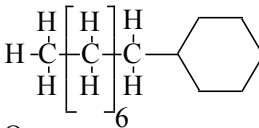
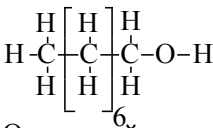
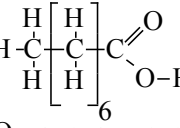
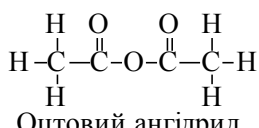
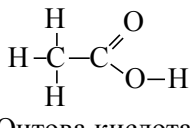
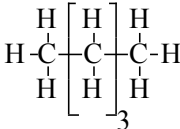
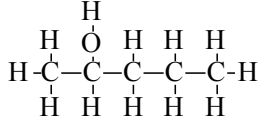
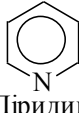
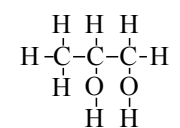
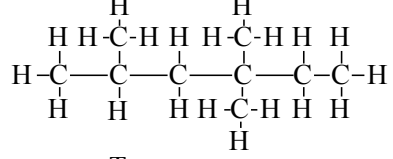
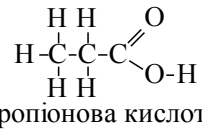
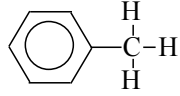
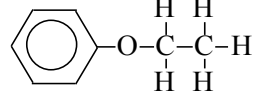

Номограма 15 – Визначення температури пожежі



Таблиця 20 – Структурні формули деяких органічних сполук

$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \text{C} = \text{C} - \text{C} \begin{array}{l} \nearrow \text{O} \\ \searrow \text{O} - \text{H} \end{array} \\   \\ \text{H} \end{array}$ <p>Акрилова кислота</p>	$\begin{array}{cccccccc} \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & & \text{H} & \\   &   &   &   &   & &   & \\ \text{H} - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{H} \\   &   &   &   &   & &   & \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & & \text{O} & \text{H} \end{array}$ <p>Амілметилкетон</p>	$\begin{array}{ccccccc} \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & & \\   &   &   &   &   & & \\ \text{H} - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{O} & - \text{H} \\   &   &   &   &   & & \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & & \end{array}$ <p>Аміловий спирт</p>
$\begin{array}{ccc} \text{H} & & \text{H} \\   & &   \\ \text{H} - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} - \text{H} \\   &    &   \\ \text{H} & \text{O} & \text{H} \end{array}$ <p>Ацетон</p>	 $\begin{array}{ccccccc} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \\ &   &   &   &   &   & \\ \text{C}_6\text{H}_{11} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{H} \\ &   &   &   &   &   & \\ & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \end{array}$ <p>Амілциклогексан</p>	$\begin{array}{cccc} \text{H} & \text{H} & \text{H} & \\   &   &   & \\ \text{H} - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} \begin{array}{l} \nearrow \text{O} \\ \searrow \text{H} \end{array} \\   &   &   & \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \end{array}$ <p>Бутаналь</p>
$\begin{array}{cccc} \text{H} & \text{H} & \text{H} & \\   &   &   & \\ \text{H} - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} \begin{array}{l} \nearrow \text{O} \\ \searrow \text{O} - \text{H} \end{array} \\   &   &   & \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \end{array}$ <p>Бутанова кислота</p>	$\begin{array}{cccc} \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\   &   &   &   \\ \text{H} - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} - \text{O} - \text{H} \\   &   &   &   \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array}$ <p>Бутанол</p>	$\begin{array}{cccc} \text{H} & & \text{H} & \text{H} \\   & &   &   \\ \text{H} - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} - \text{H} \\   &    &   &   \\ \text{H} & \text{O} & \text{H} & \text{H} \end{array}$ <p>Бутанон</p>
 $\begin{array}{cccc} & \text{H} & & \\ &   & & \\ \text{C}_6\text{H}_4 & - \text{C} - \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ &   &   &   \\ & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ \text{H} - \text{O} & & & \end{array}$ <p>Бутилфенол</p>	$\begin{array}{cccc} \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\   &   &   &   \\ \text{H} - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} - \text{C} \begin{array}{l} \nearrow \text{O} \\ \searrow \text{O} - \text{H} \end{array} \\   &   &   &   \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array}$ <p>Валеріанова кислота</p>	$\begin{array}{cccc} \text{H} & & \text{H} & \text{H} \\   & &   &   \\ \text{H} - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} - \text{H} \\   &    &   &   &   \\ \text{H} & \text{O} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & & & & \left[ \begin{array}{c} \text{H} \\   \\ \text{H} \end{array} \right]_4 \\ & & & &   \\ & & & & \text{H} \end{array}$ <p>Гексилметилкетон</p>
$\begin{array}{ccc} \text{H} & & \text{H} \\   & &   \\ \text{H} - \text{O} - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} - \text{H} \\   &   &   \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & & \left[ \begin{array}{c} \text{H} \\   \\ \text{H} \end{array} \right]_4 \end{array}$ <p>Гексильовий спирт</p>	$\begin{array}{cccc} & & \text{H} & \\ & &   & \\ \text{H} & & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\   & &   &   &   \\ \text{H} - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} - \text{H} \\   &    &   &   &   \\ \text{H} & \text{O} & \text{H} & \text{O} & \text{H} \\ & & &   & \\ & & & \text{H} & \end{array}$ <p>Диацетоновий спирт</p>	$\begin{array}{cccc} \text{H} & & \text{H} & \text{H} \\   & &   &   \\ \text{H} - \text{C} & - \text{C} & - \text{N} & - \text{C} & - \text{C} - \text{H} \\   &   &   &   &   \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array}$ <p>Диетиламін</p>
$\begin{array}{cccc} \text{H} & \text{H} & & \text{H} & \text{H} \\   &   & &   &   \\ \text{H} - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} - \text{H} \\   &   &    &   &   \\ \text{H} & \text{H} & \text{O} & \text{H} & \text{H} \end{array}$ <p>Диетилкетон</p>	$\begin{array}{cccc} & \text{H} & & \text{H} & \\ &   & &   & \\ \text{H} & \text{H} & - \text{C} - \text{H} & \text{H} & - \text{C} - \text{H} & \text{H} \\   & &   &   &   & \\ \text{H} - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{H} \\   &   &    &   &   & \\ \text{H} & \text{H} & \text{O} & \text{H} & \text{H} & \end{array}$ <p>Дізіпропілкетон</p>	$\begin{array}{cccc} & & \text{H} & & \\ & &   & & \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & - \text{C} - \text{H} & \text{H} & \\   &   &   &   &   & \\ \text{H} - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{H} \\   &   &   &   &   & \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \end{array}$ <p>Диетилізіпропілметан</p>
$\begin{array}{cccc} \text{H} & \text{H} & & \text{H} & \text{H} \\   &   & &   &   \\ \text{H} - \text{C} & - \text{C} & - \text{O} & - \text{C} & - \text{C} - \text{H} \\   &   & &   &   \\ \text{H} & \text{H} & & \text{H} & \text{H} \end{array}$ <p>Диетильовий ефір</p>	$\begin{array}{cccc} \text{H} & \text{O} & & \text{H} & \text{H} \\   &    & &   &   \\ \text{H} - \text{C} & - \text{C} & - \text{O} & - \text{C} & - \text{C} - \text{H} \\   & & &   &   \\ \text{H} & & & \text{H} & \text{H} \end{array}$ <p>Етилацетат</p>	$\begin{array}{cccc} & \text{H} & \text{H} & \\ &   &   & \\ \text{H} - \text{O} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{O} - \text{H} \\ &   &   & \\ & \text{H} & \text{H} & \end{array}$ <p>Етиленгліколь</p>

## Продовження таблиці 20

 <p>Ксилідин</p>	 <p>Ізоаміловий спирт</p>	 <p>Метилацетат</p>
 <p>Мурашина кислота</p>	 <p>Ноніловий спирт</p>	 <p>Октан</p>
 <p>Октаналь</p>	 <p>Октилциклогексан</p>	 <p>Октиловий спирт</p>
 <p>Октанова кислота</p>	 <p>Оцтовий ангідрид</p>	 <p>Оцтова кислота</p>
 <p>Пентан</p>	 <p>Пентанол-2</p>	 <p>Піридин</p>
 <p>Пропіленгліколь</p>	 <p>Триметилгексан</p>	 <p>Пропіонова кислота</p>
 <p>Толуол</p>	 <p>Фенілетіловий ефір</p>	 <p>Тетрагідрофуран</p>

**ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ**

**Адсорбція** – поглинання та утримання пари та газів на поверхні твердої речовини за рахунок міжмолекулярної взаємодії.

**Аерозоль** – це система з частинок твердої речовини або крапель рідини, завислих у повітрі; це колоїдна система, що складається із твердої або рідкої дисперсної фази та газового дисперсійного середовища.

**Активні центри полум'я** – *вільні радикали*, активні молекули, які мають запас хімічної енергії та утворюються на стадіях ланцюгової реакції й беруть у ній участь.

**Верхня концентраційна межа поширення полум'я (ВКМШ, ф<sub>в</sub>)** – найбільша концентрація горючої речовини в суміші з повітрям, за якої ще можливе виникнення та поширення горіння.

**Вільні радикали** – нейтральні частинки з непарним числом електронів на зовнішній електронній оболонці.

**Вибух** – фізичне або хімічне перетворення речовини, що супроводжується швидким переходом її енергії в енергію стиснення та руху продуктів перетворення, вихідної речовини або навколишнього середовища.

**Вибухова хвиля** (ударна хвиля) – це рух середовища під дією вибуху з різким підвищенням у ньому тиску, густини та температури.

**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.

**Вимушене запалювання** – це виникнення горіння внаслідок дії джерела запалювання на малу частку холодної горючої суміші.

**Виникнення горіння** – це швидкий перехід повільної окисно-відновної реакції до миттєвого перетворення вихідних речовин у продукти реакції за рахунок самоприскорення. Це перетворення носить вибуховий характер та супроводжується спалахом або звуковим ефектом.

**Вища теплота згоряння** – кількість тепла, що виділяється при повному згорянні одиниці кількості горючої речовини за умови, що горюча суміш і продукти горіння знаходяться за стандартних умов, а вода у продуктах горіння знаходиться у сконденсованому (рідкому) стані.

**Вогнегасна ефективність** – величина зворотна часу гасіння або найменшій концентрації вогнегасної речовини, за якої досягається процес припинення горіння.

**Вогнегасна концентрація** – найменша концентрація вогнегасного засобу в суміші горючої речовини з окисником, достатня для припинення горіння.

**Вогнегасні речовини** – такі речовини, які можуть безпосередньо впливати на процес горіння і створювати умови для його припинення, або попереджати процес виникнення горіння.

**Вогнеперешкоджувач** – газопроникний пристрій у вигляді щлин, сіток, касет, насадок із гранульованого або пористого матеріалу, який розбиває горючу систему на малі об'єми, що різко збільшує площу тепловіддачі та призводить до погасання полум'я всередині пристрою; це запобігає поширенню полум'я по горючій системі у технологічне обладнання та його вибуху.

**В'язкість піни** – здатність піни не розтікатися по поверхні речовини.

**BLEVE, Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion** – вибух пари, що розширюється, для скипаючої рідини.

**Газообмін** – це конвекційний рух газових потоків, що виникає під дією сил, зумовлених градієнтом тиску.

**Горіння** – складний фізико-хімічний процес, основою якого є швидка окислювально-відновна реакція, що супроводжується інтенсивним виділенням енергії у вигляді тепла та світлового випромінювання.

**Горючі рідини (ГР)** – мають температуру спалаху в закритому тиглі більше за 61 °С, тому спалахують за короткочасної дії джерела запалювання тільки за їх штучного нагріву на відміну від *легкозаймистих рідин* (ЛЗР), які утворюють пару у вибухонебезпечній концентрації за звичайних умов зберігання.

**Джерело запалювання** – це тіло, що горить, або розжарене тіло, а також електричний розряд, які мають енергію і температуру, достатні для запалювання (виникнення горіння) інших речовин.

**Дим** – це дисперсна система, що складається з твердих і рідких частинок розміром  $10^{-5} \div 10^{-8}$  м (дисперсної фази), завислих у газовому дисперсійному середовищі (повітря).

**Динамічна рівновага** – стан системи, коли кількість рідини, що випаровує, дорівнює кількості сконденсованої пари з утворенням насиченої пари.

**Дисперсність (піни, пилу)** – величина, обернена до середнього діаметра пухирців *піни* або частинок *аерозолю*.

**Енергія активації** – це мінімальна енергія, необхідна для ініціювання елементарного акту хімічної реакції.

**Загальна витрата** – кількість вогнегасної речовини, що було витрачено під час гасіння пожежі на одиницю розрахункового параметра пожежі.

**Загальна кількість вогнегасної речовини** – кількість, 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.

**Закон Гесса:** тепловий ефект хімічної реакції, яка протікає за постійного тиску або постійного об'єму, не залежить від кількості проміжних стадій, а визначається лише вихідним та кінцевим енергетичним станом системи.

**Засіб пожежогасіння** – речовини або пристрої, які використовуються для припинення горіння на пожежі.

**Зона горіння** – 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** – частина простору, що прилягає до зони горіння. У цій зоні відбувається теплообмін між межею зони горіння з навколишніми конструкціями та речовинами. Зовнішня межа цієї зони пролягає там, де тепловий вплив викликає зміни у стані матеріалів і конструкцій, або створюються умови, які перешкоджають роботі особового складу під час гасіння пожежі (критична температура знаходження людини у приміщенні під час пожежі – 70 °С, густина теплового потоку – 1 кВт/м<sup>2</sup>).

**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.

**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).

**Йодне число ( $J_4$ )** – число грамів йоду, що приєднається за умов досліджень (або у розрахунках) по місцю ненасичених зв'язків до 100 грамів олії.

**Коефіцієнт надлишку повітря ( $\alpha$ )** – показує, у скільки разів кількість повітря, що дійсно надходить до зони горіння, відрізняється від теоретично необхідної для повного згорання горючої речовини.

**Кратність піни** – відношення об'єму піни до об'єму рідини, з якої її отримано.

**Критичний час розвитку пожежі** – максимальний час перебування людей у приміщенні під час пожежі; визначається часом досягнення критичної температури 70 °С або часом зниження вмісту кисню у повітрі до критичного значення – 16 %.

**Ланцюгові процеси горіння** – перетворення вихідних речовин у продукти горіння шляхом чергування декількох реакцій за участю вільних радикалів, що йдуть зі збереженням вільної валентності.

**Легкозаймисті рідини (ЛЗР)** – рідини з температурою спалаху в закритому тиглі нижче за 61 °С, тому вони утворюють вибухонебезпечну пару за звичайних умов зберігання (без штучного нагріву); рідини з температурою спалаху нижче за 28 °С відносять до особливо небезпечних рідин.

**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.

**Матеріальний баланс реакції горіння** – рівність мас речовин, що вступають у реакцію горіння та утворюються у ході цієї реакції.

**Мікробіологічне самозаймання** – процес виникнення горіння внаслідок самонагрівання продуктів рослинного походження під впливом тепловиділення під час життєдіяльності рослинних клітин та мікроорганізмів.

**Мінімальна вибухонебезпечна концентрація кисню**  $\varphi_{\text{мвкк}}$  – такий малий вміст кисню у горючій системі, за якого виникнення горіння стає неможливим.

**Мінімальна енергія запалювання  $E_{\text{min}}$**  газу, пари або аерозолу даної речовини в повітрі – найменша енергія конденсатора, при розряді якого через *повітряний* проміжок виникає іскра, що запалює стехіометричну суміш даної речовини з повітрям із імовірністю 0,01.

**Надлишок повітря** – різниця між кількістю повітря, що дійсно витрачається на горіння, та теоретично необхідною кількістю повітря.

**Насичена пара** – утворюється під час випаровування у закритій системі з утворенням динамічної рівноваги між кількістю рідини, що випаровує та кількістю сконденсованої пари, тому концентрація такої пари в часі незмінна.

**Нейтральною зоною** називають уявну площину у приміщенні, рівнобіжну підлозі, у точках якої тиск продуктів горіння дорівнює тиску зовнішнього повітря.

**Небезпечні фактори пожежі** – первинні та другорядні явища пожежі, що спричиняють травмування, отруєння або загибель людей, а також знищення або пошкодження матеріальних цінностей.

**Ненасичена пара** – стан пари на відкритому просторі, коли *динамічна рівновага* між випаровуванням та конденсацією не встановлюється, частина пари втрачається у навколишній простір; випаровування триває, доки вся рідина не випарується.

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

**Нижча теплота згорання** речовини – кількість тепла, що виділяється

при повному згорянні одиниці кількості горючої речовини за умови, що горюча суміш і продукти горіння знаходяться за стандартних умов, а вода, яка міститься у продуктах горіння, знаходиться у газоподібному стані.

**Особливо небезпечні рідини** – з температурою спалаху 28 °С і нижче.

**Окремі явища** (другорядні) на пожежі – ті, які виникають внаслідок дії загальних явищ та спостерігаються не на кожній пожежі: руйнування, вибухи, травмування або загибель людей чи тварин, введення вогнегасних речовин, хімічне або радіоактивне забруднення та інші можливі явища.

**Період індукції** – час від початку перевищення температури горючої системи над температурою навколишнього середовища до моменту виникнення горіння.

**Період вільного розвитку** пожежі 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.

**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.

**Полум'я** – це газовий об'єм, в якому відбуваються всі процеси, що пов'язані з підготовкою горючої суміші до горіння, і сам процес горіння.

**Продукти горіння** – це газоподібні, тверді та рідкі речовини, що утворюються при взаємодії окисника з горючою речовиною у процесі горіння.

**Самозаймання** – виникнення горіння внаслідок самонагрівання за умов для накопичення тепла всередині самої системи від внутрішніх екзотермічних процесів і відсутності джерела запалювання.

**Самонагрівання** – підвищення температури системи внаслідок переви-



щення швидкості тепловиділення екзотермічних процесів над швидкістю тепловіддачі від системи в навколишнє середовище.

**Самоспалахування** – це процес виникнення горіння внаслідок різкого підвищення швидкості екзотермічних реакцій окиснення, що виникають під дією зовнішнього нагрівання всієї горючої системи до критичної температури.

**Спінювання** – перехід у пару значної кількості дрібних краплин води, що знаходяться у вигляді емульсії у нафтопродукті, з утворенням піни, що горить, яка може переливатися через борт резервуара, поширюючи горіння.

**Спосіб пожежогасіння** – тактичний прийом, що використовується для припинення горіння.

**Стандартна температура самоспалахування** – найменша температура, визначена стандартним методом, до якої повинна бути нагріта горюча суміш пари з повітрям, що найлегше займається, щоб виникло горіння без внесення стороннього джерела запалювання.

**Стандартна теплота утворення речовини  $\Delta H^{\circ}_f$**  – теплота реакції, в якій за стандартних умов ( $P = 101,3$  кПа,  $T = 298$  К) утворюється один моль речовини із простих речовин, стійких за стандартних умов.

**Стехіометрична концентрація** – концентрація горючої речовини, що відповідає рівнянню реакції горіння.

**Стійкість піни** – здатність піни зберігати свої первинні властивості; характеризується часом напіврозпаду піни, протягом якого з піни виділиться половина маси рідини.

**Температура горіння** – температура, до якої нагріваються продукти горіння під час їх утворення в зоні горіння.

**Температура займання** – найменша температура рідини, за якої після короткочасної дії джерела запалювання встановлюється стійке горіння. За цієї температури інтенсивність випаровування рідини стає рівною інтенсивності вигоряння пароповітряної суміші.

**Температура запалювання** – критична температура нагрітого тіла, за якої досягається рівновага між тепловиділенням окиснення горючої речовини у пристінному шарі горючої суміші і тепловіддачею у навколишню холодну суміш.

**Температура самонагрівання** – найменша температура горючої системи, за якої виникає самонагрівання речовини.

**Температура самоспалахування** – найменша температура повітряної горючої системи, за відбувається її самоспалахування.

**Температура погасання** – температура системи, нижче якої продовження горіння стає неможливим.

**Температура пожежі в огороженні** – середньооб'ємна температура газового середовища у приміщенні, в якому відбувається пожежа.

**Температура пожежі на відкритому просторі** – температура зони горіння; приймають як адиабатичну 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 КМПП.

**Теплове самозаймання** – процес *виникнення горіння* шляхом самонагрівання в результаті тривалого впливу температур, вищих за температуру самонагрівання.

**Тепловий ефект реакції** – кількість тепла, що виділяється чи поглинається системою під час протікання в ній незворотної хімічної реакції за умов сталої температури та об'єму або температури та тиску.

**Теплота згоряння** – кількість тепла, що виділяється при повному згорянні одиниці кількості горючої речовини з утворенням продуктів повного згорання, якщо початкові та кінцеві продукти знаходяться за стандартних умов.

**Теплота пожежі** – кількість тепла, що під час пожежі виділяється в зоні горіння за одиницю часу.

**Токсичність продуктів горіння** – їх здатність викликати отруєння людей, які знаходяться без засобів індивідуального захисту органів дихання.

**Тривалість пожежі** – час із моменту виникнення пожежі до повного припинення горіння.

**Фізичне самозаймання** – *виникнення горіння* внаслідок самонагрівання матеріалу під час тепловиділення фізичних процесів (адсорбція, тертя тощо).

**Флегматизація** – запобігання утворенню горючого газового середовища та виникненню горіння за допомогою газів-розріджувачів або інгібіторів.

**Флегматизуюча концентрація**  $\varphi_{\text{фл}}$  – найменша концентрація негорючого газу в газовій суміші горючої речовини й окисника, за якої суміш стає нездатною до горіння за будь-якого вмісту горючої речовини та окисника.

**Фрикційні іскри** – шматочки металу, відірвані, нагріті та частково окиснені за умов механічного удару.

**Фронт пожежі** – частка периметра, на якій поширення пожежі відбувається найбільш інтенсивно.

**Хімічне самозаймання** – *виникнення горіння* внаслідок самонагрівання системи під час взаємодії речовин, які реагують із виділенням тепла.

**Час гасіння** – час від початку подавання вогнегасної речовини до припинення горіння.

**Швидкість хімічної реакції** – число елементарних актів взаємодії речовин за одиницю часу в одиниці об'єму (у гомогенних реакціях) або на одиницю площі поверхні розподілу фаз (у гетерогенних реакціях).

**ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЗЧИК****В**

вибух

- надлишковий тиск, 273, 274, 285

- радіус зони ураження, 274

- тротиловий еквівалент, 273

викид, 283, 411

випаровування

- інтенсивність, 187, 272, 283

- теплота, 188, 202

вогненна сфера, 274, 275, 306

вогнегасна речовина, 338

- ефективність, 339

**Г**

газобмін, 250–253, 412

гомותרмічний шар, 281

горіння, 7, сл., 17

- виникнення, 80, сл.

- енергетичний баланс, 46

- матеріальний баланс, 21

- рівняння реакції, 17, 19

**Д**

динамічна рівновага, 185, 412

дим, 21, 412

джерело запалювання, 129, 412

**Е**

енергія внутрішня, 46, 70

енергія запалювання, 129, 130, сл., 414.

ентальпія, 46

**З**

запалювання вимушене, 81, 129, 411

зона загазованості 271

- для резервуарів, 271

- на відкритому просторі, 272

- у приміщенні, 284

**І**

інтенсивність випаровування

- на відкритому просторі, 272

- у приміщенні, 283

іскра

- електрична, 135

- короткого замкнення, 135

- фрикційна, 134, 135, 417

**Й**

йодне число, 104, 105, 108, 413

**К**

коефіцієнт

- стехіометричний, 17

- надлишку повітря, 23, 68, 73, 252, 413

- поверхні горіння, 241

концентраційні межі поширення полум'я

- аерозолі, 175

- безпечні, 155, 177

- паро-, газоповітряної суміші, 154

- суміші газів, 165

концентрація

- безпечна кисню, 345

- вогнегасна, 346

- мінімальна вибухонебезпечна кисню, 344

- насиченої пари, 186, 187

- стехіометрична, 18, 416

- флегматизуюча, 168, 343

**Н**

навантага пожежна, 56, 239, 415

надлишок повітря, 23, 73, 414

нейтральна зона, 252, 253, 414

**О**

об'єм повітря для горіння, 22, 24, 29, 32

об'єм продуктів горіння, 22, 24, 29, 32

**П**

пара

- насичена, 185

- ненасичена, 185

- тиск, 187

піна вогнегасна 376, 415

- ізолююча здатність, 378, 413

- дисперсність, 377

- кратність, 377

- стійкість, 378

- ізолююча здатність, 378

піноутворювач, 376

період індукції, 81, 103, 117

поверхнево-активні речовини, 379

пожежа, 236

- зона

- - горіння, 236

- - задимлення, 237

- - теплового впливу, 237

- небезпечні фактори, 236

- параметри 239
  - інтенсивність
    - - газообміну, 240, 249, 413
    - - задимлення, 240, 413
  - лінійна швидкість вигорання, 280
  - лінійна швидкість поширення, 241
  - масова швидкість вигорання, 239, 280
  - площа, 239, 243
  - пожежна навантага, 56. 239, 415
  - температура, 240
  - теплота, 240
  - тривалість, 239
  - фронт, 239, 243
  - періоди розвитку, 237
  - радіус розвитку, 241
  - явища:
    - - загальні, 236
    - - окремі, 236
  - пожежогасіння
    - засоби, 338
    - параметри, 339
      - - загальна витрата 339
      - - загальна кількість 339
      - - інтенсивність подавання 340
        - - - критична, 340
        - - - нормативна, 340
        - - - оптимальна, 340
        - - - теоретична, 340
      - - коефіцієнт використання 341
      - - питома витрата 340
      - - час гасіння, 339
    - прийоми, 338
    - способи, 337
  - полум'я, 14, 415
  - продукти горіння, 21, 415
- Р**
- радикал вільний, 80, 411, 413
  - реакція
    - автокаталітична, 80
    - горіння, 17, 19
    - ланцюгова, 80, 413
    - тепловий ефект, 46–51, 417
  - речовини пірофорні, 102
  - рівняння
    - Антуана, 188, 195
    - Білінова, 216, 220
    - Еллея, 214
    - Клапейрона-Клаузіуса, 188
    - Шоневальда, 176
    - Ле-Шательє, 165
  - рідини
    - горючі, 188, 412
    - легкозаймисті, 188, 414
    - особливо небезпечні, 188, 415
  - розльот іскор, 243
- С**
- самозаймання, 81, 102, 415
    - мікробіологічне, 102, 414
    - теплове, 102, 117, 390, 417
    - хімічне, 102, 103, 417
      - - при контакті з водою, 105
      - - при контакті з киснем, 104, 107
      - - при контакті з окисниками, 106, 111
    - фізичне, 102, 417
  - самонагрівання, 102, 117, 415
  - самоспалахування, 81, 82, 416
  - спінювання, 280, 416
- Т**
- температура
    - безпечна, 84, 119, 214
    - вибуху, 70, 73
    - горіння, 57, 416
    - займання, 187, 214, 416
    - запалювання, 134, 416
    - погасання, 336, 366, 416
    - пожежі в огороженні, 240, 249, 258, 264
    - самонагрівання, 117, 416
    - самоспалахування, 82, 84, 416
      - - розрахунок, 90, 95, 97
    - спалаху, 186, 187, 214, 222, 417
  - температурні межі поширення полум'я, 185
    - безпечні, 186, 197
    - суміші рідин, 202
  - теплота згорання, 47, 49, 51, 417
  - теплота утворення, 48, 50
  - тиск вибуху, 70, 73
- Ф**
- флегматизація, 342, 417

1. Glassman I., Yetter R. A. Combustion. London: Elsevier, 2014. 757 p.
2. Griffiths J.F., Barnard J.A. Flame and Combustion. Glasgow: Blackie Academic and Professional, 1995. 309 p.
3. Тарахно О. В., Трегубов Д. Г., Жернокльов К. В., Коврегін В. В. Основні положення процесу горіння. Виникнення процесу горіння. Навчальний посібник. Х: НУЦЗУ, 2020. 408 с.
4. Keszei E. Chemical Thermodynamics. Berlin: Springer, 2012. 354 p.
5. Тарахно О. В., Жернокльов К. В., Баланюк В. М. Лабораторний практикум: «Теорія розвитку та припинення горіння». Харків: АЦЗУ, 2004. 193 с.
6. Lewis B. Combustion, flames and explosions of gases. United States: Academic Press, 2012. 764 p.
7. Davletshina T.A., Cheremisinoff N.P. Fire and Explosion Hazards Handbook of Industrial Chemicals. Westwood: Elsevier, William Andrew Publ., 1998. 485 p.
8. Hattwig M., Steen H. Handbook of Explosion Prevention and Protection. Hoboken: Wiley, 2008. 718 p.
9. Quickly find chemical information from authoritative sources. Pubchem. U.S. National Library of Medicine. URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>.
10. Nolan D. P. Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical, and Related Facilities. Milwaukee: Elsevier, Gulf Professional Publishing, 2019. 502 p.
11. Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. Харків: АПБУ, 2002. 352 с.
12. Дадашов І.Ф., Кіреєв О.О., Трегубов Д.Г., Тарахно О.В. Гасіння горючих рідин твердими пористими матеріалами та гелеутворюючими системами. Харків: НУЦЗУ, 2021. 218 с.
13. Eckhoff R. K. Dust Explosions in the Process Industries. Amsterdam: Elsevier, Gulf Professional Publishing, 2003. 720 p.
14. Barton K. Dust Explosion Prevention and Protection: A Practical Guide. United Kingdom: Elsevier, Gulf Professional Publishing, 2002. 300 p.
15. Quintiere J. G. Fundamentals of Fire Phenomena. Hoboken: Wiley, 2006. 464 p.
16. Ключ П.П., Палюх В.Г., Пустовой А.С., Сенчихін Ю.М., Сировой В.В. Пожежна тактика: Підручник. Харків: Основа, 1998. 592 с.
17. Сенчихін Ю.М. та ін. Довідник керівника гасіння пожежі. Київ: Літера-Друк, 2016. 320 с.
18. Drysdale D. An Introduction to Fire Dynamics. New York: John Wiley and Sons, 2011. 576 p.
19. Gorbett G. E., Pharr J. L., Rockwell S. Fire Dynamics. Richmond: Pearson, 2017, 336 p.

20. Шаршанов А.Я., Рябова І.Б. Термодинаміка і теплопередача у цивільній безпеці: Навчальний посібник. Харків: НУЦЗ України, 2013. 380 с.
21. Yung D. Principles of Fire Risk Assessment in Buildings. Hoboken: Wiley, 2008. 248 p.
22. Тарахно О.В., Трегубов Д.Г., Жернокльов К.В., Шепелева А.І., Коврегін В.В. Теорія розвитку та припинення горіння. Практикум. Частина II: Харків: НУЦЗ України, 2010. 452 с.
23. Bahadori A. Hazardous Area Classification in Petroleum and Chemical Plants. Boca Raton: CRC Press, 2013. 564 p.
24. Zalosh R. G. Industrial Fire Protection Engineering. Hoboken: Wiley, 2003. 400 p.
25. Rasbash D., Ramachandran G., Kandola B., Watts J., Law M. Evaluation of Fire Safety. Hoboken: Wiley, 2004. 496 p.
26. Frank-Kamenetskii D. A. Diffusion and Heat Exchange in Chemical Kinetics. Princeton: Princeton University Press, 2015. 384 p.
27. Тарахно О.В., Трегубов Д.Г., Жернокльов К.В., Шепелева А.І., Коврегін В.В. Теорія розвитку та припинення горіння. Практикум. Частина I: Харків: НУЦЗ України, 2010. 309 с.
28. Антонов А.В., Боровиков В.В., Орел В.В., Жарговський В.М., Ковалишин В.В. Вогнегасні речовини. Київ: Пожінформтехніка, 2004. 176 с.
29. НАПБ Б.03.002–2007. Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. К.: УкрНДПБ, 2007. 40 с.
30. ДСТУ 8829:2019. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення [Чинний від 01.01.2020]. Київ: ДП «УкрНДНЦ» 2020. 75 с.
31. ДСТУ 8828:2019. Пожежна безпека. Загальні положення. К.: ДП «УкрНДНЦ», 2020. 87 с.
32. ПУЕ-2017. Правила улаштування електроустановок. К.: Міненерговугілля України, 2017. 617 с.
33. Carson Ph., Mumford C. Hazardous Chemicals. Handbook. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. 620 p.
34. Baker W. E., Cox P. A., Kulesz J. J., Strehlow R. A., Westine P. S. Explosion Hazards and Evaluation. Amsterdam: Elsevier, 2012. 807 p.
34. ДСТУ 2272-2006. Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять. Наказ № 162 від 29.06.2006 р. Київ: Держст. 2006. 32 с.
35. Трегубов Д.Г., Дадашов І.Ф., Мінська Н.В., Гапон Ю.К., Чиркіна-Харламова М.А.. Фізико-хімічні основи розвитку та гасіння пожеж горючих рідин. Х.: НУЦЗ України, 2024. 216 с..

*Навчальне видання*

**Трегубов** Дмитро Георгійович,  
**Тарахно** Олена Вігалиївна  
**Гапон** Юліана Костянтинівна  
**Мінська** Наталя Вікторівна

**ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ,  
ВИБУХУ ТА ПОЖЕЖОГАСІННЯ**  
*Практикум*

Підписано до друку 22.05.24 . Формат 60x84 1/16.  
Ум.друк. арк. 24,5  
Вид. № 08/24

Сектор редакційно-видавничої діяльності  
Національного університету цивільного захисту України  
61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94  
[www.nuczu.edu.ua](http://www.nuczu.edu.ua)