

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ
КАФЕДРА СПЕЦІАЛЬНОЇ ХІМІЇ ТА ХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

**ТАРАХНО О.В.,
ЖЕРНОКЛЬОВ К.В., ТРЕГУБОВ Д.Г.**

ТЕОРІЯ РОЗВИТКУ ТА ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИВЧЕННЯ КУРСУ
КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ**

**Для курсантів, слухачів
денної та заочної форм навчання**

ХАРКІВ 2013

Тарахно О.В., Жернокльов К.В., Трегубов Д.Г. Теорія розвитку та припинення горіння. Методичні вказівки до вивчення курсу, контрольні завдання для курсантів, слухачів денної та заочної форм навчання – Харків: Університет цивільного захисту України, 2011 – 207 с.

Навчальне видання

Рецензенти: Курко К.В. доцент кафедри хімії, к.т.н., доцент, ХНПУ ім. Г.С. Сковороди

Луценко Ю.В. заступник начальника кафедри пожежної профілактики в населених пунктах, к.т.н., доцент, НУЦЗУ

Редактор Т.О.Шевченко

Дане навчальне видання містить методичні матеріали по вивченню навчальних курсів “Теорія розвитку та припинення горіння”, “Теорія горіння та вибуху”, питання для самоперевірки, перелік орієнтовних питань для підготовки до іспиту, методики розрахунку параметрів пожежної небезпеки речовин і матеріалів, параметрів розвитку пожежі та її гасіння.

Навчальне видання призначене для курсантів і слухачів, що навчаються по напрямках “Пожежна безпека”, “Хімічні технології”, “Цивільний захист” й “Охорона Праці”.

© Тарахно О.В., Жернокльов К.В.,
Трегубов Д.Г.

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ	5
ОРГАНІЗАЦІЙНО - МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ	9
ЗМІСТ ДИСЦИПЛІНИ	10
Розділ 1. ОСНОВИ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ	10
Тема 1. Загальні відомості про природу процесів горіння	10
Тема 2. Матеріальний і тепловий баланс процесу горіння	11
Розділ 2. ВИНИКНЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ	12
Тема 3. Горючі системи. Концентраційні межі поширення полум'я	12
Тема 4. Самоспалахування горючих систем	12
Тема 5. Самозаймання речовин і матеріалів	13
Тема 6. Вимушене займання горючих систем	14
Розділ 3. ПОШИРЕННЯ ГОРІННЯ	15
Тема 7. Горіння газо-пароповітряних сумішей	15
Тема 8. Горіння рідин	15
Тема 9. Горіння твердих речовин	17
Тема 10. Горіння пилоповітряних сумішей	18
Тема 11. Оцінка горючості речовин і матеріалів	19
Розділ 4. ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖ	19
Тема 12. Пожежа та її розвиток. Параметри розвитку відкритих пожеж	19
Тема 13. Тепломасообмін пожежі у приміщенні	21
Розділ 5. ЗАПОБІГАННЯ ТА ПРИПИНЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ	21
Тема 14. Теплова теорія припинення горіння	21
Тема 15. Способи та засоби припинення процесів горіння	22
ОРІЄНТОВНІ ПИТАННЯ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ДО ІСПИТУ	25
МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНИХ РОЗРАХУНКОВИХ ЗАВДАНЬ	31
Індивідуальне розрахункове завдання №1	31
РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ.	32
1.1 ВИЗНАЧЕННЯ КОЛЬОРУ ДИФУЗІЙНОГО ПОЛУМ'Я	32
Приклад розв'язання задачі	34
1.2 СКЛАДАННЯ РІВНЯННЯ РЕАКЦІЇ ГОРІННЯ	36
Методика складання рівнянь реакції горіння	36
Приклад розв'язання задачі	38
1.3 МАТЕРІАЛЬНИЙ БАЛАНС ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ	41
1.3.1. Визначення стехіометричної концентрації	

горючої речовини. Приклад розв'язання задачі	41
1.3.2. Розрахунок матеріального балансу процесу горіння	43
Методика розрахунку матеріального балансу процесу горіння речовини індивідуального хімічного складу	50
Приклад розв'язання задачі	52
1.4 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ	57
1.4.1 Розрахунок теплоти згоряння горючих речовин	57
Приклад розв'язання задачі	59
1.4.2 Розрахунок температури горіння індивідуальної речовини	62
Методика визначення адіабатичної температури горіння з використанням ентальпії продуктів горіння	64
Приклад розв'язання задачі	65
1.4.3 Розрахунок максимального тиску вибуху	67
Методика визначення температури та максимального тиску вибуху. Приклад розв'язання задачі	68
РОЗДІЛ 2. ВИНИКНЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ	72
2.1 РОЗРАХУНОК КОНЦЕНТРАЦІЙНИХ МЕЖ ПОШИРЕННЯ ПОЛУМ'Я	73
Розрахункові методи визначення КМПП.	76
Приклади розв'язання задач	79
2.2. ВИНИКНЕННЯ ГОРІННЯ ШЛЯХОМ САМОЗАЙМАННЯ	85
2.3. РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРИ САМОСПАЛАХУВАННЯ	87
2.4. РОЗРАХУНОК МОЖЛИВОСТІ ВИМУШЕНОГО ЗАПАЛЮВАННЯ	93
РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ РЕЧОВИН ТА МАТЕРІАЛІВ	
103	
3.1. РОЗРАХУНОК ТИСКУ НАСИЧЕНОЇ ПАРИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ СТУПЕНЯ НЕБЕЗПЕКИ РІДИНИ ЗА ВИЗНАЧЕНИХ УМОВ	
103	
Розрахункові методи визначення тиску насиченої пари	104
Приклади розв'язання задач	105
3.2. РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРНИХ МЕЖ ПОШИРЕННЯ ПОЛУМ'Я	108
Розрахункові методи визначення ТМПП	110
Приклади розв'язання задач	112

3.3 РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРИ СПАЛАХУ	118
Розрахункові методи визначення температури спалаху	118
Приклади розв'язання задач	120
РОЗДІЛ 4. ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖИ	
4.1. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ РОЗВИТКУ	
ПОЖЕЖІ КЛАСІВ “В” ТА “С” НА ВІДКРИТОМУ ПРОСТОРИ	126
4.1.1. Вибух пароповітряної хмари	126
Індивідуальне розрахункове завдання №2	132
Методика розрахунку параметрів горіння пароповітряної хмари на відкритому просторі	133
Приклад розв'язання задачі	134
4.1.2. Розрахунок критичної відстані від факела газового фонтана, пожежа класу С	137
Індивідуальне розрахункове завдання №3	141
Методика розрахунку безпечних відстаней від фонтану, що горить. Приклад розв'язання задачі	143
4.2. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖІ В ОГОРОДЖЕННІ	147
Індивідуальне розрахункове завдання №4	148
4.2.1. РОЗРАХУНОК КРИТИЧНОГО ЧАСУ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖІ ЗА ТЕМПЕРАТУРОЮ ТА ВМІСТОМ КИСНЮ	152
Методика розрахунку критичного часу розвитку пожежі	154
4.2.2. РОЗРАХУНОК ПЛОЩІ, ПЕРИМЕТРУ ТА ФРОНТУ ПОЖЕЖІ КЛАСУ А	157
Методика розрахунку площі, периметру та фронту пожежі	158
Приклад розв'язання задачі	159
4.2.3. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПОЖЕЖІ ТА ВИСОТИ НЕЙТРАЛЬНОЇ ЗОНИ НА ЗАДАНИЙ ЧАС РОЗВИТКУ ПОЖЕЖІ	161
Методика розрахунку температури пожежі та висоти нейтральної зони. Приклад розв'язання задачі	166
РОЗДІЛ 5. ЗАПОБІГАННЯ ТА ПРИПИНЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ	177
5.1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПОЖЕЖОГАСІННЯ	177
5.2. ЗАПОБІГАННЯ ТА ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ НЕГОРЮЧИМИ ГАЗАМИ	181
Індивідуальне розрахункове завдання №5	184
Методика визначення основних параметрів гасіння пожежі за допомогою негорючих газів. Приклад розв'язання задачі	185

ЛІТЕРАТУРА
ДОДАТКИ

194
197

ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

Горіння – основний процес на пожежі. Знання основних закономірностей виникнення, розвитку та припинення процесів горіння дозволяє фахівцям у галузі цивільного захисту ефективно вирішувати задачі попередження та ліквідації надзвичайних ситуацій.

Основою навчальної дисципліни “Теорія розвитку та припинення горіння” є вивчення основних положень теорії виникнення та розвитку процесів горіння, умов, за яких горіння може призвести до вибуху, 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 дисциплін як “Фізика”, “Хімія”, “Термодинаміка та теплопередача”. Як дисципліна професійного напрямку “Теорія розвитку та припинення горіння” узагальнює та використовує теоретичні дослідження в галузі пожежовибухонебезпеки, практичний досвід працівників системи МНС.

Як наукова дисципліна “Теорія розвитку та припинення горіння” є теоретичною основою для вивчення таких дисциплін як “Пожежна тактика”, “Пожежна профілактика в населених пунктах”, “Пожежна профілактика технологічних процесів”, “Пожежна техніка”, “Пожежна і виробнича автоматика”.

Мета дисципліни полягає в тому, щоб закласти фундамент наукових уявлень про процес горіння, умови, які можуть призвести до виникнення та припинення горіння, пожежовибухонебезпечні властивості різних речовин та матеріалів, фізико-хімічні основи розвитку пожеж, механізм дії основних вогнегасних засобів. Знання цих теоретичних положень дозволить не тільки глибоко усвідомити взаємозв’язок показників пожежної небезпеки речовин з параметрами горіння, але і навчитися керувати процесом горіння, забезпечувати безпечні умови використання тих чи

інших матеріалів, визначати умови, за яких можливе виникнення пожежі, основні параметри, що характеризують розвиток пожеж різних класів, а також основні параметри процесу пожежогасіння.

Задачами дисципліни є:

- ознайомлення з поняттями пожежовибухонебезпеки речовин і матеріалів і показниками, що визначають їх пожежну небезпеку;
- оволодіння методиками розрахункового і експериментального визначення основних показників вибухової і пожежної небезпеки речовин і матеріалів;
- вивчення механізмів виникнення та протікання процесів горіння газоподібних, рідких, твердих та вибухових речовин та матеріалів у дисперсному стані з метою запобігання виникнення пожеж чи зниження інтенсивності горіння на пожежі;
- ознайомлення з закономірностями впливу зовнішніх умов на стан пожежної небезпеки горючих систем і зміною параметрів, що характеризують виникнення та розвиток горіння;
- ознайомлення з загальними закономірностями динаміки пожежі;
- ознайомлення з особливостями розвитку пожеж в огороженні та на відкритому просторі;
- оволодіння методиками розрахунку основних параметрів розвитку пожеж різних класів;
- ознайомлення з механізмом припинення горіння і засобами запобігання виникненню горіння за допомогою вогнегасних речовин різних класів;
- оволодіння методиками розрахункового визначення основних параметрів пожежогасіння за допомогою вогнегасних речовин різних класів;
- оволодіння основами аналізу щодо виникнення та розвитку надзвичайних ситуацій під час зберігання та експлуатації горючих речовин і матеріалів.

В результаті вивчення дисципліни слухачі повинні *знати:*

- види горіння, основні параметри, що характеризують процес горіння;
- будову полум'я та процеси, що відбуваються в зонах полум'я;
- умови, що необхідні для виникнення горіння, та види виникнення горіння: самоспалахування, самозаймання, вимушене займання;
- основи теплової теорії поширення кінетичного горіння;
- умови переходу дефлаграційного горіння в детонацію;
- умови виникнення вибуху, поняття вибухонебезпеки речовин, фактори, що впливають на вибухонебезпеку горючих систем;
- основні показники пожежної небезпеки речовин і матеріалів у різних агрегатних станах;
- методики розрахункового й експериментального визначення основних параметрів пожежної небезпеки речовин і матеріалів;
- механізм виникнення і поширення горіння по поверхні рідин та твердих речовин, загальні закономірності вигорання конденсованих горючих речовин;
- особливості горіння матеріалів у дисперсному стані, фактори, що впливають на вибухонебезпеку аерозолі;
- загальні поняття пожежі, параметри, що характеризують розвиток пожежі, класифікація пожеж;
- методики розрахунку основних параметрів пожеж різних класів;
- основні методи припинення горіння на пожежі і запобігання виникненню горіння в технологічних процесах виробництва;
- класифікацію й основні вимоги до вогнегасних засобів, основні параметри пожежогасіння, їх взаємозв'язок;
- механізм припинення горіння способами охолодження, ізоляції, розбавлення та інгібування, комбіновані засоби пожежогасіння.

Вміти:

- проводити розрахунок параметрів горіння: матеріальний та тепловий баланс процесу горіння, температури горіння та

тиску вибуху;

- проводити розрахунок умов виникнення горіння горючих систем: безпечної температури нагріву поверхні технологічного обладнання, температуру самонагрівання та періоду індукції при тепловому самозайманні, спроможності до підпалення електричних та фрикційних іскор;
- розраховувати параметри, що характеризують пожежовибухонебезпеку горючих речовин: йодне число олій та масел, концентраційні межі поширення полум'я (КМПП), температурні межі поширення полум'я, тиск насиченої пари, температуру спалаху, нижню КМПП аерозолі;
- дослідним шляхом визначати параметри, що характеризують пожежовибухонебезпеку речовин та матеріалів;
- визначати ступінь пожежної небезпеки речовин та матеріалів за заданих умов та безпечні параметри їх зберігання та переробки;
- розраховувати основні параметри розвитку пожеж в огороженні та на відкритому просторі: площу, периметр, фронт, критичний час розвитку пожежі, температурний режим пожежі, висоту нейтральної зони, відстань розльоту іскор, безпечну відстань від газових фонтанів та резервуарів, що горять, час до можливого викиду при пожежі резервуарів, параметри вибуху паро-, газоповітряної хмари;
- проводити вибір вогнегасних речовин, що найбільш ефективно припинять горіння, та оптимальні методи подачі вогнегасних речовин залежно від умов протікання процесу горіння;
- проводити аналіз умов виникнення та розвитку надзвичайних ситуацій під час зберігання та експлуатації горючих речовин і матеріалів.

Мати практичні навички з проведення лабораторних досліджень із визначення основних параметрів пожежної небезпеки речовин та матеріалів, впливу різних факторів на ці параметри.

ОРГАНІЗАЦІЙНО - МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

Основними формами проведення занять з дисципліни "Теорія розвитку та припинення горіння" є лекції, лабораторні роботи, практичні і семінарські заняття, самостійна робота слухачів. Для систематизації та узагальнення отриманих знань передбачається виконання контрольних робіт.

Перша розрахункова робота проводиться за темами 2, 3, 7, 8 – “Розрахунок параметрів процесу горіння та показників, що характеризують пожежовибухонебезпеку горючої рідини за заданих умов”. Друга розрахункова робота проводиться за темами 12, 13, 15 – “Розрахунок параметрів вибуху пари, що утворюється при випаровуванні рідини у повітря за заданих умов, розрахунок безпечних відстаней від газового фонтану, що горить, розрахунок температурного режиму при пожежі в огороженні та основних параметрів пожежогасіння в приміщенні за допомогою негорючих газів”.

Розрахункові роботи виконуються слухачами під час самостійного вивчення навчального матеріалу і мають за мету поглибити навички проведення розрахунків основних показників, що характеризують пожежовибухонебезпеку речовин та матеріалів, параметрів розвитку пожежі в огороженні та на відкритому просторі, основних параметрів пожежогасіння.

При вивченні дисципліни за найбільш важливими темами проводяться лабораторні роботи, на яких відпрацьовуються питання, пов'язані із визначенням параметрів пожежовибухонебезпеки речовин, основними закономірностями розвитку пожежі в огороженні та дослідженням взаємодії вогнегасних речовин із горючими матеріалами. Вивчення дисципліни завершується складанням іспиту.

ЗМІСТ ДИСЦИПЛІНИ

РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ

Тема 1. Загальні відомості про природу процесів горіння

Горіння як основний процес на пожежі. Значення законів виникнення, розвитку і припинення горіння у справі забезпечення пожежовибухонебезпеки об'єктів промисловості і сільськогосподарського виробництва. Місце дисципліни в системі підготовки фахівців пожежної справи, зміст і структура курсу. Класифікація процесів горіння: кінетичне і дифузійне, гомогенне і гетерогенне, ламінарне і турбулентне, дефлаграційне і детонаційне горіння, особливості кожного виду горіння. Складання стехіометричних рівнянь процесу горіння речовин в повітрі.

Будова полум'я, процеси, що відбуваються в різних зонах полум'я. Температурний режим полум'я. Основні теорії, що пояснюють протікання процесу горіння. Перекісна теорія окислення і теорія ланцюгових реакцій. Розгалужені та нерозгалужені ланцюгові реакції, активні центри полум'я.

Питання для самоперевірки:

1. Сутність процесу горіння як окислювально-відновного процесу. Повітря та його склад. Методика складання рівнянь реакції горіння речовин з повітрям.
2. Умови виникнення та гальмування процесу горіння. Класифікація процесів горіння: гомогенне та гетерогенне, дифузійне та кінетичне, дефлаграційне та детонаційне, ламінарне та турбулентне.
3. Полум'я, структура і колір полум'я. Температурний режим полум'я. Процеси, що відбуваються в різних зонах полум'я.
4. Зони полум'я, процеси, що відбуваються в різних зонах. Перекісна теорія Баха. Види перекісів, їх небезпека.
5. Процеси, що відбуваються в зоні горіння з точки зору теорії ланцюгових реакцій Семенова. Розгалужені та нерозгалужені ланцюгові реакції, швидкість протікання ланцюгової реакції.

Рекомендована література [1, 2, 4, 5, 22, 23, 25].

Тема 2. Матеріальний і тепловий баланс процесу горіння

Матеріальний баланс процесу горіння. Особливості розрахунку об'єму повітря, необхідного для повного згоряння індивідуальних речовин, газових сумішей і речовин складного складу, які знаходяться в різному агрегатному стані. Коефіцієнт надлишку повітря. Продукти горіння, розрахунок об'єму і складу продуктів горіння під час повного і неповного згоряння речовин. Дим, небезпека диму, токсичність продуктів горіння на пожежі.

Теплові ефекти реакції горіння. Розрахунок теплотворної здатності горючого матеріалу, нижча і вища теплота згоряння. Тепловий баланс процесу горіння. Теплота і температура горіння, особливості визначення температури горіння речовин. Температура пожежі та її види. Розрахунок температури горіння.

Питання для самоперевірки:

1. Матеріальний баланс процесу горіння, повне та неповне згоряння. Продукти горіння, їх склад, класифікація. Дим та його небезпека на пожежі. Методи визначення об'єму продуктів горіння.
2. Екзотермічні та ендотермічні реакції. Складання термохімічних рівнянь реакції горіння. Теплота утворення хімічних речовин, закон Г.І. Гесса.
3. Енергетичний баланс процесу горіння. Види теплоти згоряння (нижча, вища, молярна, масова, об'ємна), розрахунок теплоти згоряння складних речовин.
4. Пожежна навантага. Практичне значення теплоти згоряння для оцінки горючості речовин та матеріалів.
5. Температура горіння речовини. Види температур горіння: калориметрична, теоретична, адіабатична та практична температура горіння.
6. Способи визначення температури горіння. Фактори, що впливають на температуру горіння. Практичне значення величини температури горіння.

Рекомендована література [2, 4, 5, 20, 25, 30].

РОЗДІЛ 2. ВИНИКНЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ

Тема 3. Горючі системи.

Концентраційні межі поширення полум'я

Умови виникнення горіння. Область займання кінетичних сумішей. Граничні параметри процесу горіння, залежність параметрів горіння від концентрації горючої речовини та окислювача в газоповітряній суміші. Концентраційні межі поширення полум'я, їх значення для оцінки небезпеки газоповітряних сумішей. Залежність концентраційних меж від початкової температури, тиску, потужності джерела запалювання, наявності флегматизаторів. Способи розрахункового й експериментального визначення концентраційних меж поширення полум'я і встановлення ступеня небезпеки фактичної концентрації парогазоповітряних сумішей. Засоби практичного визначення фактичної концентрації парів і газів у повітрі.

Питання для самоперевірки:

1. Концентраційні межі поширення полум'я (КМПП) газів. Фактори, що впливають на КМПП.
2. Практичне значення концентраційних меж поширення полум'я, методи розрахунку.

Рекомендована література [1, 2, 3, 4, 5, 7, 22, 24, 26].

Тема 4. Самоспалахування горючих систем

Умови, необхідні для виникнення горіння, види виникнення горіння. Елементи теплової теорії самоспалахування. Співвідношення між тепловиділенням і тепловіддачею в системі при самоспалахуванні. Графічне та математичне відображення критичних умов самоспалахування, період індукції.

Температура само спалахування t_{cc} . Фактори, що впливають на температуру самоспалахування: природа горючої речовини (склад та будова молекули), склад горючої суміші (вміст горючої речовини, окислювача, негорючих газів, каталізаторів та інгібіторів), умови, в яких знаходиться горюча суміш (об'єм та форма посудини, тиск, початкова температура). Мінімальна і стандартна температури

самоспалахування. Розрахункове та експериментальне визначення t_{cc} речовин у повітрі.

Питання для самоперевірки:

1. Особливості та види процесів виникнення горіння.
2. Самоспалахування речовин та матеріалів. Період індукції, фактори, що впливають на період індукції.
3. Теплова теорія самоспалахування. Графічне та математичне відображення критичних умов самоспалахування.
4. Фактори, що впливають на температуру самоспалахування. Залежність температури самоспалахування від складу горючої суміші. Стехіометричне співвідношення горючої речовини та окислювача.
5. Розрахунок допустимої температури нагріву поверхні технологічного обладнання. Способи зниження пожежної небезпеки технологічного процесу. Принцип роботи вогнеперешкоджувачів.

Рекомендована література [3, 4, 5, 7, 11, 20, 27, 31].

Тема 5. Самозаймання речовин і матеріалів

Самозаймання. Види самозаймання – хімічне, фізичне, теплове та мікробіологічне. Умови, що призводять до виникнення самозаймання. Температура самонагрівання, розрахунок критичних умов теплового самозаймання. Самозаймання вугілля та рослинних матеріалів. Особливості хімічного самозаймання при контакті речовин з водою, киснем повітря, при контакті з газоподібними, рідкими і твердими окислювачами. Особливості самозаймання жирів і олій, експериментальне визначення схильності жирів і олій до самозаймання.

Питання для самоперевірки:

1. Сутність процесу самозаймання. Відмінні особливості процесу самозаймання від самоспалахування. Класифікація процесів самонагрівання при самозайманні. Умови, що сприяють виникненню процесу самозаймання.
2. Мікробіологічне самозаймання. Механізм самозаймання рослинних матеріалів: причини, умови, заходи

профілактики.

3. Хімічне самозаймання. Особливості самозаймання речовин при контакті з киснем повітря, пірофорні речовини та сполуки. Причини та умови самозаймання, заходи профілактики.
4. Особливості хімічного самозаймання речовин при контакті з водою, причини, умови та заходи профілактики.
5. Фізичне самозаймання речовин. Особливості самозаймання вугілля, причини самонагрівання, умови та заходи профілактики процесу.
6. Самозаймання жирів та олій. Причини і умови самозаймання жирів та олій. Йодне число та його практичне значення як показника схильності до самозаймання. Заходи профілактики.
7. Механізм теплового самозаймання матеріалів: причини, умови, способи профілактики.

Рекомендована література [3, 4, 5, 7, 10, 23, 30].

Тема 6. Вимушене запалювання горючих систем

Загальні та відмітні особливості процесів самоспалахування і запалювання. Види джерел запалювання. Механізм займання горючих систем джерелами запалювання. Критичні умови вимушеного займання. Елементи теплової теорії займання нагрітим тілом. Фактори, що впливають на температуру запалювання.

Відомості про теплову та іонну теорію займання електричним розрядом. Мінімальна енергія запалювання. Фактори, що впливають на мінімальну енергію запалювання. Запалювальна здатність фрикційних іскор. Розрахункове визначення здатності фрикційної іскри до підпалення горючої системи. Значення достовірної оцінки критичних параметрів джерел запалювання для забезпечення пожежо- і вибухобезпечних умов праці, встановлення причин запалювання горючих речовин при експертизі пожеж.

Питання для самоперевірки:

1. Вимушене запалювання горючої суміші. Відмінність вимушеного запалювання від самоспалахування. Запалювання нагрітим тілом.

2. Види джерела запалювання. Період індукції, процеси, що протікають в горючій суміші за період індукції. Фактори, що впливають на період індукції.
3. Запалювання горючих сумішей електричними розрядами. Теплова теорія вимушеного запалювання електричними розрядами. Вплив потужності розряду на процес запалювання.
4. Запалювання горючих сумішей фрикційними іскрами.
5. Подібність та відмінність самоспалахування, самозаймання та вимушеного запалювання.

Рекомендована література [4, 5, 18, 20, 23, 25].

РОЗДІЛ 3. ПОШИРЕННЯ ГОРІННЯ

Тема 7. Горіння газо-пароповітряних сумішей

Кінетичне горіння газових сумішей. Елементи дифузійної і теплової теорії поширення полум'я. Фронт полум'я, зони фронту полум'я, процеси, що відбуваються в підготовчій зоні та зоні горіння. Нормальна швидкість поширення полум'я. Фактори, що впливають на нормальну швидкість поширення горіння: початкова температура, тиск, склад суміші, вид горючої речовини. Вибух, перехід кінетичного дефлаграційного горіння в детонацію, визначення максимального тиску при вибуху.

Питання для самоперевірки:

1. Кінетичне горіння газів. Характеристика фронту полум'я.
2. Теплова та дифузійна теорії поширення кінетичного горіння. Швидкість поширення фронту полум'я. Основні фактори, що впливають на швидкість поширення горіння.
3. Види кінетичного горіння газів. Дефлаграційне горіння газів, процеси, що відбуваються у фронті полум'я.
4. Вибух, розрахункове визначення тиску вибуху. Практичне значення максимального тиску вибуху.
5. Перехід дефлаграційного горіння до детонації.

Рекомендована література [2, 3, 4, 7, 11, 18, 22, 24, 25, 26, 27, 28, 31].

Тема 8. Горіння рідин

Випаровування рідин. Насичена пара та її властивості, залежність тиску насиченої пари від температури рідини. Розрахункове визначення тиску насиченої пари. Температурні межі поширення полум'я (ТМПП), способи розрахункового і експериментального визначення ТМПП для рідин різного складу. Практичне значення ТМПП для забезпечення безпечних умов при роботі, зберіганні та транспортуванні горючих рідин.

Фізико-хімічні процеси, що протікають при запалюванні рідин. Температура спалаху і температура займання рідини, розрахункові й експериментальні способи їх визначення. Фактори, що впливають на температуру спалаху рідини. Механізм поширення полум'я по поверхні рідини. Лінійна швидкість поширення горіння по поверхні рідини. Аналіз впливу природи горючої рідини, вмісту негорючих компонентів, початкової температури, загального тиску, швидкості вітру та інших чинників на величину швидкості поширення полум'я.

Механізм вигорання рідин. Тепло- і масообмін при горінні рідини. Фактори, що впливають на масову швидкість вигорання рідин. Прогрів рідини вглиб при сталому горінні, рідини першого та другого роду. Механізм утворення гомотермічного шару. Спінювання і викид рідин при горінні в резервуарі, причини, умови і механізм цих процесів.

Питання для самоперевірки:

1. Насичена пара та її властивості. Тиск насиченої пари, її характеристика та безпека. Розрахунок фактичної концентрації насиченої пари рідини за заданої температури.
2. Випаровування рідин у відкритий та закритий простір. Фактори, що впливають на швидкість випаровування. Основні параметри, що характеризують пожежну безпеку рідин у відкритому та закритому просторі.
3. Температурні межі поширення полум'я рідин ТМПП. Зв'язок концентраційних та температурних меж поширення полум'я. Методи визначення ТМПП.
4. Фактори, що впливають на ТМПП. Практичне значення температурних меж. Визначення ступеня безпеки горючих

рідин за даних умов. Робочі температури під час зберігання, переробки та транспортування горючих рідин.

5. Температура спалаху рідин. Методи розрахункового та експериментального визначення температури спалаху. Відмінність температури спалаху від температури займання. Практичне значення температури спалаху.
6. Механізм поширення полум'я по поверхні горючих рідин. Фактори, що впливають на швидкість поширення горіння.
7. Процеси, що протікають при сталому горінні рідин. Розподіл температур першого і другого роду.

Рекомендована література [1, 2, 3, 4, 5, 7, 11, 14, 16, 19, 25].

Тема 9. Горіння твердих речовин

Класифікація твердих горючих матеріалів за хімічним складом та поведінням при нагріванні. Загальні закономірності виникнення горіння твердих матеріалів, поле температур в зоні горіння та у твердому матеріалі. Механізм поширення горіння по поверхні твердих горючих матеріалів. Лінійна швидкість поширення горіння по поверхні твердих матеріалів. Фактори, що впливають на швидкість поширення горіння: природа горючої речовини, вміст негорючих компонентів, початкова температура, орієнтація зразка у просторі, волога, геометричні розміри зразка, швидкість вітру та інші. Термічно тонкі та термічно товсті зразки. Розподіл температури в матеріалі при сталому вигоранні.

Горіння целюлозовмісних матеріалів. Приблизний склад деревини, термічне розкладання деревини при нагріванні. Гомогенно-гетерогенний режим горіння целюлозовмісних матеріалів на пожежі, реакції перевуглення. Тління, особливості тління. Зони, що утворюються у процесі тління. Перехід тління в гомогенне горіння. Небезпека тління в закритому просторі при гасінні пожеж. Порівняння процесів горіння газоподібних, рідких і твердих речовин.

Горіння полімерів. Класифікація полімерів за походженням, будовою, способом отримання, поведінкою при нагріванні. Загальні закономірності та особливості горіння термопластичних та термостійких полімерів. Основні методи

зниження горючості пластмас.

Горючі метали, летючі та нелетючі метали. Особливості горіння металів.

Питання для самоперевірки:

1. Горіння твердих горючих матеріалів (ТГМ), класифікація за хімічним складом, поведінкою при нагріві. ТГМ першого та другого роду.
2. Поширення полум'я по поверхні ТГМ. Фактори, що впливають на швидкість поширення полум'я по поверхні ТГМ.
3. Особливості горіння целюлозних матеріалів. Дві фази горіння деревини на пожежі. Процес перевуглення.
4. Сутність та особливості процесу тління. Перехід тління в полум'яне горіння.
5. Особливості горіння металів. Класифікація металів, явища і процеси, що супроводжують горіння металів.
6. Полімерні матеріали, класифікація, пожежна небезпека.
7. Особливості горіння термопластичних та термореактивних пластмас.

Рекомендована література [2, 3, 4, 5, 7, 8, 12, 20, 28].

Тема 10. Горіння пилоповітряних сумішей

Горіння пилоповітряних сумішей, властивості пилу. Механізм виникнення та поширення горіння по пилоповітряних сумішах. Особливості горіння аерозолу та аерогелю, параметри, що характеризують пожежну небезпеку пилу в різних станах. Чинники, що впливають на нижню концентраційну межу поширення полум'я по пилоповітряній суміші. Способи розрахункового та експериментального визначення нижньої концентраційної межі пилу в повітрі.

Питання для самоперевірки:

1. Пил як дисперсна система. Класифікація пилу. Властивості пилу, що визначають його пожежовибухонебезпеку.
2. Горіння пилу. Відмінність горіння пилу в осілому та завислому стані.

3. Елементи теорії кінетичного горіння пилоповітряних систем. Відмінність горіння пилоповітряних систем від кінетичного горіння газів.
4. Фактори, що впливають на вибухонебезпеку пилу.
Рекомендована література [1, 3, 4, 5, 7, 11, 15, 18, 19, 21, 25, 29].

Тема 11. Оцінка горючості речовин і матеріалів

Поняття горючості та пожежовибухонебезпеки речовин і матеріалів. Найважливіші показники пожежовибухонебезпеки речовин і матеріалів. Класифікація речовин по групах горючості. Розрахункові способи визначення груп горючості за теплою згоряння та енергією Гіббса. Експериментальні способи оцінки горючості: керамічна труба, розповсюдження полум'я, тигельна піч і т. д.

Питання для самоперевірки:

1. Оцінка пожежовибухонебезпеки речовин та матеріалів. Параметри пожежної небезпеки речовин в різних агрегатних станах.
2. Запобігання запалювання горючих речовин в умовах технологічних процесів.

Рекомендована література [3, 4, 5, 7, 11, 23].

РОЗДІЛ 4. ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖ

Тема 12. Пожежа та її розвиток. Параметри розвитку

Визначення пожежі. Загальні та окремі явища на пожежі. Зони на пожежі: зона горіння, зона теплового впливу, зона задимлення. Параметри і кордони зон, умови, що впливають на величину і параметри зон. Періоди та фази розвитку пожежі. Небезпечні фактори пожежі. Основні параметри пожежі: площа пожежі, периметр пожежі, фронт пожежі, коефіцієнт поверхні горіння, лінійна швидкість поширення пожежі, масова швидкість вигорання на пожежі, теплота та температура пожежі, інтенсивність газообміну. Форми розвитку пожежі та розрахункові схеми площі пожежі. Класифікація пожеж за умовами газообміну, видом горючої речовини, зміною площі пожежі. Поняття про тепломасообмін на пожежах, відкриті

пожежі і пожежі в огороженні.

Загальні закономірності розвитку пожеж на відкритому просторі. Особливості розвитку пожежі класу А на відкритому просторі. Розліг іскор. Швидкість поширення пожежі залежно від вітру.

Особливості розвитку пожеж класу В. Небезпечні фактори пожеж класу В. Основні параметри вибуху пароповітряної хмари. Тротиловий еквівалент. Модель розвитку пожежі в резервуарному парку.

Особливості розвитку пожеж класу С. Зони загазованості при аварійному витоку горючих газів із технологічного обладнання. Пожежі газових фонтанів. Класифікація пожеж газових фонтанів. Небезпечні фактори пожеж класу С. Зона теплового впливу та безпечні відстані від фонтану при гасінні пожеж.

Питання для самоперевірки:

1. Поняття про пожежу. Класифікація, фази розвитку та стисла характеристика процесів, що протікають на кожній фазі розвитку пожежі.
2. Загальні та окремі явища на пожежі, їх стисла характеристика. Зони на пожежі, межі зон. Параметри пожежі.
3. Особливості розвитку пожежі класу А. Пожежі на відкритому просторі і в огороженні. Характеристика зон. Відмінні особливості пожеж класу А на відкритому просторі і в огороженні.
4. Особливості розвитку пожежі класу В. Явища скипання та викиду рідин при горінні резервуарів, умови їх виникнення та заходи попередження.
5. Виникнення пожеж класу В. Розвиток пожежі в резервуарному парку.
6. Особливості розвитку пожежі класу С. Небезпечні фактори пожежі. Фактор теплового впливу на людину. Методика визначення безпечної відстані від факела газонафтового фонтана.

Рекомендована література [2, 6, 7, 9, 14, 19, 33]

Тема 13. Тепломасообмін пожежі у приміщенні

Загальні закономірності розвитку пожеж в огороженні. Критичний час розвитку пожежі в огороженні. Пожежі, що регулюються пожежною навантагою та газообміном. Особливості теплопередачі при пожежах у приміщеннях. Температурний режим внутрішньої пожежі, фактори, що впливають на температуру пожежі в огороженні. Моделі, що описують температурний режим розвитку пожежі в приміщенні, основні положення інтегральної та зонної моделі. Прогнозування температурного режиму залежно від умов протікання процесу горіння на пожежі, розрахунок температури пожежі в приміщенні.

Механізм газообміну при пожежі в закритому приміщенні. Перепад тиску в приміщенні під час пожежі, його залежність від різних параметрів. Поняття нейтральної зони, залежність положення нейтральної зони від умов газообміну. Розрахунок та способи регулювання газообміну та висоти нейтральної зони на пожежі.

Питання для самоперевірки:

1. Розвиток пожежі в огороженні. Температурний режим пожежі в огороженні.
2. Характеристика пожеж, що регулюються газообміном та пожежною навантагою.
3. Основні моделі температурного режиму пожежі.
4. Інтегральна модель температурного режиму пожежі в огороженні. Фактори, що впливають на температуру пожежі в огороженні.
5. Методика визначення температури пожежі за номограмами.
6. Газообмін під час пожежі, причини виникнення газообміну. Основні закономірності газообміну на пожежі.
7. Нейтральна зона, фактори, що визначають на висоту нейтральної зони.

Рекомендована література [2, 6, 7, 9, 13, 14, 17, 19, 28].

РОЗДІЛ 5. ЗАПОБІГАННЯ ТА ПРИПИНЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ

Тема 14. Теплова теорія припинення горіння

Сутність граничних параметрів горіння. Межі горіння за концентрацією горючої речовини, окислювача та негорючих добавок у зоні горіння. Природа тепловиділення і тепловіддачі при дифузійному горінні. Елементи теплової теорії припинення горіння. Взаємозв'язок температури горіння з температурою погасання. Шляхи і способи припинення горіння на пожежі: зниження інтенсивності тепловиділення в зоні реакції та підвищення інтенсивності тепловіддачі із зони реакції.

Питання для самоперевірки:

1. Основи теплової теорії припинення горіння.
2. Температура погасання, критичні параметри процесу горіння.
3. Методи, способи та прийоми припинення горіння на пожежі і запобігання виникненню горіння в умовах технологічних процесів.

Рекомендована література [3, 4, 5, 7, 10, 23, 30].

Тема 15. Способи та засоби припинення процесів горіння

Основні засоби та способи припинення горіння на пожежі. Вогнегасні речовини, загальні вимоги. Класифікація вогнегасних речовин за домінуючим впливом на зону горіння. Характеристика основних вогнегасних засобів. Принципи вибору та використання вогнегасної речовини залежно від класу пожежі. Основні параметри гасіння пожежі: критична та оптимальна інтенсивність подачі в зону горіння, питома та загальна витрата вогнегасної речовини, показник ефективності гасіння, коефіцієнт використання вогнегасного засобу. Практичне використання параметрів пожежогасіння для організації бойових дій при гасінні пожежі.

Вогнегасні речовини, що охолоджують. Механізм дії охолоджуючих вогнегасних речовин на зону горіння. Вода, основні фізико-хімічні властивості води як вогнегасної речовини. Розрахунок теоретично необхідної питомої витрати води при гасінні пожеж. Методи підвищення ефективності використання води: введення змочувачів, згущувачів, антипіренів, інгібіторів.

Ізольовані вогнегасні речовини. Види вогнегасних пін, способи отримання. Піноутворювачі, загальні вимоги. Властивості повітряно-механічної піни. Механізм припинення горіння при дії повітряно-механічної піни на зону горіння, підшаровий спосіб подачі вогнегасних пін.

Розбавлення реагуючих компонентів, флегматизація горючих сумішей. Вогнегасні речовини, що розбавляють. Механізм припинення горіння за допомогою негорючих газів. Показник вогнегасної ефективності негорючих газів. Методи підвищення ефективності вогнегасних речовин, що розбавляють. Мінімальна флегматизуюча концентрація. Розрахунок інтенсивності подачі, питомої витрати та часу гасіння за допомогою негорючих газів.

Хімічне гальмування реакції горіння як спосіб припинення горіння на пожежі. Вогнегасні речовини, що інгібують: хладони, вогнегасні порошки загального призначення, аерозоліутворюючі склади. Механізм їх впливу при гасінні пожеж. Переваги та недоліки інгібуючих вогнегасних речовин.

Комбіновані засоби та способи припинення горіння. Принципи розробки комбінованих способів гасіння пожежі та використання їх у практиці пожежогасіння. Комбінація газів, рідин та порошкових складів, введення хімічно активних інгібіторів і негорючих газів у піну.

Питання для самоперевірки:

1. Вогнегасні засоби. Загальні вимоги до вогнегасних засобів, класифікація та основи вибору вогнегасного засобу.
2. Основні параметри пожежогасіння, їх взаємозв'язок.
3. Припинення горіння методом охолодження. Умови, процеси, що супроводжують припинення горіння. Охолоджуючі вогнегасні речовини та їх стисла характеристика.
4. Припинення горіння з використанням води. Механізм та процеси, що призводять до припинення горіння. Методи підвищення ефективності використання води як

вогнегасного засобу.

5. Припинення горіння методом ізоляції. Вогнегасні речовини, що ізолюють.
6. Процеси, які відбуваються при припиненні горіння повітряно-механічними пінами. Властивості вогнегасних пін.
7. Механізм припинення горіння інертними газами. Показник ефективності вогнегасної дії різних флегматизаторів.
8. Механізм припинення горіння вогнегасними речовинами, що розріджують. Запобігання виникненню горіння флегматизацією, методика розрахунку флегматизуючої концентрації.
9. Інгібування процесу горіння. Принцип припинення горіння інгібіторами, виходячи з теплової теорії припинення горіння та теорії ланцюгових реакцій. Види інгібіруючих вогнегасних речовин.
10. Вогнегасні порошкові суміші та їх характеристика. Види вогнегасних порошоків. Механізм припинення горіння вогнегасними порошками.

Рекомендована література [2, 6, 7, 9, 11, 14, 18, 23, 26, 32].

ОРІЄНТОВНІ ПИТАННЯ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ДО ІСПИТУ

1. Сутність процесу горіння як окислювально-відновного процесу. Повітря та його склад. Складання рівнянь реакції горіння.

2. Умови виникнення і гальмування процесу горіння. Класифікація процесів горіння: гомогенне та гетерогенне, дифузійне та кінетичне, дефлаграційне та детонаційне, ламінарне та турбулентне.

3. Полум'я, структура і колір полум'я. Температурний режим полум'я, процеси, що відбуваються в різних зонах.

4. Перекісна теорія Баха. Види перекисів, їх небезпека.

5. Процеси, що відбуваються в зоні горіння з точки зору теорії ланцюгових реакцій Семенова. Розгалужені та нерозгалужені ланцюгові реакції, швидкість протікання ланцюгової реакції.

6. Матеріальний баланс процесу горіння, повне та неповне згорання. Продукти горіння, їх склад, класифікація. Дим та його небезпека на пожежі. Методи визначення об'єму продуктів горіння.

7. Екзотермічні та ендотермічні реакції. Складання термохімічних рівнянь реакції горіння. Теплота утворення хімічних речовин, закон Г.І. Гесса.

8. Енергетичний баланс процесу горіння. Види теплот згорання (нижча, вища, молярна, масова, об'ємна), методи визначення теплоти згорання індивідуальних речовин.

9. Пожежна навантага. Методи визначення теплоти згорання складних речовин. Практичне значення теплоти згорання для оцінювання горючості речовин.

10. Температура горіння речовини. Види температур горіння: калориметрична, теоретична, адіабатична та практична температура горіння.

11. Способи визначення температури горіння. Фактори, що впливають на температуру горіння. Практичне значення температури горіння в умовах пожежі.

12. Особливості процесу виникнення горіння. Види виникнення горіння, подібність та відмінність самоспалахування, самозаймання та вимушеного запалювання.

13. Самоспалахування речовин та матеріалів. Період індукції, фактори, що впливають на період індукції.

14. Теплова теорія самоспалахування. Графічне та математичне відображення критичних умов самоспалахування.

15. Фактори, що впливають на температуру самоспалахування. Залежність температури самоспалахування від виду горючої речовини, складу горючої суміші, умов навколишнього середовища.

16. Розрахунок допустимої температури нагріву поверхні технологічного обладнання. Способи зниження пожежної небезпеки технологічного процесу. Принцип роботи вогнеперешкоджувачів.

17. Сутність процесу самозаймання. Відмінні особливості процесу самозаймання від самоспалахування. Класифікація процесів самонагрівання при самозайманні. Умови, що сприяють процесу самозаймання.

18. Мікробіологічне самозаймання. Механізм самозаймання рослинних матеріалів: причини, умови, заходи профілактики.

19. Хімічне самозаймання. Особливості самозаймання речовин при контакті з киснем повітря, пірофорні речовини та сполуки. Причини самозаймання, заходи профілактики.

20. Хімічне самозаймання. Особливості самозаймання речовин при контакті з водою, причини, умови та заходи профілактики.

21. Фізичне самозаймання речовин. Особливості самозаймання вугілля, причини самонагрівання, умови та заходи профілактики процесу.

22. Самозаймання жирів та олій. Йодне число жиру, його значення як показника схильності до самозаймання. Причини й умови самозаймання жирів та олій. Заходи профілактики.

23. Механізм теплового самозаймання матеріалів: причини, умови, заходи профілактики.

24. Вимушене запалювання горючої суміші. Відмінність вимушеного запалювання від самоспалахування. Запалювання нагрітим тілом.

25. Види джерела запалювання. Період індукції, процеси, що протікають в горючій суміші за період індукції. Фактори,

що впливають на період індукції.

26. Запалювання горючих сумішей електричними розрядами. Теплова теорія вимушеного запалювання електричними розрядами. Вплив потужності розряду на процес запалювання.

27. Запалювання горючих сумішей фрикційними іскрами.

28. Кінетичне горіння газів. Швидкість поширення фронту полум'я, характеристика фронту полум'я та основні фактори, що впливають на швидкість поширення горіння.

29. Види кінетичного горіння газів. Дефлаграційне горіння газів, процеси, що відбуваються у фронті полум'я. Теплова та дифузійна теорії поширення кінетичного горіння.

30. Перехід дефлаграційного горіння до детонації. Вибух, розрахункове визначення тиску вибуху. Практичне значення максимального тиску вибуху.

31. Концентраційні межі поширення полум'я газів. Фактори, що впливають на КМПП.

32. Практичне значення концентраційних меж розповсюдження полум'я, методика розрахунку КМПП.

33. Насичена пара та її властивості. Тиск насиченої пари, її характеристика та безпека. Розрахунок фактичної концентрації насиченої пари рідини за даної температури.

34. Випаровування рідин у відкритий та закритий простір. Фактори, що впливають на швидкість випаровування. Основні параметри, що характеризують пожежну безпеку рідин у відкритому та закритому просторі.

35. Температурні межі поширення полум'я рідин ТМПП. Зв'язок концентраційних та температурних меж поширення полум'я. Методи визначення ТМПП.

36. Фактори, що впливають на температурні межі розповсюдження полум'я. Практичне значення температурних меж.

37. Температура спалаху рідин. Методи розрахункового та експериментального визначення температури спалаху. Відмінність температури спалаху від температури займання. Практичне значення температури спалаху.

38. Механізм поширення полум'я по поверхні горючих рідин. Фактори, що впливають на швидкість поширення горіння.

39. Процеси, що протікають при сталому горінні рідин. Розподіл температур першого і другого роду.

40. Визначення ступеня небезпеки горючих рідин за даних умов. Робочі температури під час зберігання, переробки та при транспортуванні горючих рідин.

41. Горіння твердих горючих матеріалів ТГМ. Класифікація, ТГМ першого та другого роду. Фактори, що впливають на швидкість поширення полум'я по поверхні ТГМ.

42. Особливості горіння целюлозних матеріалів. Дві фази горіння деревини на пожежі. Процес перевуглення.

43. Сутність процесу тління. Особливості тління. Перехід тління в полум'яне горіння.

44. Особливості горіння металів. Класифікація металів, явища і процеси, що супроводжують горіння металів.

45. Полімерні матеріали, класифікація, пожежна небезпека. Особливості горіння термопластів та термореактивних полімерів.

46. Пил як дисперсна система. Класифікація пилу. Властивості пилу, що визначають його пожежовибухонебезпеку.

47. Горіння пилу. Відмінність горіння пилу в осілому та завислому стані.

48. Елементи теорії кінетичного горіння пилоповітряних систем. Відмінність горіння пилоповітряних систем від кінетичного горіння газів. Фактори, що впливають на вибухонебезпеку пилу.

49. Оцінка пожежовибухонебезпеки речовин та матеріалів. Параметри пожежної небезпеки речовин. Умови запобігання запалюванню горючих речовин в умовах технологічних процесів.

50. Поняття про пожежу. Класифікація, фази розвитку та стисла характеристика процесів за фазами розвитку пожежі.

51. Загальні та окремі явища, що супроводжують пожежу, їх стисла характеристика. Зони на пожежі, їх характеристика, межі зон. Параметри пожежі.

52. Особливості розвитку пожежі класу А. Пожежі на відкритому просторі і в огороженні, відмінні особливості.

53. Особливості розвитку пожежі класу В. Явища скипання та викиду рідин при горінні резервуарів. Причини, умови та заходи попередження скипання та викиду.

54. Умови виникнення пожеж класу В. Модель розвитку пожежі в резервуарному парку.

55. Особливості розвитку пожежі класу С. Небезпечні фактори пожежі. Методика визначення безпечної відстані від факела фонтана, що горить.

56. Особливості розвитку пожежі в огороженні. Поняття про температурний режим пожеж, основні моделі.

57. Інтегральна модель температурного режиму пожежі в огорожі. Фактори, що впливають на температуру пожежі в огороженні. Методика визначення температури пожежі за номограмою.

58. Газообмін на пожежі, основні закономірності. Причини виникнення газообміну при пожежі в огороженні.

59. Поняття про нейтральну зону. Фактори, що впливають на висоту нейтральної зони. Стисла характеристика пожеж, що регулюються газообміном та пожежною навантагою.

60. Основи теплової теорії припинення горіння. Температура погасання, критичні параметри процесу горіння.

61. Вогнегасні засоби. Загальні вимоги до вогнегасних засобів, класифікація та основи вибору вогнегасного засобу.

62. Основні параметри пожежогасіння, їх взаємозв'язок.

63. Припинення горіння методом охолодження. Умови, процеси, що супроводжують припинення горіння. Охолоджуючі вогнегасні речовини та їх стисла характеристика.

64. Припинення горіння з використанням води. Механізм та процеси, що призводять до припинення горіння. Методи підвищення ефективності використання води як вогнегасного засобу.

65. Припинення горіння методом ізоляції. Вогнегасні речовини, що ізолюють.

66. Процеси, які відбуваються при припиненні горіння

повітряно-механічними пінами. Властивості вогнегасних пін.

67. Механізм припинення горіння інертними газами. Показник ефективності вогнегасної дії різних флегматизаторів.

68. Механізм припинення горіння вогнегасними речовинами, що розріджують. Запобігання виникненню горіння флегматизацією, методика розрахунку флегматизуючої концентрації.

69. Інгібування горіння. Принцип припинення горіння інгібіторами за тепловою теорією припинення горіння та теорії ланцюгових реакцій. Види інгібуючих вогнегасних речовин.

70. Вогнегасні порошки та їх види та характеристика. Механізм припинення горіння вогнегасними порошками.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНИХ РОЗРАХУНКОВИХ ЗАВДАНЬ

Індивідуальне розрахункове завдання №1

Розрахувати параметри матеріального й енергетичного балансу процесу горіння, показники пожежовибухонебезпеки горючої рідини, фактичну концентрацію пари за визначених умов та ступінь її небезпеки.

Для визначеної за **номером залікової книжки** речовини розрахувати за всіма можливими із запропонованих методик наступні параметри:

1. Колір дифузійного полум'я.
2. Об'ємну та масову стехіометричну концентрацію.
3. Об'єм повітря та продуктів згорання.
4. Склад продуктів згорання.
5. Молярну, масову та об'ємну теплоту згорання речовини.
6. Температуру згорання речовини за даних умов.
7. Температуру вибуху за стехіометричної концентрації речовини та максимальний тиск вибуху пароповітряної хмари.
8. Концентраційні межі поширення полум'я.
9. Температуру самоспалахування.
10. Мінімальну енергію запалювання.
11. Тиск насиченої пари за даних умов.
12. Температурні межі поширення полум'я.
13. Температуру спалаху та клас рідини.

Вихідні умови, у яких знаходиться речовина, визначити із **табл. № 1.1** за *першою цифрою залікової книжки* або за вказівками викладача. Речовину для розрахунку визначити за **табл. №1.2** за *двома останніми цифрами залікової книжки*.

Таблиця № 1.1. Вихідні умови

Перша цифра залікової книжки		0	1	2
Коефіцієнт надлишку повітря α		1,7	1,3	1,9
Початковий тиск P_0 , кПа		110	99	103
Початкова температура t_0 , °C		22	11	30

Таблиця № 1.2. Речовина

№	Речовина	Формула	№	Речовина	Формула
1.	Акрилова кислота	$C_3H_4O_2$	24	Валеролактон	$C_5H_8O_2$
2.	Акролеїн	C_3H_4O	25	Гексادیєн	C_6H_{10}
3.	Аліловий спирт	C_3H_6O	26	Гексан	C_6H_{14}
4.	Амілбензол	$C_{11}H_{16}$	27	Гексилметилкетон	$C_8H_{16}O$
5.	Амілметилкетон	$C_7H_{14}O$	28	Гексиловий спирт	$C_6H_{14}O$
6.	Аміловий спирт	$C_5H_{12}O$	29	Гептан	C_7H_{16}
7.	Амілциклогексан	$C_{11}H_{22}$	30	Декан	$C_{10}H_{22}$
8.	Анілін	C_6H_7N	31	Диацетоновий спирт	$C_6H_{12}O_2$
9.	Ацетон	C_3H_6O	32	Дибутіловий ефір	$C_8H_{18}O$
10.	Ацетонітрил	C_2H_3N	33	Дипропіловий ефір	$C_6H_{14}O$
11.	Бензиловий спирт	C_7H_8O	34	Диетиламін	$C_4H_{11}N$
12.	Бензол	C_6H_6	35	Диетилєнґліколь	$C_4H_{10}O_3$
13.	Бутаналь	C_4H_8O	36	Диетилізопропілметан	C_8H_{18}
14.	Бутандіол-2,3	$C_4H_{10}O_2$	37	Диетилкетон	$C_5H_{10}O$
15.	Бутанова кислота	$C_4H_8O_2$	38	Диетіловий ефір	$C_4H_{10}O$
16.	Бутанол	$C_4H_{10}O$	39	Диізопропілкетон	$C_7H_{14}O$
17.	Бутанон	C_4H_8O	40	Диоксан	$C_4H_8O_2$
18.	Бутилбензол	$C_{10}H_{14}$	41	Додекан	$C_{12}H_{26}$
19.	Бутилметилкетон	$C_6H_{12}O$	42	Етилацетат	$C_4H_8O_2$
20.	Бутилфенол	$C_{10}H_{14}O$	43	Етилбензол	C_8H_{10}
21.	Бутилформіат	$C_5H_{10}O_2$	44	Етиленґліколь	$C_2H_6O_2$
22.	Валеріанова к-та	$C_5H_{10}O_2$	45	о-Етилтолуол	C_9H_{12}
23.	Валеріановий альдегід	$C_5H_{10}O$	46	Етилформіат	$C_3H_6O_2$

№	Речовина	Формула	№	Речовина	Формула
47	Етилциклогексан	C_8H_{16}	75	Оцтовий ангідрид	$C_4H_6O_3$
48	Ізоаміловий спирт	$C_5H_{12}O$	76	Пентан	C_5H_{12}
49	Ізобутилацетат	$C_6H_{12}O_2$	77	Пентанол-2	$C_5H_{12}O$
50	Ізопропенілбензол	C_9H_{10}	78	Піридин	C_5H_5N
51	м-Крезол	C_7H_8O	79	Пірол	C_4H_5N
52	Ксилідин	$C_8H_{11}N$	80	Пропаналь	C_3H_6O
53	м-Ксилол	C_8H_{10}	81	Пропанол	C_3H_8O
54	Кумол	C_9H_{12}	82	Пропіламін	C_3H_9N
55	Метанол	CH_4O	83	Пропілбензол	C_9H_{12}
56	Метилацетат	$C_3H_6O_2$	84	Пропілбутират	$C_7H_{14}O_2$
57	Метилбутират	$C_5H_{10}O_2$	85	Пропіленгліколь	$C_3H_8O_2$
58	2-Метилгексан	C_7H_{16}	86	Пропілетилкетон	$C_6H_{12}O$
59	Метилпентальдегід	$C_6H_{12}O$	87	Пропілформіат	$C_4H_8O_2$
60	Метилпропіонат	$C_4H_8O_2$	88	Пропілциклогексан	C_9H_{18}
61	Метилпропілкетон	$C_5H_{10}O$	89	Пропілциклопентан	C_8H_{16}
62	Метилформіат	$C_2H_4O_2$	90	Пропіонова кислота	$C_3H_6O_2$
63	Метилциклогексан	C_7H_{14}	91	Пропіоновий ангідрид	$C_6H_{10}O_3$
64	Метилциклопентан	C_6H_{12}	92	Стирол	C_8H_8
65	Метоксиетилацетат	$C_5H_{10}O_3$	93	Тетрагідрофуран	C_4H_8O
66	Мурашина кислота	CH_2O_2	94	Тетраметилпентан	C_9H_{20}
67	Нонан	C_9H_{20}	95	Толуол	C_7H_8
68	Ноніловий спирт	$C_9H_{20}O$	96	Триметилбензол	C_9H_{12}
69	Октан	C_8H_{18}	97	Триметилгексан	C_9H_{20}
70	Октаналь	$C_8H_{16}O$	98	Ундеканол	$C_{11}H_{24}O$
71	Октанова кислота	$C_8H_{16}O_2$	99	Фенілетиловий ефір	$C_8H_{10}O$
72	Октиловий спирт	$C_8H_{18}O$	00	Цимол	$C_{10}H_{14}$
73	Октилциклогексан	$C_{14}H_{28}$			
74	Оцтова кислота	$C_2H_4O_2$			

РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ.

1.1 ВИЗНАЧЕННЯ КОЛЬОРУ ДИФУЗІЙНОГО ПОЛУМ'Я

Структуру полум'я, умовно можна поділити на декілька зон – підготовчу, зону горіння та зону продуктів горіння.

У підготовчій зоні відбувається процес термічного розкладу речовин на складові: хімічні елементи, радикали та функціональні групи. Наприклад, при горінні ацетилен C_2H_2 розкладається за схемою: $C_2H_2 = 2C + 2H$.

Якщо в підготовчій зоні є кисень, то відбувається попереднє окислення карбону, і в зону горіння вже потрапляють не атоми карбону, а молекули CO.

В зоні горіння протікають швидкі реакції згоряння продуктів попереднього окиснення, карбону та водню до кінцевих продуктів: $CO + O = CO_2$; $C + 2O = CO_2$; $2H + O = H_2O$.

Спектри випромінювання двоатомних (CO) та трьохатомних газів (CO_2 , H_2O) лежать за межами світосприйняття людини, тому їх внеском в колір полум'я можна нехтувати. Якщо в зону горіння потрапляє карбон, то він розжарюється, і це обумовлює світіння зони горіння. Якщо у складі горючої речовини багато карбону, то він не встигає окислитися в зоні горіння і потрапляє в зону продуктів горіння у вигляді сажі.

Залежно від способу утворення суміші горючої речовини та окисника, розрізняють кінетичне і дифузійне полум'я.

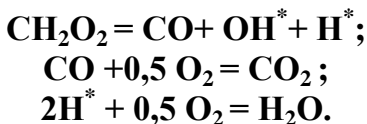
При кінетичному горінні в підготовчу зону надходить вже готова суміш в концентрації, близькій до стехіометричної; в цій же зоні відбувається розкладання компонентів суміші і попереднє окиснення. В зоні горіння утворюються кінцеві продукти реакції – діоксид карбону, азот, вода, які світла майже не випромінюють. Тому зона

горіння має слабо-блакитний колір незалежно від її температури. Якщо в суміші, яка надходить для горіння, недостатньо окисника, то в підготовчій зоні не встигають утворитися продукти попереднього окиснення, тому в зону горіння потрапляють частки карбону, полум'я набуває жовтого кольору.

В разі дифузійного горіння горюча суміш утворюється в зоні горіння за рахунок дифузії горючої речовини із підготовчої зони, а окислювача – із навколишнього середовища. Колір дифузійного полум'я залежить від хімічного складу горючої речовини.

Якщо у хімічному складі горючої речовини достатньо кисню, то карбон, який утворюється при термічному розкладанні в підготовчій зоні, встигає попередньо окислитися до монооксиду карбону (CO), який згоряє в зоні горіння з утворенням діоксиду карбону (CO₂). Отже, така речовина горить безбарвним або блакитним полум'ям.

Наприклад, горіння метанової (мурашиної) кислоти CH₂O₂ можна представити як процес послідовних реакцій:



З наведених реакцій видно, що дифузійне полум'я метанової кислоти повинно бути безбарвним.

При термічному розкладанні ацетону, окрім CO і водню, буде виділятися і карбон: C₃H₆O = CO + 2C + 6H^{*}. Частки вуглецю, що знаходяться у полум'ї, розжарюються і світяться, тому полум'я набуває яскравості. Але карбон, що утворився, при достатньому доступі повітря встигає окислитися до CO₂, і сажа не виділяється. Полум'я буде яскравим, без кіптяви.

При горінні октану C_8H_{18} за рахунок його розкладання в підготовчій зоні за реакцією: $C_8H_{18} = 8C + 18H^*$, утвориться настільки багато карбону, що кисню, який шляхом дифузії надходить в зону горіння, не вистачає для його окиснення. Тому карбон, який не прореагував у полум'ї, виділяється у вигляді сажі і полум'я буде яскравим та кіптявим.

Про характер світіння дифузійного полум'я можна приблизно судити за відсотковим вмістом кисню та карбону в горючій речовині, дивись таблицю №1.3.

Таблиця № 1.3. Залежність кольору полум'я від вмісту кисню та карбону у молекулі горючої речовини

Характер світіння полум'я	Вміст компонентів в 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

Приклад розв'язання задачі

Визначити колір дифузійного полум'я пропіонового ангідриду $C_6H_{10}O_3$.

Розв'язання

1. Розраховуємо молярну масу горючої речовини μ :

$$\mu = 6 \cdot 12 + 10 + 16 \cdot 3 = 130 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}.$$

2. Розраховуємо відсотковий вміст кисню та карбону у складі горючої речовини:

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

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

3. Згідно таблиці 1.3 визначаємо колір дифузійного полум'я: вміст O - від 25 до 50 %, вміст C - від 50 до 60 %,

отже полум'я яскраве, без кіптяви.

Висновок: дифузійне полум'я пропіонового ангідриду буде яскраве не кіптяве, оскільки масовий вміст атомів кисню в складі його молекули становить від 25 до 50 %, а карбону - від 50 до 75 %.

1.2 СКЛАДАННЯ РІВНЯННЯ РЕАКЦІЇ ГОРІННЯ

Для визначення основних параметрів процесу горіння та параметрів пожежної небезпеки речовин та матеріалів (визначення об'єму повітря, необхідного для повного згорання речовини, визначення об'єму продуктів згорання, температури горіння, максимального тиску при вибуху, температурного режиму пожежі і т.п.) необхідно вміти складати рівняння реакції горіння, на основі якого вирішуються задачі матеріального та енергетичного балансу.

На пожежі окисником є кисень повітря, який бере безпосередню участь у процесі окиснення горючих матеріалів. Але кисень до зони горіння надходить не в чистому виді, а разом з іншими компонентами повітря, найголовнішим з яких є азот. Враховуючи, що всі інші інертні гази містяться у повітрі в незначній кількості (не більше 1%), їх кількість об'єднують із азотом, тому склад повітря умовно приймають таким: азот – 79% об'єму, кисень – 21%. Таким чином, при горінні на один моль кисню, що бере участь у реакції горіння, припадає $79:21 = 3,76$ молів азоту.

Методика складання рівнянь реакції горіння дещо відрізняється від методики складання рівнянь хімічних реакцій. При складанні рівнянь реакції горіння необхідно враховувати наступні особливості.

Методика складання рівнянь реакції горіння

1. Рівняння складається на 1 моль горючої речовини. На відміну від рівнянь хімічних реакцій, у рівнянні реакції горіння можуть бути наявні і дробові стехіометричні коефіцієнти.

2. Горіння на пожежі протікає в середовищі повітря. Склад повітря записується в молях як $(O_2 + 3,76 N_2)$.

3. Вважається, що утворюються тільки продукти

повного згоряння, а повітря надходить у стехіометричному співвідношенні. Число молів повітря, необхідного для повного згоряння горючої речовини, визначається *стехіометричним коефіцієнтом* β . Тоді загальний вид рівняння реакції горіння можна записати як:

Горюча речовина + β ($O_2 + 3,76 N_2$) = Продукти горіння,

де β - стехіометричний коефіцієнт у рівнянні реакції.

4. Виходячи з елементного складу горючої речовини, визначають якісний склад продуктів горіння:

Таблиця № 1.4. Продукти повного згоряння деяких хімічних елементів

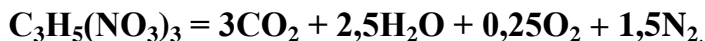
Елемент у речовині	Продукт повного окиснення
карбон С	діоксид карбону CO_2 ;
гідроген Н	вода H_2O ;
сульфур S	діоксид сульфуру SO_2 ;
фосфор Р	фосфорний ангідрид P_2O_5 ;
силіцій Si	діоксид силіцію SiO_2 ;
метал	оксид металу;
нітроген N	молекулярний азот N_2 ;
галогени (F, Cl, Br, J)	галогеноводні (HF, HCl, HBr, HI)

Галогеноводні утворюються при взаємодії галогенів з атомами водню, які входять до складу горючої речовини:



5. Наявний в горючій речовині кисень також вступає до реакції окиснення як і кисень повітря, при цьому кількість повітря, що необхідно для згоряння і надходить з навколишнього середовища, відповідно зменшується.

Навіть горіння може протікати лише за рахунок власного кисню молекули. Зразком може служити горіння вибухових та піротехнічних речовин, зокрема нітрогліцерину:



6. Для правильного складання рівняння реакції горіння слід спочатку урівняти число атомів карбону, потім сульфору, фосфору і силіцію, потім – галогенів, після цього – число атомів гідрогену. Останніми урівнюють число атомів кисню і нітрогену в правій і лівій частині рівняння.

Число молів повітря, необхідного для повного згорання 1 моля горючої речовини, визначається стехіометричним коефіцієнтом β , який можна розрахувати за формулою:

$$\beta = C + S + \frac{H - \text{Halogen}}{4} - \frac{O}{2} + \frac{5P}{4}, \quad (1)$$

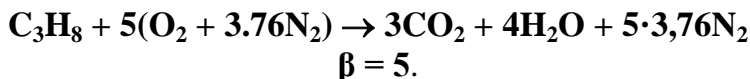
де - C, S, H, Halogen, O, P - число атомів відповідно карбону, сульфору, гідрогену, галогену, кисню та фосфору в молекулі горючої речовини.

Приклад розв'язання задачі

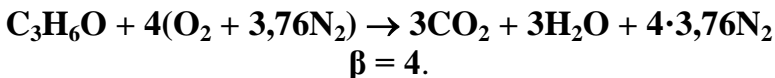
Скласти рівняння реакції горіння основних класів органічних речовин у повітрі.

Розв'язання.

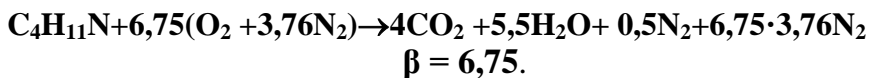
Вуглеводні: горіння пропану у повітрі:



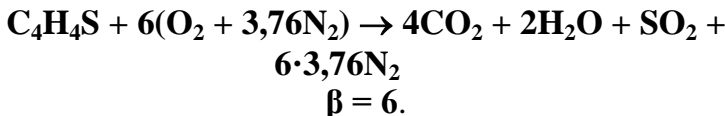
Оксигенвмісні речовини: горіння ацетону в повітрі:



Нітрогенвмісні речовини: горіння диетиламіну у повітрі:

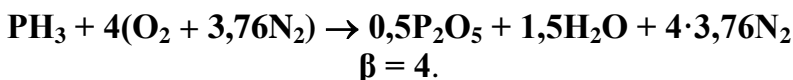


Сульфурвмісні речовини: горіння тіофену у повітрі:

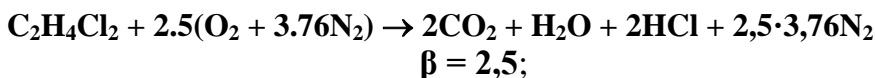


Фосфорвмісні речовини:

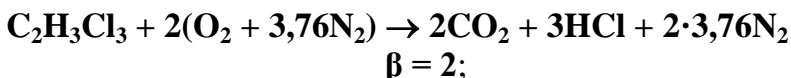
горіння фосфористого водню у повітрі:



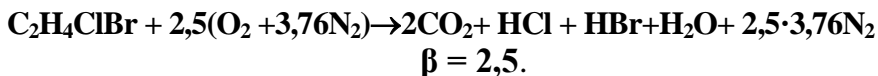
Галогенвмісні речовини: горіння дихлоретану у повітрі:



горіння трихлоретану у повітрі:

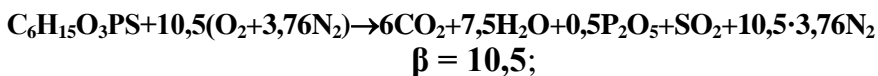


горіння хлорброметану у повітрі:

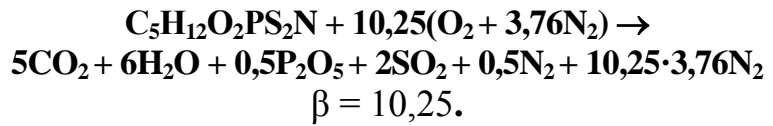


Елементоорганічні речовини:

горіння триетилтіофосфату у повітрі:



горіння фосфаміду у повітрі:



1.3 МАТЕРІАЛЬНИЙ БАЛАНС ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ

При розгляданні різних аспектів процесу горіння важливу роль відіграє матеріальний баланс між вихідними речовинами реакції горіння та продуктами, що утворюються внаслідок цієї реакції. Розрахунок матеріального балансу дозволяє визначити кількість повітря, необхідного для горіння, об'єм і склад продуктів повного згорання, температуру горіння та інші параметри, які будуть визначати характер розвитку пожежі в тих або інших умовах.

1.3.1. Визначення стехіометричної концентрації горючої речовини

Горюча суміш, склад якої відповідає рівнянню реакції горіння, називається *сумішшю стехіометричного складу*. Такі суміші є найбільш реакційноздатними, а тому й найбільш пожежонебезпечними, бо вони легше займаються, в них швидше поширюється процес горіння та виділяється максимальна кількість тепла. *Концентрація* горючої речовини, яка відповідає стехіометричному співвідношенню, називається *стехіометричною*.

Для визначення об'ємної стехіометричної концентрації горючої речовини використовують розрахункові формули:

$$\text{в суміші з повітрям} \quad \varphi_{\text{стм}} = \frac{100}{1 + 4,76\beta}, \%, \quad (2)$$

$$\text{в суміші з киснем} \quad \varphi_{\text{стм}} = \frac{100}{1 + \beta}, \%. \quad (3)$$

Масову концентрацію речовини можна отримати перерахунком об'ємної концентрації за формулою:

$$\rho_{\text{стм}} = \frac{10 \cdot \varphi_{\text{стм}} \cdot \mu}{V_{\mu}}, \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (4)$$

де μ – молярна маса речовини, кг·кмоль⁻¹;

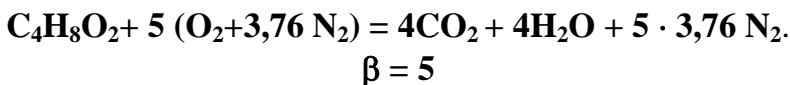
V_{μ} - молярний об'єм газу за даної температури, м³·кмоль⁻¹.

Приклад розв'язання задачі

Визначити об'ємну та масову стехіометричну концентрацію діоксану в суміші з повітрям за умов: $t_0 = 30^{\circ}\text{C}$, $P_0 = 105,0$ кПа.

Розв'язання

1. Складаємо рівняння реакції горіння:



2. Розраховуємо об'ємну стехіометричну концентрацію горючої речовини в суміші з повітрям:

$$\varphi_{\text{стм}} = \frac{100}{1 + 4,76 \cdot 5} = 4,03 \text{ \%}.$$

3. Розраховуємо молярну масу горючої речовини μ та молярний об'єм газу за даних умов V_{μ} :

$$\mu = 4 \cdot 12 + 8 + 16 \cdot 2 = 88 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1};$$
$$V_{\mu} = \frac{101,3 \cdot 22,4 \cdot (273 + 30)}{105,0 \cdot 273} = 23,98 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}.$$

4. Розраховуємо масову стехіометричну концентрацію горючої речовини в суміші з повітрям:

$$\varphi'_{\text{стм}} = \frac{4,03 \cdot 10 \cdot 88}{23,98} = 140,84, \text{ Г} \cdot \text{м}^{-3}.$$

Висновок: найбільш пожежонебезпечною концентрацією діоксану в суміші з повітрям є 4,03% або

140,8 г·м⁻³.

1.3.2. Розрахунок матеріального балансу процесу горіння

Розрахунок матеріального балансу процесу горіння полягає у визначенні об'єму повітря, необхідного для повного згоряння горючої речовини, і об'єму продуктів горіння, які утворюються при цьому.

Розрізняють *питому, повну, теоретичну, дійсну* кількість повітря, яка витрачається на згоряння горючої речовини.

Питома кількість повітря - кількість повітря, необхідна для згоряння одиниці кількості горючої речовини (1 моль, 1 м³, 1 кг).

Повна кількість повітря - кількість повітря, необхідна для згоряння певної кількості горючої речовини.

Теоретична кількість повітря - мінімальна кількість повітря, необхідна для повного згоряння горючої речовини.

Дійсна кількість повітря - кількість повітря, яка надходить на згоряння горючої речовини за даних умов.

Мінімальний об'єм повітря, необхідний для повного згоряння одиниці кількості горючої речовини (1 моль, 1 м³, 1 кг), називається *питомим теоретичним об'ємом повітря* – $v_{\text{т}}^{\circ}$. В дійсності об'єм повітря, що надходить в зону горіння, відрізняється від теоретичного об'єму. Такий об'єм повітря, що припадає на одиницю кількості горючої речовини, називається *питомим дійсним об'ємом* – $v_{\text{п}}$. Різниця між кількістю повітря, що надходить на горіння, і теоретично необхідною називається надлишком повітря. Для характеристики ступеня забезпеченості повітрям процесу горіння використовують поняття *коефіцієнта надлишку повітря* (α), який показує, у скільки разів кількість повітря, що дійсно надходить до зони горіння, відрізняється від теоретично необхідної кількості повітря для повного

згоряння горючої речовини:

$$\alpha = \frac{v_{\text{п}}}{v_{\text{п}}^0}, \quad (5)$$

де $v_{\text{п}}^0$ – питомий теоретичний об'єм повітря, необхідний для повного згоряння горючої речовини, $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$;

$v_{\text{п}}$ - питомий дійсний об'єм повітря, що надходить до зони реакції і при згорянні горючої речовини, $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$.

Отже, дійсний питомий об'єм повітря дорівнює: $v_{\text{п}} = v_{\text{п}}^0 \cdot \alpha$. Частина повітря, що не витрачається на горіння, - *надлишок повітря*, переходить у продукти горіння:

$$\Delta v_{\text{п}} = v_{\text{п}} - v_{\text{п}}^0 = v_{\text{п}}^0 (\alpha - 1). \quad (6)$$

Продукти горіння – це газоподібні, тверді та рідкі речовини, що утворюються при взаємодії окислювача 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 знаходились у вихідній суміші, і частина горючої речовини або окислювача, яка не брала участі в реакції. В цілому продукти згоряння утворюють систему, що зветься димом.

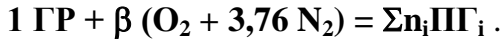
Димом називається дисперсна система, що складається з твердих і рідких часток (дисперсної фази), завислих у газовому дисперсійному середовищі.

Розрахунок матеріального балансу процесу горіння залежить від складу та агрегатного стану горючої речовини.

Теоретичне число молів повітря та продуктів горіння при згорянні одного моля горючої речовини

індивідуального складу можна визначити з рівняння реакції горіння.

Для індивідуальних речовин рівняння реакції горіння має вигляд:



Питоме теоретичне число молів повітря, що необхідно для повного згорання 1 моля речовини, можна визначити як:

$$n_{\text{п}}^0 = (1 + 3,76)\beta = 4,76\beta, \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (7)$$

Питоме теоретичне число молів продуктів горіння дорівнює сумі молів всіх продуктів горіння у рівнянні реакції горіння:

$$n_{\text{пг}}^0 = \sum n_{\text{пг}i}, \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (8)$$

При горінні речовини з надлишком повітря визначають питоме дійсне число молів повітря та продуктів горіння:

$$n_{\text{п}} = n_{\text{п}}^0 \cdot \alpha, \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (9)$$

$$n_{\text{пг}} = n_{\text{пг}}^0 + (\alpha - 1)n_{\text{п}}^0, \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (10)$$

Відсотковий склад продуктів горіння можна визначити за формулою:

$$\% \text{ ПГ}_i = 100 \frac{n_{\text{пг}i}}{n_{\text{пг}}}, \%. \quad (11)$$

В разі, коли горіння протікає з надлишком повітря, в продуктах горіння буде наявний кисень, а при розрахунку вмісту азоту необхідно врахувати азот, який перейшов з

надлишком повітря:

$$\%O_2 = 100 \frac{(\alpha - 1) \cdot \beta}{n_{\text{пг}}}, \quad \% ; \quad (12)$$

$$\%N_2 = 100 \frac{\alpha \cdot 3,76 \beta}{n_{\text{пг}}}, \quad \% . \quad (13)$$

Однак, на практиці кількість речовини вимірюють не в молях, а в м³, якщо це газ, або в кг, якщо речовина знаходиться в конденсованому стані (рідина чи твердий матеріал). Отже в попередні формули потрібно буде підставити не число молів, а об'єм, який займає моль газу, або масу, еквівалентну молю речовини. В такому випадку вид формули для розрахунку кількості повітря та продуктів горіння буде залежати від агрегатного стану горючої речовини.

Треба пам'ятати, що 1 кіломоль газу за заданих температури Т (К) та тиску Р (кПа) займає об'єм V_μ (м³), який можна розрахувати за формулою:

$$V_{\mu} = 22,4 \frac{101,3T}{273P}, \quad \text{м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}. \quad (14)$$

Якщо горить газ, то на 1 кмоль (V_μ^{ГР} м³) горючої речовини витрачається теоретичний об'єм (n_п⁰ · V_μ^п) м³ або дійсний об'єм (n_п · V_μ^п) м³ повітря.

1 кмоль ГР	—	n_п⁰ = 4,76 · β , кіломолів повітря
V_μ^{ГР} м³ ГР	—	n_п⁰ · V_μ^п = 4,76 · β · V_μ^п , м ³ повітря
1 м³ ГР	—	v_п⁰ , м ³ повітря

З цієї пропорції можна визначити питомий теоретичний об'єм повітря, необхідний для згорання одного метра кубічного горючого газу:

$$v_{\text{пов}}^0 = \frac{4,76 \cdot \beta \cdot V_{\mu}^{\text{пов}}}{V_{\mu}^{\text{ГР}}}, \text{ м}^3. \quad (15)$$

Якщо горюча речовина знаходиться за тих же умов, що і повітря, то $V_{\mu}^{\text{ГР}} = V_{\mu}^{\text{п}}$, тоді на згоряння 1 м³ ГР буде витрачатися:

питомий теоретичний об'єм повітря: $v_{\text{п}}^0 = 4,76 \cdot \beta, \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}; \quad (16)$

питомий дійсний об'єм повітря: $v_{\text{п}} = 4,76 \cdot \beta \cdot \alpha, \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}. \quad (17)$

Так само можна отримати і *об'єми продуктів горіння*, що утворюються при згорянні горючої речовини в газоподібному стані. Якщо продукти згоряння знаходяться за однакових температур і тиску, то:

питомий теоретичний об'єм ПГ: $v_{\text{пг}}^0 = \sum n_{\text{пг}i}, \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}; \quad (18)$

питомий дійсний об'єм ПГ: $v_{\text{пг}} = v_{\text{пг}}^0 + (\alpha - 1)4,76 \cdot \beta, \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}. \quad (19)$

При горінні заданої кількості газу можна визначити повні об'єми повітря та продуктів горіння:

$$V_{\text{п}} = v_{\text{п}} V_{\text{г.г}}, \text{ м}^3,$$

$$V_{\text{пг}} = v_{\text{пг}} V_{\text{г.г}}, \text{ м}^3,$$

де $V_{\text{г.г}}$ – заданий об'єм горючого газу, м³.

Проте під час горіння продукти горіння мають високу температуру (температуру горіння), тому відбувається їх температурне розширення. Об'єм продуктів горіння за даних умов можна визначити з універсального газового закону:

$$V_{\text{ПГ}}^{\text{Гор}} = \frac{V_{\text{ПГ}}^{\text{То}} T_{\text{Гор}} P_0}{T_0 P_{\text{ПГ}}}, \text{ м}^3. \quad (20)$$

де T_0, P_0 - початкові температура, К та тиск, кПа;

$T_{\text{Гор}}, P_{\text{ПГ}}$ - температура, К, та тиск продуктів горіння, кПа;

$V_{\text{ПГ}}^{\text{То}}$ - об'єм продуктів горіння за температури T_0 , м^3 .

Для горючих речовин у рідкому або твердому агрегатному стані необхідно враховувати, що 1 кмоль важить μ кг (μ – молярна маса горючої речовини, $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$). Тоді питомі об'єми (на 1 кг горючої речовини) повітря та продуктів горіння визначаються:

питомий теор. об'єм повітря: $v_{\text{п}}^0 = \frac{V_{\mu}^{\text{п}}}{\mu} 4,76\beta, \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}; \quad (21)$

питомий дійсний об'єм повітря: $v_{\text{п}} = \alpha \frac{V_{\mu}^{\text{п}}}{\mu} 4,76\beta, \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}; \quad (22)$

питомий теор. об'єм ПГ: $v_{\text{ПГ}}^0 = \frac{V_{\mu}^{\text{ПГ}}}{\mu} \sum n_{\text{ПГ}i}, \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}; \quad (23)$

питомий дійсний об'єм ПГ: $v_{\text{ПГ}} = v_{\text{ПГ}}^0 + \frac{V_{\mu}^{\text{ПГ}}}{\mu} (\alpha - 1) \cdot 4,76\beta, \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}. \quad (24)$

При горінні будь-якої кількості горючої речовини:

повний теоретичний об'єм повітря: $V_{\text{п}}^0 = v_{\text{п}}^0 m_{\text{г.р}}, \text{ м}^3;$

повний дійсний об'єм повітря: $V_{\text{п}} = v_{\text{п}} m_{\text{г.р}}, \text{ м}^3;$

повний теоретичний об'єм ПГ: $V_{\text{ПГ}}^0 = v_{\text{ПГ}}^0 m_{\text{г.р}}, \text{ м}^3;$

повний дійсний об'єм ПГ: $V_{\text{ПГ}} = v_{\text{ПГ}} m_{\text{г.р}}, \text{ м}^3,$

де $m_{\text{г.р.}}$ - маса горючої речовини, кг.

Будову складних речовин не можна виразити хімічною формулою – деревина, торф, сланці, нафта, нафтопродукти

тощо. При розрахунку матеріального балансу їх склад виражають масовими частками або відсотковим вмістом хімічних елементів та складають рівняння згоряння окремих елементів.

Якщо до складу горючої речовини входять тільки карбон, гідроген, кисень та сульфур, питомий теоретичний об'єм повітря знаходять за формулою:

$$v_{\text{пов}}^{\circ} = 0,29 \left(\frac{\varphi_{\text{C}}}{3} + \varphi_{\text{H}} - \frac{\varphi_{\text{O}} - \varphi_{\text{S}}}{8} \right), \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}. \quad (25)$$

Розрахунок об'єму продуктів згоряння складної речовини проводять послідовним визначенням об'ємів продуктів згоряння кожного з хімічних елементів, що входять до її складу, з врахуванням вмісту даного хімічного елементу:

$$v_{\text{пр}}^{\circ} = \sum_{i=1}^n v_{\text{пр}_i}^{\circ} g_i, \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}, \quad (26)$$

де $g_i = \frac{\varphi_i}{100}$ - масова частка і-го хімічного елементу у складі речовини;

$v_{\text{пр}_i}^{\circ}$ - питомий теоретичний об'єм продуктів горіння, що утворюються при згорянні і-го горючого елементу у складі матеріалу.

Для спрощення розрахунків матеріального балансу складних матеріалів у таблиці 1.5 наведені розраховані значення питомих об'ємів продуктів згоряння для окремих хімічних елементів.

Таблиця 1.5 - Питомий об'єм продуктів горіння деяких елементів

Хімічні елементи горючого матеріалу	Об'єм продуктів згорання, $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$				
	CO_2	H_2O	N_2	SO_2	P_2O_5
карбон С	1,87		7,0		
гідроген Н		11,2	21,1		
сульфур S			2,63	0,7	
фосфор Р			3,4		0,36
нітроген N			0,8		
кисень О			-2,63		
волога W		1,24			

Методика розрахунку матеріального балансу процесу горіння речовини індивідуального хімічного складу

1. Складаємо рівняння реакції горіння.
2. Визначаємо питоме теоретичне число молів повітря та продуктів горіння за формулами (7) і (8), для складних речовин – (25) і (26).
3. Визначаємо питоме дійсне число молів повітря та продуктів горіння з урахуванням надлишку повітря за формулами (9) і (10).
4. Визначаємо склад продуктів горіння - формули (11) - (13).
5. Розраховуємо молярну масу горючої речовини μ та молярний об'єм газу за даних умов V_μ за формулою (14).
6. Визначаємо теоретичні об'єми повітря та продуктів горіння за формулами (21) і (23).
7. Визначаємо дійсні об'єми повітря та продуктів горіння за даних умов за формулами (22) і (24).

Методика визначення об'єму продуктів горіння речовин

1. Розрахувати питомий теоретичний об'єм повітря, необхідний для повного згорання матеріалу даного

елементного складу, за формулою (25).

2. Розрахувати питомий дійсний об'єм повітря з урахуванням коефіцієнта надлишку повітря за формулою (22).

3. Для полегшення подальших розрахунків скласти таблицю для визначення питомих об'ємів продуктів горіння, виходячи з елементного складу горючого матеріалу з використанням коефіцієнтів таблиці 1.5.

4. Розрахувати питомий теоретичний об'єм продуктів горіння даного матеріалу даного за формулою (26).

5. Розрахувати дійсний об'єм продуктів горіння з урахуванням коефіцієнта надлишку повітря за формулою (24).

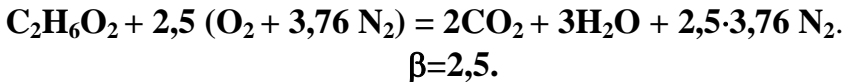
6. Розрахувати об'єм продуктів горіння за даних умов за формулою (20).

Приклад розв'язання задачі

Провести розрахунок матеріального балансу процесу горіння етиленгліколю ($C_2H_6O_2$), якщо горіння проходило за температури навколишнього середовища $10^\circ C$, тиску повітря $100,0$ кПа, з коефіцієнтом надлишку повітря $\alpha = 1,8$.

Розв'язання

1. Складаємо рівняння реакції горіння:



2. Визначаємо питомих теоретичне число молів повітря та продуктів горіння:

$$n_{\text{т}}^0 = 4,76 \cdot 2,5 = 11,9 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1};$$
$$n_{\text{пр}}^0 = 2 + 3 + 2,5 \cdot 3,76 = 14,4 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. Визначаємо питомих дійсне число молів повітря та продуктів горіння з урахуванням надлишку повітря:

$$n_{\text{т}} = 11,9 \cdot 1,8 = 21,4 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1};$$
$$n_{\text{пр}} = 14,4 + (1,8 - 1) 11,9 = 23,9 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

4. Визначаємо склад продуктів горіння:

4.1. вміст CO_2 : $\%CO_2 = \frac{2 \cdot 100}{23,9} = 8,4 \%$.

4.2. вміст H_2O : $\%H_2O = \frac{3 \cdot 100}{23,9} = 12,5 \%$.

4.3. вміст O_2 : $\%O_2 = \frac{(1,8 - 1) \cdot 2,5 \cdot 100}{23,9} = 8,3 \%$.

$$4.4. \text{ вміст } N_2: \quad \%N_2 = \frac{1,8 \cdot 2,5 \cdot 3,76 \cdot 100}{23,9} = 70,8 \text{ \%}.$$

5. Розраховуємо молярну масу горючої речовини μ та молярний об'єм газу за даних умов V_μ :

$$\mu = 2 \cdot 12 + 6 \cdot 1 + 2 \cdot 16 = 62 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1};$$

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

6. Визначаємо питомий теоретичний об'єм повітря $v_{\text{п}}^0$ та питомий теоретичний об'єм продуктів горіння $v_{\text{пр}}^0$:

$$v_{\text{п}}^0 = \frac{4,76 \cdot 2,5 \cdot 23,53}{62} = 4,52 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

$$v_{\text{пр}}^0 = \frac{(2 + 3 + 2,5 \cdot 3,76) \cdot 23,53}{62} = 5,47 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

7. Визначаємо питомі дійсний об'єм повітря $v_{\text{п}}$ і продуктів горіння $v_{\text{пр}}$ за даних умов:

$$v_{\text{п}} = 4,52 \cdot 1,8 = 8,14 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1};$$

$$v_{\text{пр}} = 5,47 + (1,8 - 1) \cdot 4,52 = 9,09 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

Висновок: для повного згорання одного кілограма етиленгліколю теоретично потрібно $v_{\text{п}}^0 = 4,52 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$ повітря, об'єм продуктів горіння становитиме $v_{\text{пр}}^0 = 5,47 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$. При згорянні за даних умов буде використано $v_{\text{п}} = 8,14 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$ повітря, утвориться $v_{\text{пр}} = 9,09 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$ продуктів горіння. Вміст у продуктах горіння CO_2 – 8,4 %, H_2O – 12,5 %, O_2 – 8,3 %, N_2 – 70,8 %.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати питомі та повні об'єми повітря та продуктів горіння, вміст пари води в продуктах горіння при згорянні 5 кг торфу складу: С – 57,9 мас.%; Н – 5,3 мас.%; О – 29,7 мас. %; S – 1,1 мас. %, волога W = 6 мас. %. Горіння відбувалося за умов $t = 15\text{ }^\circ\text{C}$, $P = 98,6\text{ кПа}$, $\alpha = 1,5$. Температура продуктів горіння – $950\text{ }^\circ\text{C}$.

Розв'язання

1. Розраховуємо питомий теоретичний об'єм повітря, необхідний для повного згорання торфу за формулою (25):

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

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:

$$V_{\text{пов}} = 8,4 \cdot 5 = 42,0 \text{ м}^3.$$

4. Визначаємо питомий теоретичний об'єм продуктів горіння за масовими частками вмісту елементів у матеріалі.

Елементи горючої речовини	Масова частка елемента	Об'єм продуктів згорання, $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$			
		CO_2	H_2O	SO_2	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			$0,011 \cdot 0,7$	$0,011 \cdot 2,63$
оксиген 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:

$$v_{\text{пр}}^0 = 1,08 + 0,67 + 7,7 \cdot 10^{-3} + 4,42 = 6,17 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

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

$$v_{\text{пр}} = 6,17 + (1,5 - 1) \cdot 5,6 = 8,97 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1},$$

$$V_{\text{пр}} = 8,97 \cdot 5 = 44,85 \text{ м}^3.$$

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

$$V_{\text{пр}}^{\text{Гор}} = \frac{44,85 \cdot 101,3 \cdot (950 + 273)}{273 \cdot 101,3} = 200,9 \text{ м}^3.$$

8. Розраховуємо вміст пари води у продуктах горіння, використовуючи питомий об'єм продуктів згорання за формулою (20):

$$\varphi_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,67 \cdot 100}{8,97} = 7,5 \text{ \%}.$$

Висновок: при згоранні 5 кг торфу витрачається 42,0 м³ повітря та виділиться 200,9 м³ продуктів горіння за температури 950 °С, вміст води у продуктах горіння дорівнює 7,5 %.

Індивідуальне завдання

(за номером у журналі за списком групи)

Розрахувати матеріальний баланс горіння складної речовини, якщо горіння протікало за відомого коефіцієнту надлишку повітря.

№	Речовина	Склад речовини, % мас.						α
		C	H	O	S (N)	W	Зола A	
1.	Нафта	84,8	14,5	0,5	0,1	0,1	-	1,8
2.	-// -	85,6	13,8	0,4	0,1	0,1	-	1,7
3.	Гас	85,2	14,5	0,3	-	-	-	1,6
4.	Бензин	82,3	6,2	0,4	1,2	-	-	1,5
5.	Дизельне паливо	86,5	12,8	0,3	(0,4)	-	-	1,4
6.	Мазут	83,0	11	1,0	(4)	1,0	-	1,3
7.	Деревина	45,5	6,1	41	(2)	4,0	0,4	1,5
8.	-// -	42,4	5,6	45	(4)	6,9	0,1	1,3
9.	-// -	43,1	7,5	40	-	7,0	-	1,2
10.	-// -	46,0	6,0	43	-	5	-	1
11.	Торф	46,5	4,0	40	(4)	4,5	1,0	1,6
12.	-// -	54,0	4,9	36	1,3	7,0	3,0	1,2
13.	-// -	56,0	5,3	36	0,1	0,6	2,0	1,3
14.	-// -	57,0	5,7	34	0,9	1,1	1,3	1,7
15.	Вугілля	78,0	5,8	10	2,8	0,8	1,4	1,4
16.	-// -	80,0	5,1	10,0	3,2	0,6	1,1	1,8
17.	-// -	77,1	5,8	10,8	3,2	1,1	2,0	1,5
18.	-// -	83,3	5,3	9,5	0,7	1,2	-	1,4
19.	-// -	86,1	5,0	6,8	0,6	1,5	-	1,3
20.	Кокс	90,4	4,3	2,2	1,5	1,6	-	1,2
21.	-// -	90,8	4,2	2,0	1,6	1,4	-	1,1
22.	Кокс	97,7	0,64	-	0,96	0,7	-	2,0
23.	-// -	98	0,45	-	0,95	0,6	-	1,9
24.	-// -	86,4	12,0	1,0	0,2	0,4	-	1,6
25.	-// -	85,3	13,0	1,1	0,2	0,4	-	1,5
26.	-// -	84,9	14,0	0,8	0,3	0,4	-	1,4
27.	Целюлоза	44,4	6,2	49,4	-	-	-	1,3
28.	-// -	45,3	5,8	49,8	-	-	-	1,2
29.	-// -	44,8	6,0	49,2	-	-	-	1,1
30.	Картон	50,0	20,0	15,0	-	5,0	10	1,8
31.	Бавовна	45,0	25,0	15,0	(6)	9,0	-	1,7
32.	Каучук	85,4	13,4	1,2	-	-	-	1,5
33.	-// -	78,5	15,3	0,9	5,3			
34.	-// -	80,0	16,0	1,0	2,0			1,0
35.	-// -	81,3	16,7	1,1	0,9			

1.4 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ

1.4.1 Розрахунок теплоти згорання горючих речовин

Хімічні реакції можуть проходити з поглинанням або виділенням енергії. Реакції, що протікають при поглинанні енергії, називаються ендотермічними.

Реакції горіння є екзотермічними, а тепловий ефект, що супроводжує реакції горіння, називають теплотою згорання.

Теплотою згорання називається кількість тепла, що виділяється при згоранні одиниці кількості речовини з утворенням продуктів повного згорання.

Залежно від способу вираження кількості речовини, розрізняють *молярну* (Q , кДж·моль⁻¹), *масову* (Q' , кДж·кг⁻¹) та *об'ємну* (Q'' , кДж·м⁻³) теплоту згорання речовини.

Розрізняють вищу та нижчу теплоту згорання речовини. *Вища теплота згорання* Q_v визначається за умов, що вода в продуктах згорання знаходиться в рідкому стані (з урахуванням теплоти конденсації).

Нижча теплота згорання Q_n визначається за умов, що вода у продуктах горіння знаходиться у вигляді пари.

Молярну теплоту згорання розраховують згідно із законом Гесса. Тепловий ефект реакції визначається як різниця між теплотою утворення кінцевих продуктів горіння та теплотою утворення вихідних компонентів системи. Враховуючи, що теплота утворення простих речовин (азоту та кисню) дорівнює нулю, математичний вираз закону Гесса для реакції горіння можна записати в наступному вигляді:

$$\Delta H_{\text{гор}}^{\circ} = \sum_{i=1}^g \Delta H_{\text{фПГ}i}^{\circ} n_{\text{ПГ}i} - \Delta H_{\text{фГР}}^{\circ}, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1},$$

де $\Delta H_{\text{гор}}^{\circ}$ - стандартна теплота реакції згорання, кДж·моль⁻¹;

$\Delta H_{f, ГР}^{\circ}$ - стандартна теплота утворення горючої речовини в газоподібному стані, кДж·моль⁻¹;

$\Delta H_{f, ПГі}^{\circ}$ - стандартна теплота утворення і-го компоненту продуктів горіння, кДж·моль⁻¹;

n_i - число молів і-го продукту горіння в рівнянні реакції горіння.

Реакції горіння ідуть з виділенням тепла, тому знак "-" опускається, і формула визначення молярної теплоти згоряння має вид:

$$Q_{гор} = |\Delta H_{гор}^{\circ}|, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1},$$
$$Q_{гор} = \left| \sum_{i=1}^g \Delta H_{fПГі}^{\circ} \cdot n_{ПГі} - \Delta H_{fГР}^{\circ} \right|, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (27)$$

Для перерахування молярної теплоти згоряння $Q_{гор}$ у масову $Q_{гор}'$ можна використати формулу:

$$Q_{гор}' = \frac{Q_{гор} \cdot 1000}{\mu}, \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}, \quad (28)$$

де μ – молярна маса речовини, кг·кмоль⁻¹.

Для речовин у газоподібному стані для перерахунку молярної теплоти згоряння $Q_{гор}$ у об'ємну $Q_{гор}''$ використовують формулу:

$$Q_{гор}'' = \frac{Q_{гор} \cdot 1000}{V_{\mu}}, \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}. \quad (29)$$

Теплоти утворення горючих речовини та деяких речовин, що можуть бути наявні в продуктах горіння, наведені у таблицях № 3 та 11 додатків.

Для складних речовин можна визначити молярні теплоти згоряння окремих хімічних елементів за законом

Гесса (28) та перерахувати за формулою (29) у масові теплоти згоряння. Тоді з урахуванням відсоткового вмісту у речовині окремих елементів можна скласти загальну формулу. Таким чином, розрахунок масової нижчої теплоти згоряння складних речовин проводять за формулою Менделєєва, яка враховує ще й відмінність вищої теплоти згоряння $Q'_в$ від нижчої на значення теплоти конденсації $Q'_{\text{конд}}$ пари води у складі продуктів горіння $Q'_н = Q'_в - Q'_{\text{конд}}$:

$$Q'_н = 339,4C + 1257H + 108,9(S - O - N) - 25,1(9H + W), \text{ кДж/кг}; \quad (30)$$

де C, H, O, N, S, W - процентний вміст карбону, гідрогену, кисню, нітрогену, сульфору і вологи у речовині.

Приклад розв'язання задачі

Визначити вищу та нижчу молярну, масову та об'ємну теплоту згоряння етилформиату $C_3H_6O_2$, якщо стандартна теплота його утворення становить $\Delta H^0_f = -371,2 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$.

Розв'язання

1. Складаємо рівняння реакції горіння етил формиату:



2. За законом Гесса визначаємо молярну вищу на нижчу теплоту згоряння етилформиату, формула (27). Значення теплоти утворення продуктів горіння (діоксиду карбону та води в стані «рідина» та «пар») приймаємо за таблицею 3 додатків:

$$Q'_{в1} = |3 \cdot (-393,8) + 3 \cdot (-285,8) - (-371,2)| = 1667,7 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$$

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

1.

3. Визначаємо молярну масу етилформіату:

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

4. Перераховуємо молярну теплоту згоряння в масову за формулою (28):

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

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

5. Перераховуємо молярну теплоту згоряння в об'ємну за формулою (29):

$$V_\mu = 22,4 \frac{101,3\text{T}}{273\text{P}} = 22,4 \frac{101,3 \cdot 298}{273 \cdot 101,3} = 24,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1};$$

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

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

Висновок: етилформіат має такі теплоти згоряння: молярну $Q_B = 1667,7 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$, $Q_H = 1535,7 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$, масову $Q'_B = 22536,3 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$, $Q'_H = 20752,6 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$, об'ємну $Q''_B = 67486,8 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}$, $Q''_H = 63987,1 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}$.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати, яка кількість тепла виділиться при згорянні 5 кг торфу складу: С – 57,9 мас. %; Н – 5,3 мас. %; О – 29,7 мас. %; S – 1,1 мас. %, вологи $W = 6 \text{ мас. \%}$.

Розв'язання

1. Визначаємо масову теплоту згоряння торфу за формулою Менделєєва (30):

$$Q'_n = 339,4 \cdot 57,9 + 1257 \cdot 5,3 + 108,9(1,1 - 29,7) - 25,1(9 \cdot 5,3 + 6) \\ = \\ = 21851 \text{ кДж/кг.}$$

2. Визначаємо кількість тепла, що виділиться при згорянні 5 кг торфу:

$$Q = 21851 \cdot 5 = 109255 \text{ кДж.}$$

Висновок: при згорянні 5 кг торфу даного складу виділиться 109255 кДж тепла.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати нижчу масову теплоту згоряння етилового спирту C_2H_6O за формулою Менделєєва.

Розв'язання

1. Визначаємо масовий вміст хімічних елементів у молекулі етанолу:

$$\mu = 2 \cdot 12 + 6 \cdot 1 + 1 \cdot 16 = 46 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}; \\ \%O = \frac{1 \cdot 16 \cdot 100}{46} = 34,8 \% ; \\ \%C = \frac{2 \cdot 12 \cdot 100}{46} = 52,2 \% ; \\ \%H = \frac{6 \cdot 1 \cdot 100}{46} = 13,0 \% .$$

2. Визначаємо нижчу масову теплоту згоряння етанолу за формулою Менделєєва (30):

$$Q'_n = 339,4 \cdot 52,2 + 1257 \cdot 13 + 108,9(0 - 34,8) - 25,1 \cdot 9 \cdot 13 = 27231,7 \text{ кДж/кг.}$$

Висновок: при згорянні 1 кг етанолу за умови гарячого стану продуктів горіння та пароподібного стану води виділяється нижча теплота згоряння у кількості 27231,7 кДж.

1.4.2 Розрахунок температури горіння індивідуальної речовини

Енергія, що виділяється у зоні горіння, витрачається на попередній нагрів горючої речовини, на нагрівання продуктів горіння та на теплові втрати із зони горіння в навколишнє середовище за рахунок теплового випромінювання.

Температура, до якої нагріваються продукти горіння, називається температурою горіння.

На розігрів продуктів горіння витрачається тепло $Q_{\text{пр}}$, яке можна представити як:

$$Q_{\text{пр}} = v_{\text{пр}} C_p (T_{\text{гор}} - T_0), \text{ кДж} \cdot \text{м}^3, \quad (31)$$

де $v_{\text{пр}}$ - об'єм продуктів горіння, м^3 ;

C_p - середньооб'ємна теплоємність продуктів горіння, $\text{кДжкг}^{-1}\text{K}^{-1}$;

T_0 - початкова температура системи, К;

$T_{\text{гор}}$ - температура горіння, К.

В загальному вигляді температуру горіння можна визначити як:

$$T_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{пр}}}{C_p v_{\text{пр}}} + T_0, \text{ К}. \quad (32)$$

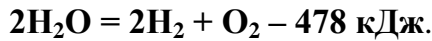
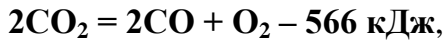
Залежно від умов, в яких протікає процес горіння, розрізняють калориметричну, теоретичну, адіабатичну і дійсну температури горіння.

Під *калориметричною температурою горіння*

розуміють температуру, до якої нагріваються продукти горіння, якщо додержано наступних умов:

- 1) все тепло, що виділилося у процесі реакції, іде на нагрівання продуктів горіння ($Q_{пр} = Q_n$);
- 2) відбувається повне згоряння горючої суміші стехіометричного складу ($\alpha=1$);
- 3) в процесі утворення продуктів горіння не відбувається їх термічної дисоціації;
- 4) горюча суміш знаходиться за початкової температури 273 К і тиску 101,3 кПа.

Якщо температура горіння достатньо висока, то продукти горіння, що утворюються в процесі реакції, можуть розкладатися на елементи, з яких вони утворені. Наприклад:



Дисоціацію продуктів горіння слід враховувати за температур, вищих за 1700°C. Якщо тепловтрата в навколишнє середовище немає та з урахуванням частки тепла, яка витрачається на процес розкладання продуктів горіння, то ступінь нагріву продуктів горіння буде представляти собою *теоретичну температуру горіння*.

Теоретична температура горіння відрізняється від калориметричної тим, що у розрахунках враховують тепловтрати на дисоціацію продуктів горіння.

При визначенні *адіабатичної температури горіння* необхідно враховувати склад горючої суміші, тобто горіння може проходити з надлишком або нестачею повітря. Але тепловтрата в навколишнє середовище немає, отже на нагрівання продуктів горіння (з урахуванням надлишку повітря) витрачається вся теплота згоряння.

Початкові умови є нормальними (273 К, 101,3 кПа).

Дійсна температура горіння - це температура, до якої нагріваються продукти горіння в реальних умовах; при цьому враховується, що горіння може проходити з надлишком або нестачею повітря, тобто із неповним згоранням горючої речовини, значними тепловтратами у навколишнє середовище, а початкові умови, в яких знаходиться горюча суміш, можуть відрізнятись від нормальних.

Дійсна температура горіння завжди нижча за адіабатичну, але вона завжди визначається калориметричною температурою горіння.

Експериментально визначити температуру горіння більшості речовин досить складно, що обумовлено необхідністю проведення досліду за підвищених температур; до того ж треба вимірювати температуру газу, який знаходиться у стані хімічного перетворення. Однак, теорія дозволяє із достатньою точністю розрахувати адіабатичну температуру горіння, виходячи із закону 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.

Методика визначення адіабатичної температури горіння з використанням ентальпії продуктів горіння

1. Скласти рівняння реакції горіння.
2. Визначити питоме дійсне число молів продуктів горіння $n_{\text{ДГ}}$ з урахуванням надлишку повітря за формулою (10).
3. Визначити нижчу теплоту згорання речовини $Q_{\text{н}}$, кДж·моль⁻¹ за законом Гесса за формулою (27) або за

довідниковими даними.

4. Визначити середню ентальпію продуктів згорання $\Delta H_{\text{сер}}$:

$$\Delta H_{\text{сер}} = \frac{Q_{\text{н}}}{n_{\text{ПГ}}}, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (33)$$

5. Орієнтуючись на ентальпію азоту, визначити температуру горіння у першому наближенні T_1 (таблиця № 1 додатків).

6. Визначити ентальпію продуктів горіння $Q_{\text{пг}}^{T_1}$ за температури горіння T_1 з використанням даних ентальпії продуктів горіння за різних температур:

$$Q_{\text{пг}}^{T_1} = \Sigma(\Delta H_{\text{ПГі}}^{T_1} n_{\text{ПГі}}), \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (34)$$

7. Визначити температуру горіння в другому наближенні T_2 , виходячи з того, що: $T_2 > T_1$, якщо $Q_{\text{пг}}^{T_1} < Q_{\text{н}}$,

або $T_2 < T_1$, якщо $Q_{\text{пг}}^{T_1} > Q_{\text{н}}$.

8. Визначити ентальпію продуктів горіння $Q_{\text{пг}}^{T_2}$ за температури T_2 :

$$Q_{\text{пг}}^{T_2} = \Sigma(\Delta H_{\text{ПГі}}^{T_2} n_{\text{ПГі}}), \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (35)$$

9. Визначити температуру горіння методом лінійної інтерполяції:

$$T_{\text{ад}} = T_1 + \frac{(T_2 - T_1) \cdot (Q_{\text{н}} - Q_{\text{пг}}^{T_1})}{(Q_{\text{пг}}^{T_2} - Q_{\text{пг}}^{T_1})}, \text{ К}. \quad (36)$$

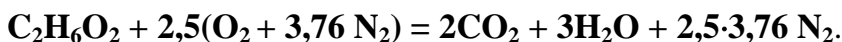
Приклад розв'язання задачі

Визначити адіабатичну температуру горіння етиленгліколю ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$, теплота утворення $\Delta H_f^\circ = -453,8$

кДж·моль⁻¹). Горіння проходило з надлишком повітря $\alpha = 1,8$.

Розв'язання

1. Складаємо рівняння реакції горіння:



2. Визначаємо питоме дійсне число молів продуктів горіння:

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

3. Визначаємо нижчу молярну теплоту згорання етиленгліколю за законом Гесса:

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

4. Визначаємо середню ентальпію продуктів згорання за формулою (33):

$$H_{\text{сер}} = \frac{1059,3}{23,9} = 44,32 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

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

6. Визначаємо ентальпію продуктів горіння за температури горіння T_1 за формулою (34):

$$\begin{aligned} Q_{\text{пр}}^{T_1} &= 2 \cdot 65,19 + 3 \cdot 53,77 + 2,5 \cdot 3,76 \cdot 43,61 + (1,8 - 1) \cdot 2,5 \cdot 4,76 \cdot 44,0 = \\ &= 858,7 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \end{aligned}$$

7. Визначаємо температуру горіння у другому наближенні. Виходячи з того, що ентальпія продуктів горіння за температури $T_1 = 1400 \text{ К}$ виявилася нижче

нижчої теплоти згоряння, приймаємо $T_2 = 1600$ К.

8. Визначаємо ентальпію продуктів горіння за температури горіння T_2 за формулою (35):

$$Q_{\text{пр}}^{T_2} = 2 \cdot 76,87 + 3 \cdot 62,97 + 2,5 \cdot 3,76 \cdot 50,58 + (1,8 - 1) \cdot 2,5 \cdot 4,76 \cdot 51,05 \\ = \\ = 1000,4 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

9. Визначаємо температуру горіння за формулою (36):

$$T_{\text{ад}} = 1400 + \frac{(1600 - 1400) (1059,3 - 858,704)}{1000,4 - 858,704} = 1683,3, \text{ К.}$$

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

1.4.3 Розрахунок максимального тиску вибуху

Кінетичне горіння газоповітряної або пароповітряної суміші протікає з такою швидкістю, що горюча суміш встигає згоріти ще до теплового розширення продуктів реакції. Процес горіння при вибуху протікає при постійного об'єму. Продукти горіння нагріваються у дві стадії: внаслідок хімічної реакції та адіабатичного стиснення.

Максимальний тиск вибуху визначається за формулою:

$$P_{\text{виб}} = \frac{P_0 n_{\text{пр}}^0 T_{\text{виб}}}{n^0_{\text{гс}} T_0}, \text{ кПа} \quad (37)$$

де $P_{\text{виб}}$ - максимальний тиск вибуху, кПа;

P_0 - початковий тиск горючої суміші, кПа;

$T_{\text{виб}}$ - максимальна температура вибуху горючої суміші, К;

T_0 - початкова температура вихідної суміші, К;

$n^0_{\text{пр}}$ - число молів продуктів горіння, моль · моль⁻¹;

$n_{\text{гс}}^{\circ}$ – число молів вихідної суміші, моль·моль⁻¹.

При розрахунку максимальної температури вибуху приймаються наступні припущення: горіння проходить за стехіометричного співвідношення горючої речовини та окислювача ($\alpha = 1$); відбувається адіабатичне горіння суміші за постійного об'єму; відбувається повне згоряння речовини без температурної дисоціації продуктів горіння.

Методика визначення температури та максимального тиску вибуху

1. Скласти рівняння реакції горіння.
2. Визначити теоретичне число молів продуктів горіння $n_{\text{пр}}$.
3. Визначити теоретичне число молів вихідної суміші $n_{\text{вих}}$.
4. Визначити нижчу теплоту згоряння речовини за законом Гесса, формула (27), або за довідником [11].
5. Визначити енергію вибуху суміші:

$$Q_{\text{внб}} = Q_{\text{н}} + RT_0 \Delta n \quad \text{кДж} \cdot \text{моль}^{-1}, \quad (38)$$

де R - універсальна газова стала, $R = 8,31 \cdot 10^{-3} \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$;

T_0 - початкова температура вихідної суміші, К;

Δn° - різниця між числом молів продуктів горіння та початкової суміші.

6. Визначити середню енергію продуктів вибуху:

$$Q_{\text{сер}} = \frac{Q_{\text{внб}}}{n_{\text{пр}}^{\circ}}, \quad \text{кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (39)$$

7. Орієнтуючись на внутрішню енергію азоту, визначити температуру вибуху T_1 у першому наближенні з використанням даних внутрішньої енергії продуктів горіння за постійного об'єму із таблиці № 2 додатків.

8. Визначити енергію продуктів вибуху $Q_{\text{пр}}$ за

температури T_1 :

$$Q_{\text{пг}}^{T_1} = \sum(Q_{\text{пг}i}^{T_1} n_{\text{пг}i}), \quad \text{кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (40)$$

9. Визначити температуру вибуху у другому наближенні, виходячи з того, що $T_2 < T_1$, якщо $Q_{\text{пг}}^{T_1} > Q_{\text{виб}}$ або $T_2 > T_1$, якщо $Q_{\text{пг}}^{T_1} < Q_{\text{виб}}$.

10. Визначити енергію продуктів вибуху $Q_{\text{пг}}$ за температури T_2 :

$$Q_{\text{пг}}^{T_2} = \sum(Q_{\text{пг}i}^{T_2} n_{\text{пг}i}), \quad \text{кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (41)$$

11. Визначити температуру вибуху методом лінійної інтерполяції за формулою (36).

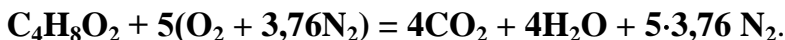
12. Визначити максимальний тиск вибуху за формулою (37).

Приклад розв'язання задачі

Визначити максимальний тиск при вибуху пари етилацетату $C_4H_8O_2$ (теплота утворення $\Delta H_f^0 = -442,9$ кДж·моль⁻¹), якщо початкова температура суміші 25°C, а тиск 110 кПа.

Розв'язання

1. Складаємо рівняння реакції горіння:



2. Визначаємо теоретичне число молів продуктів горіння:

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

3. Визначаємо теоретичне число молів вихідної суміші:

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

4. Визначаємо нижчу теплоту згоряння етилацетату:

$$Q_{\text{н}} = |4 \cdot (-393,78) + 4 \cdot (-241,84) - (-442,9)| = 2099,58 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

5. Визначаємо енергію вибуху горючої суміші:

$$\Delta n^0 = 26,8 - 24,8 = 2 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1};$$
$$Q_{\text{внб}} = 2099,58 + 2 \cdot 8,314 \cdot 10^{-3} \cdot 298 = 2104,45 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

6. Визначаємо середню ентальпію продуктів вибуху $Q_{\text{сер}}$:

$$Q_{\text{сер}} = \frac{2104,45}{26,8} = 78,52 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

7. Орієнтуючись на внутрішню енергію азоту, визначаємо температуру вибуху у першому наближенні $T_1 = 3000$ К.

8. Визначаємо внутрішню енергію продуктів вибуху за температури T_1 :

$$Q_{\text{пр}}^{T_1} = 137,72 \cdot 4 + 113,18 \cdot 4 + 76,92 \cdot 5 \cdot 3,76 = 2449,7 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

9. У другому наближенні $T_2 = 3000 - 400 = 2600$ К, так як $Q_{\text{пр}}^{T_1} > Q_{\text{виб}}$.

10. Визначаємо внутрішню енергію продуктів вибуху за температури T_2 :

$$Q_{\text{пр}}^{T_2} = 116,19 \cdot 4 + 93,95 \cdot 4 + 65,44 \cdot 5 \cdot 3,76 = 2070,8 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

11. Визначаємо температуру вибуху методом лінійної інтерполяції:

$$T_{\text{виб}} = 3000 + \frac{(2600 - 3000)(2104,45 - 2449,7)}{(2070,8 - 2449,7)} = 2635,5 \text{ К}.$$

12. Визначаємо максимальний тиск вибуху:

$$P_{\text{виб}} = \frac{110 \cdot 26,8 \cdot 2635,5}{24,8 \cdot 298} = 955,2 \text{ кПа}.$$

Висновок: при вибуху пари етилацетату температура горіння становитиме 2635,5 К, а тиск продуктів горіння 955,2 кПа.

РОЗДІЛ 2. ВИНИКНЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ

Виникнення горіння - це швидкий перехід від повільної реакції до миттєвої, вибухоподібної шляхом самоприскорення. Горіння виникає за наявності *горючої суміші* (горючої речовини та окисника у достатній концентрації) після дії теплового імпульсу достатньої потужності (іскра, гарячі стінки, адиабатичне стиснення або внутрішні екзотермічні процеси).

За тепловою теорією виникнення горіння за високих температур у горючій суміші швидкість руху молекул зростає, швидкість хімічної реакції зростає, виділяється тепло реакції і температура системи зростає. Виникає різниця температур і тепловіддача від горючої системи в навколишнє середовище за рахунок конвекції. Існує *температура самонагрівання* за якої інтенсивність тепловиділення і тепловіддачі вже рівні, тому виникає самонагрівання - підвищення температури за рахунок внутрішніх екзотермічних реакцій за наявності сприятливих умов для накопичення тепла. За таких умов реакція самоприскорюється і може початися горіння.

Якщо за даної температури зберігання твердої речовини є тепловиділення в системі та умови для накопичення тепла, то виникне самонагрівання твердої речовини, яке може призвести через значний час індукції до виникнення *самозаймання*.

Якщо повітряна горюча система контактує з гарячою стінкою та нагрівається до критичної температури, то виникає швидке самонагрівання цієї горючої системи та через час індукції відбувається *самоспалахування* усієї горючої повітряної системи водночас.

Якщо на горючу систему діє потужне джерело запалювання з температурою, яка значно більша за

температуру самонагрівання, то температура горючої системи зростає дуже інтенсивно і відбувається *вимушене запалювання*.

Таким чином існує три види виникнення горіння:

1. *Самоспалахування* – нагрівається вся горюча система і за критичної температури сама запалюється.

2. *Самозаймання* - тепло накопичується в частині твердої горючої системи за рахунок внутрішніх екзотермічних процесів, що викликає появу горіння.

3. *Вимушене запалювання* – горіння виникає в будь-якій точці горючої суміші внаслідок дії високотемпературного малого джерела запалювання і поширюється з певною швидкістю на всю систему.

Загальні риси видів виникнення горіння:

1. Необхідна температура більша за критичну.

2. Інтенсивність тепловиділення в системі повинна бути більшою ніж інтенсивність тепловтрат в навколишній простір.

3. Існує *період індукції* – затримка часу перед виникненням горіння, протягом якого відбуваються самонагрівання і підготовчі процеси: нагрів горючої суміші; розкладання або випаровування твердих і рідких горючих речовин; окиснення газоподібних продуктів з виділенням тепла; самонагрівання горючої системи від початкової температури до температури горіння; виникнення горіння.

2.1 РОЗРАХУНОК КОНЦЕНТРАЦІЙНИХ МЕЖ ПОШИРЕННЯ ПОЛУМ'Я

Найважливішим принципом вирішення задачі забезпечення безпеки від вибухів, є виключення можливості утворення горючих систем за рахунок регулювання складу газоповітряної суміші. У багатьох технологічних процесах обертаються горючі речовини та матеріали, які за певних

умов можуть утворювати суміші із окислювачем. Концентрація горючого компонента в цих сумішах може бути в межах від частки відсотка до 100%. Однак не всі з цих концентрацій становлять небезпеку щодо виникнення горіння. Горючим є середовище, яке здатне самостійно горіти після усунення джерела запалювання.

Виникнення та поширення горіння в сумішах горючої речовини й окислювача можливе лише в обмеженому діапазоні їх концентрацій. При спробі підпалити суміші, склад яких виходить за ці межі, стійке горіння не відбувається. Полум'я або не виникає, або затухає на деякій відстані від місця запалювання. Отже можна визначити як мінімальну, так і максимальну концентрацію горючої речовини, за яких умови виникнення та поширення полум'я є критичними. Тому, залежно від співвідношення, для сумішей, які містять горючу речовину і окислювач, розрізняють нижню і верхню концентраційну межу поширення полум'я.

Нижня КМПП (φ_n) – найменша концентрація горючої речовини в суміші з повітрям, за якої вже можливе виникнення та поширення горіння.

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

Область концентрації горючої речовини, яка лежить між нижньою і верхньою КМПП, характеризується можливістю запалювання і стійкого горіння суміші і називається областю вибухонебезпечних концентрацій ВНК. Поза концентраційними межами суміші є вибухобезпечними. Але якщо за концентрацій горючої речовини менше нижньої КМПП не можливе виникнення ніякого горіння, то за концентрацій горючої речовини більше верхньої КМПП можливе виникнення дифузійного горіння при виході суміші в навколишній простір і

наявності джерела запалювання (сумішоутворення до потрібних горючих концентрацій буде відбуватися в зоні горіння за рахунок дифузії окисника із навколишнього середовища).

Враховуючи, що концентраційні межі поширення полум'я можуть змінюватися за зміни зовнішніх умов, для забезпечення пожежної безпеки при роботі з горючими речовинами визначають і безпечні концентрації ($\varphi_{\text{нб}}$, $\varphi_{\text{вб}}$), нижче або вище за які суміш гарантовано не буде запалюватися.



БК – область безпечних концентрацій;

НК – область небезпечних концентрацій;

ВНК – область вибухонебезпечних концентрацій;

ПНК – область пожежонебезпечних концентрацій.

Концентраційні межі є найважливішим показником пожежної небезпеки речовини в будь-якому агрегатному стані.

Концентраційні межі поширення полум'я застосовуються:

1. Для порівняльної оцінки пожежної небезпеки декількох речовин.

2. Для оцінки небезпеки фактичної концентрації парогазових систем.

3. Для визначення вибухобезпечних концентрацій парів і газів всередині технологічного обладнання ($\varphi^{\circ}_{\text{факт}} < \varphi^{\circ}_{\text{нб}}$; $\varphi^{\circ}_{\text{факт}} > \varphi^{\circ}_{\text{вб}}$).

4. При розробці заходів щодо забезпечення пожежної

небезпеки вентиляційних систем, для розрахунку гранично допустимих вибухобезпечних концентрацій газів ($\varphi_{\text{без}}^0 < \varphi_{\text{нб}}^0$).

Розрахункові методи визначення НКМПП.

Концентраційні межі можуть виражатися як в об'ємних відсотках (%) - об'ємна концентрація, так і в грамах на кубічний метр ($\text{г}\cdot\text{м}^{-3}$) - масова концентрація.

НКМПП можна визначити з урахуванням мінімальної енергії, необхідної для підтримання процесу горіння:

$$Q_{\text{н}} - 100\%$$

$$Q_{\text{кр}} \cdot \varphi_{\text{н}}, \%$$

Встановлено, що кількість тепла, що виділяється при горінні бідних сумішей, для більшості вуглеводів приблизно дорівнює $1830 \text{ кДж}\cdot\text{м}^{-3}$.

З пропорції можна визначити НКМПП як:

$$\varphi_{\text{н}} = 100 \frac{Q_{\text{кр}}^{\prime\prime}}{Q_{\text{н}}^{\prime\prime}} = \frac{183000}{Q_{\text{н}}^{\prime\prime}} \%. \quad (42)$$

За наступною формулою можна визначити НКМПП, виходячи із складу горючої речовини:

$$\varphi_{\text{н}} = \frac{100}{1 + h_f \Delta H_f^0 + \sum_{j=1}^n h_j m_j + \sum_{s=1}^q h_r l_r}, \% \quad (43)$$

де h_f - параметр теплоти утворення газу, $\text{моль}\cdot\text{кДж}^{-1}$;

H_f^0 - стандартна теплота утворення речовини, $\text{кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$;

h_j - параметр j-го елемента в молекулі горючої речовини, $\text{моль}\cdot\text{кДж}^{-1}$;

m_j - число атомів j-го елемента в молекулі горючої

речовини.

Параметри h_f і h_j розраховуються для речовин даного класу в даному окислювальному середовищі з припущення, що адіабатична температура горіння бідних граничних сумішей є для речовин одного класу величиною приблизно однаковою і дорівнює 1500 К. Значення цих параметрів наведені в таблиці 4 додатків та в довіднику [3].

Більш простим методом розрахунку концентраційних меж є емпіричний метод за формулою:

$$\Phi_M = \frac{100}{a\beta + b}, \% , \quad (44)$$

де β - стехіометричний коефіцієнт реакції горіння;

a , b – константи для нижньої і верхньої КМПП за таблицю 5 додатків.

Для більш точного визначення концентраційних меж поширення полум'я необхідно враховувати вплив хімічної будови горючої речовини на схильність її до окислення. Для розрахунку концентраційних меж, виходячи із структури речовини, можна використовувати наступну формулу:

$$\Phi_M = \frac{100}{\sum_{s=1}^s h_s l_s}, \% , \quad (45)$$

де Φ_M – нижня або верхня КМПП;

h_s – вклад s -тої структурної групи, таблиці 6 додатків

l_s – число s -х структурних груп у хімічній формулі речовини.

Для перерахування об'ємної концентрації у масову та назад можна користуватися формулою:

$$\varphi' = 10 \cdot \varphi \cdot \frac{\mu}{V_{\mu}}, \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (46)$$

де μ - молярна маса горючої речовини, $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$;
 V_{μ} - молярний об'єм газу за даних умов, $\text{м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$.

За зміни зовнішніх умов концентраційні межі поширення полум'я можуть змінюватися. Для забезпечення пожежної безпеки при поводженні з горючими речовинами визначають не тільки самі концентраційні межі, але і безпечні концентрації, нижче або вище за які суміш гарантовано не буде запалюватися. Безпечні концентрації можна розрахувати за формулами:

$$\varphi_{\text{нб}} = 0,9(\varphi_{\text{н}} - 0,21), \quad \%, \quad (47)$$

$$\varphi_{\text{вб}} = 1,1(\varphi_{\text{в}} + 0,42), \quad \%, \quad (48)$$

де $\varphi_{\text{н}}$, $\varphi_{\text{в}}$ - НКМПП та ВКМПП, %.

Всі наведені вище методи розрахунку концентраційних меж використовуються за нормальних значень атмосферного тиску і температури та за умови, що окислювачем є повітря. Однак на практиці зустрічаються випадки, коли вибухонебезпечні суміші можуть утворюватися за підвищених температур і тиску, а також в середовищі, збагаченому киснем або негорючими газами. Існують методи перерахунку КМПП, в яких використовуються значення КМПП, отримані для стандартних умов.

У тих випадках, коли у виробництві використовується кілька різних горючих речовин і вони утворюють складну горючу суміш, концентраційні межі розраховують за правилом Ле-Шательє:

$$\varphi_{\text{н(в)сум}} = \frac{\sum \varphi_i}{\sum \frac{\varphi_i}{\varphi_{\text{н(в)}_i}}, \%}, \quad (49)$$

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

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

Приклади розв'язання задач

а) з використанням нижчої об'ємної теплоти згоряння

Визначити нижню концентраційну межу поширення полум'я етиленгліколю $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$, якщо нижча молярна теплота згоряння становить $1059 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$.

Розв'язання

1. Визначаємо нижчу об'ємну теплоту згоряння парів етиленгліколю за стандартних умов за формулою (29):

$$Q_{\text{н}}^{\prime\prime} = \frac{Q_{\text{н}} \cdot 1000}{V_{\mu}} = \frac{1059,3 \cdot 1000}{24,5} = 43236,7, \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

2. Визначаємо нижню концентраційну межу поширення полум'я за формулою (42):

$$\varphi_{\text{н}} = 100 \frac{Q_{\text{кр}}}{Q_{\text{н}}^{\prime\prime}} = 100 \frac{1830}{43236,7} = 4,15 \text{ \%}.$$

Висновок: нижча об'ємна концентраційна межа поширення полум'я етиленгліколю, за якої теплоти згоряння вже достатньо для прогріву холодної суміші до запалювання, становить 4,15 %.

б) залежно від хімічного складу горючої речовини

Визначити область безпечних концентрацій оцтової кислоти ($C_2H_4O_2$), якщо теплота її утворення становить $\Delta H_f^\circ = -437,3 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$.

Розв'язання

1. Визначаємо тип та число атомів в хімічній будові речовини. Випишуємо значення h_j із таблиці 4 додатків. Для полегшення роботи складаємо таблицю:

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

2. Розраховуємо нижню концентраційну межу поширення полум'я для $C_2H_4O_2$ за формулою (43):

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

3. Визначаємо нижню безпечну КМПП за формулою (47):

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

Таким чином область безпечних концентрацій оцтової кислоти лежить в межах $\varphi_\phi < 4,8\%$.

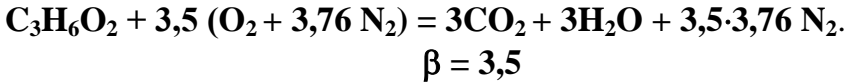
в) за апроксимаційною формулою

Розрахувати об'ємні і масові концентраційні межі поширення полум'я та область вибухобезпечних концентрацій пари етилформиату $C_3H_6O_2$ за стандартних

умов.

Розв'язання

1. Складаємо рівняння реакції горіння етилформиату:



2. Визначаємо молярну масу етилформиату.

$$\mu = n_{\text{C}} \cdot 12 + n_{\text{H}} \cdot 1 + n_{\text{O}} \cdot 16 = 3 \cdot 12 + 6 \cdot 1 + 2 \cdot 16 = 74 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}.$$

3. За таблицею № 5 додатків визначаємо коефіцієнти **a** та **b** для нижньої та верхньої концентраційної межі поширення полум'я і розраховуємо КМПП за формулою (44):

$$\varphi_{\text{H}} = \frac{100}{8,684 \cdot 3,5 + 4,769} = 2,85 \%,$$

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

4. Визначаємо масові КМПП за формулою (46):

$$\varphi'_{\text{H}} = 10\varphi_{\text{H}} \frac{\mu}{V_{\mu}} = 10 \cdot 2,85 \frac{74}{24,5} = 86,08 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$\varphi'_{\text{B}} = 10\varphi_{\text{B}} \frac{\mu}{V_{\mu}} = 10 \cdot 16,71 \frac{74}{24,5} = 504,7 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}.$$

5. Визначаємо безпечні концентраційні межі поширення полум'я за формулами (47), (48):

$$\varphi_{\text{H.б}} = 0,9(2,85 - 0,21) = 2,38 \%,$$
$$\varphi_{\text{B.б}} = 1,1(16,71 + 0,42) = 18,84 \%.$$

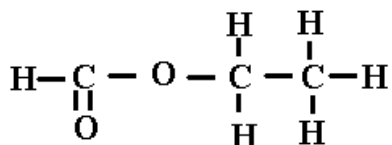
Висновок: концентраційні межі поширення полум'я етилформиату становлять 2,85 – 16,71% або 87,88 – 515,23 г·м⁻³. Пара етилформиату в суміші з повітрям буде вибухобезпечною за концентрацій менше 2,38% та більше 18,84%.

г) з урахуванням структури горючої речовини

Визначити умови утворення вибухонебезпечних концентрацій парів етилформиату C₃H₆O₂.

Розв'язання

1. Записуємо структурну формулу етилформиату:



2. Визначаємо вид та число структурних груп m_s в будові речовини. Випишуємо значення h_s із таблиці 6 додатків. Для роботи складаємо таблицю:

Вид структурної групи	Число груп, m_s	h_s	
		НКМПП	ВКМПП
C-C	1	3.75	-0,84
C-H	6	4.47	1,39
C-O	2	0.90	-1,40
C=O	1	3.12	1,31

3. Визначаємо нижню та верхню концентраційні межі поширення полум'я за формулою (45):

$$\varphi_{\text{H}} = \frac{100}{3,75 \cdot 1 + 4,47 \cdot 6 + 0,90 \cdot 2 + 3,12 \cdot 1} = 2,82 \% ;$$

$$\varphi_{\text{в}} = \frac{100}{(-0,84) \cdot 1 + 1,39 \cdot 6 + (-1,40) \cdot 2 + 1,31 \cdot 1} = 16,64 \%$$

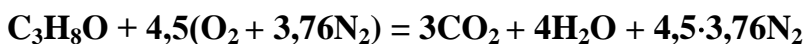
Висновок: пара етилформиату утворює вибухонебезпечне середовище в межах від 2,82 до 16,64%.

д) за формулою Ле-Шательє для суміші пари рідин
 Розрахувати область вибухонебезпечних концентрацій суміші парів пропанолу $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ -20 % та етанолу $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ -80 %.

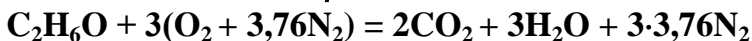
Розв'язання

1. Визначаємо верхню та нижню концентраційну межу кожного горючого компонента газової суміші.

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



$$\beta = 4,5;$$



$$\beta = 3.$$

1.2. Розраховуємо КМПП компонентів за формулою (44):

$$\varphi_{\text{н}}_{\text{C}_3\text{H}_8\text{O}} = \frac{100}{8,684 \cdot 4,5 + 4,679} = 2,29 \%,$$

$$\varphi_{\text{в}}_{\text{C}_3\text{H}_8\text{O}} = \frac{100}{1,55 \cdot 4,5 + 0,56} = 13,27 \%,$$

$$\varphi_{\text{н}}_{\text{C}_2\text{H}_6\text{O}} = \frac{100}{8,684 \cdot 3 + 4,679} = 3,25 \%,$$

$$\varphi_{\text{в}}_{\text{C}_2\text{H}_6\text{O}} = \frac{100}{1,55 \cdot 3 + 0,56} = 19,19 \%$$

2. Розраховуємо КМПП суміші за її відсотковим складом та значенням КМПП компонентів суміші за формулою (49):

$$\varphi_{H_{\text{сум.}}} = \frac{20 + 80}{\frac{20}{2,29} + \frac{80}{3,25}} = 3,0 \%,$$
$$\varphi_{B_{\text{сум.}}} = \frac{20 + 80}{\frac{20}{13,27} + \frac{80}{19,19}} = 17,6 \% .$$

Висновок: область вибухонебезпечних концентрацій даної суміші парів пропанолу та етанолу – від 3,0 % до 17,6 %.

2.2. ВИНИКНЕННЯ ГОРІННЯ ШЛЯХОМ САМОЗАЙМАННЯ

Самозаймання виникає у скупченні твердого матеріалу, у зоні з малими тепловтратами, тому навіть за умов не дуже великого виділення тепла в середині системи може початися накопичення тепла. Найменша температура речовини, при якій виникає її самонагрівання, називається *температурою самонагрівання* $T_{сн}$. Виникнення горіння речовин за рахунок їх самонагрівання під впливом внутрішніх екзотермічних процесів (фізичних, хімічних, мікробіологічних) і відсутності джерела запалювання називається *самозайманням*.

До самозаймання схильні тверді речовини: деякі метали, вугілля, торф, рослинні матеріали. Так, алюмінієва пудра самонагрівається вже при 10°C . До самозаймання більш схильні пористі, волокнисті, сипучі тверді речовини, тобто в середину яких може проникати кисень.

Речовини у яких: 1) $T_{сн} > 50^{\circ}\text{C}$, здатні до горіння тільки при їх нагріванні. 2) $T_{сн} < 50^{\circ}\text{C}$ це *пірофорні* речовини, що здатні до горіння без додаткового нагріву, тому що температура зберігання може виявитись більшою за $T_{сн}$.

При самозайманні для виникнення горіння необхідні первинний тепловий імпульс всередині системи, який викликає окислення горючої речовини, та накопичення тепла всередині системи. Після цього, горіння виникає в тій частині горючої системи, яка має найменшу тепловіддачу, і тому максимальну температуру. Період індукції перед виникненням самозаймання великий і може досягати декількох місяців, бо потрібно накопичення достатньої кількості тепла.

На виробництві самозаймання спостерігається як пожежі на елеваторах, вугільних складах, комбікормових заводах, при зберіганні хімічних речовин. За первинним

чинником самонагрівання твердої речовини розрізняють наступні види samozаймання: - мікробіологічне, - хімічне, - фізичне; - теплове.

Хімічне samozаймання виникає в місці контакту речовин, що реагують з виділенням тепла. Розрізняють хімічне samozаймання при контакті: 1) з киснем повітря; 2) з водою; 3) з іншими окислювачами. Схильність жирів та олій (обмаслених матеріалів) до хімічного samozаймання на повітрі визначають йодометричним методом. Якщо до 100 грамів масла приєднується більше ніж 50 грамів йоду, то дане масло схильне до хімічного samozаймання.

Фізичне samozаймання є наслідком тепловиділення фізичних процесів: 1) адсорбція - поглинання газів на поверхні твердих речовин, 2) абсорбція - розчинення пари і газів в рідинах; 3) Тепловиділення при терті.

Мікробіологічне samozаймання характерне для рослинних матеріалів, в яких можлива життєдіяльність мікроорганізмів. Таке samozаймання відбувається в товщі скупчення матеріалу, що тривало зберігається в умовах вологості.

Теплове samozаймання виникає при нагріванні речовини до температури термічного розкладання. При окисненні продуктів розкладання горючої речовини виділяється тепло реакції, що спричиняє самонагрівання. Процес протікає в глибині матеріалу у формі тління, яке потім може перейти в полум'яне горіння на поверхні. Схильність речовин до теплового samozаймання визначають за показниками: 1. Мінімальна температура самонагрівання $t_{\text{сн}}$ матеріалу. 2. Період індукції $\tau_{\text{інд}}$. 3. Питома поверхня тепловіддачі матеріалу $S_{\text{пит}} = S_{\text{повн}} / V$.

2.3. РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРИ САМОСПАЛАХУВАННЯ

Самоспалахування виникає в об'ємі повітряної горючої системи при нагріві від гарячих стінок, коли тепловиділення реакції більше за тепловіддачу в навколишній простір. Чим менша температура стінок, тим більший час індукції до появи спалаху. Існує найменша температура, за якої виникає самоспалахування. Тому температура самоспалахування це така найменша температура стінок посудини, за якої час індукції є максимальним.

Таким чином, температура самоспалахування t_{cc} – це найменша температура системи, за якої різко збільшується швидкість екзотермічної реакції і порушується теплова рівновага. При цьому виникає стрибкоподібний підйом температури за рахунок самонагрівання горючої системи.

На температуру самоспалахування впливають три групи факторів:

- 1) Фактори, що залежать від *хімічної будови* горючої речовини: теплота згоряння ; середня довжина карбонового ланцюга, яка визначається за просторовою структури горючої речовини.
- 2) Фактори *складу горючої системи*: наявність та концентрація горючої речовини, окисника; негорючих газів; каталізаторів або інгібіторів.
- 3) Фактори, що визначаються *умовами, в яких знаходиться горюча система*: загальний тиск, температура стінок; об'єм горючої системи , діаметр посудини; площа тепловідводу; коефіцієнт тепловіддачі.

Хімічна реакція окиснення відбувається найшвидше, з більшою повнотою протікання та більшим виділенням тепла за стехіометричної концентрації горючої речовини у

суміші з повітрям. Оскільки тепловиділення максимальне – температура самоспалахування набуває мінімального значення, а пожежна небезпека найбільша.

За стехіометричної концентрації горючої речовини та за інших рівних умов головним чинником, який впливає на температуру самоспалахування, є середня довжина карбонового ланцюга. В загальному випадку – чим довший карбоновий ланцюг молекули, тим менша його температура самоспалахування.

Значення температури самоспалахування використовують для порівняння пожежної небезпеки речовин, для визначення групи вибухонебезпечних сумішей горючих речовин з повітрям (табл.2.1), при виборі вибухозахищеного електроустаткування та для визначення допустимої температури нагріву робочих поверхонь технологічного обладнання.

Таблиця 2.1. Групи вибухонебезпечних сумішей за 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

Нагріта поверхня при використанні даної речовини є безпечною, тобто такою, що не може викликати самоспалахування, якщо її температура є меншою ніж безпечна:

$$t_{\text{безп}} = 0,8 t_{\text{сс}}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (50)$$

Тому, при використанні сірковуглецю, який має $t_{cc} = 102^\circ\text{C}$, забороняється використання системи парового опалювання, яка має $t = 95^\circ\text{C}$.

Як було сказано, температура самоспалахування залежить від довжини карбонового ланцюга молекули. Оскільки молекула може мати розгалужену будову, визначають її середню довжину $l_{\text{сер}}$. Залежність температури самоспалахування від $l_{\text{сер}}$ приблизно характеризують формули Монахова:

$$t_{cc} = 300 + 116\sqrt{5 - l_{\text{сер}}} \quad \text{при } l_{\text{сер}} \leq 5, \quad (51)$$

$$t_{cc} = 300 - 38\sqrt{l_{\text{сер}} - 5} \quad \text{при } l_{\text{сер}} \geq 5, \quad (52)$$

де $l_{\text{сер}}$ - умовна середня довжина ланцюга молекули.

Умовна середня довжина $l_{\text{сер}}$ молекули хімічної сполуки дорівнює середньому арифметичному всіх можливих довжин l_i ланцюгів молекули і визначається за формулою:

$$l_{\text{сер}} = \frac{\sum l_i}{n_{\text{ланц}}}, \quad (53)$$

де l_i – довжина i -го ланцюга молекули;

$n_{\text{ланц}}$ – число ланцюгів молекули.

Число ланцюгів $n_{\text{ланц}}$ молекули дорівнює числу можливих сполучень між кінцевими групами:

$$n_{\text{ланц}} = 0,5 \cdot m(m - 1), \quad (54)$$

де m – число кінцевих груп у молекулі.

Кінцевими групами вважаються $-\text{CH}_3$, $=\text{CH}_2$, функціональні групи (ОН, СООН та ін.) і цикли.

Якщо функціональна група або цикл розташовані в

середині ланцюга, їх слід вважати одночасно і кінцевою, і проміжною групою.

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 на $6/(m_C!)$ атомів карбону.

Еквівалентна довжина функціональних груп $-O-C_6H_5$ та $-COO-$ дорівнює одиниці, груп $-NH-$ і $N\equiv$ дорівнює 2,5, а для $-O-$ в сполуках, де атом кисню не з'єднаний з первинним або вторинним атомом карбону, становить 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.

Ароматичне кільце з функціональними групами у мета- та пара- положенні у довжині карбонового ланцюга враховується, як «1». Довжина ланцюга молекули I_1 зростає на 2, якщо до складу входять дві групи або ланцюги, що приєднані до ароматичного циклу в орто-положенні.

З більшою точністю, ніж за формулами (50), (51), стандартну температуру самоспалахування окремих класів органічних сполук можна визначити за спеціальними таблицями, що наведені в додатках: для парафінових вуглеводнів № 15, для насичених аліфатичних одноатомних спиртів № 16. Розрахункове число атомів карбону в ланцюзі аліфатичного спирту дорівнює фактичному числу атомів карбону плюс одиниця.

Температуру самоспалахування окремих класів органічних сполук можна визначити за методом

порівняльного розрахунку:

$$t_{cc} = at_{cc}^{\text{алк}} + b, \quad (55)$$

де a, b – коефіцієнти гомологічного ряду даної речовини (див. табл. № 17 додатків);

$t_{cc}^{\text{алк}}$ – температура самоспалахування алкану, що відповідає умовній середній довжині ланцюга $l_{\text{сер}}$ алкільного радикалу молекули.

Якщо середню довжину ланцюгу молекули можна розрахувати різними способами, то приймають середнє значення з усіх розрахованих методів.

Якщо необхідно визначити температуру самоспалахування суміші горючих рідин, то можна використовувати формулу (50) або (51). При цьому середню довжину ланцюга умовної молекули газової суміші визначають з урахуванням мольних часток компонентів суміші.

Методика розрахунку стандартної температури самоспалахування речовини за середньою довжиною ланцюга

1. Скласти структурну формулу речовини з використанням таблиці додатків № 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 (54).
5. Виходячи із структурної формули молекули, визначити довжину кожного ланцюга l_i .
6. Провести розрахунок умовної середньої довжини ланцюга $l_{\text{сер}}$ молекули за формулою (53).
7. Визначити стандартну температуру

самоспалахування за формулами (51) чи (52) або за таблицями додатків (№ 15 для алканів, № 16 для спиртів).

8. Для алкан-похідних визначити стандартну температуру самоспалахування за формулою (55) з використанням даних таблиці додатків № 17.

9. Розрахувати максимальну безпечну температуру нагріву робочих поверхонь за формулою (50).

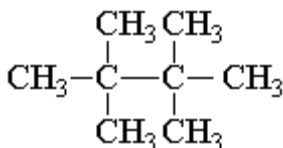
10. Визначити групу вибухонебезпечних сумішей горючих речовин з повітрям за таблицею № 2.1.

Приклад розв'язання задачі

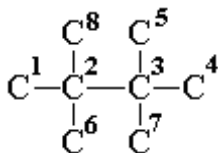
Розрахувати стандартну температуру самоспалахування 2,2,3,3-тетраметилбутану. Визначити безпечну температуру нагріву поверхонь та групу вибухонебезпечних сумішей парів 2,2,3,3-тетраметилбутану з повітрям.

Розв'язання

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



2. Нумеруємо атоми карбону в ланцюгах:



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

$m = 6$.

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

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

5. Визначаємо довжину кожного ланцюга l_i , дані заносимо у таблицю.

№ ланцюга	Склад ланцюга	Довжина ланцюга l_i .
1	1- 2- 6	3
2	1- 2- 8	3
3	1- 2- 3- 7	4
4	1- 2- 3- 5	4
5	1- 2- 3- 4	4
6	8- 2- 6	3
7	8- 2- 3- 7	4
8	8- 2- 3	3
9	8- 2- 3- 4	4
10	6- 2- 3- 7	4
11	6- 2- 3- 5	4
12	6- 2- 3- 4	4
13	5- 3- 7	3
14	5- 3- 4	3
15	7- 3- 4	3

6. Розраховуємо умовну середню довжину $l_{\text{сер}}$ молекули 2,2,3,3-тетраметилбутану за формулою (53):

$$l_{\text{сер}} = \frac{3 \cdot 7 + 4 \cdot 8}{15} = 3,53.$$

7. Визначаємо стандартну температуру

самоспалахування

а) за формулою (51), оскільки $l_{\text{сер}} \leq 5$:

$$t_{\text{cc}} = 300 + 116\sqrt{5 - l_{\text{сер}}} = 300 + 116\sqrt{5 - 3,53} = 440,6 \text{ } ^\circ\text{C};$$

б) за таблицею № 15 додатків для парафінових вуглеводнів: середній умовній довжині карбонового ланцюга $l_{\text{сер}} = 3,5$ відповідає температура самоспалахування $t_{\text{cc}} = 444 \text{ } ^\circ\text{C}$.

8. Розраховуємо максимальну безпечну температуру нагріву робочих поверхонь за формулою (50):

$$t_{\text{роб}_{\text{без}}} \leq 0,8 \cdot t_{\text{cc}} = 0,8 \cdot 440,6 = 352,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

9. Визначаємо групу вибухонебезпечних сумішей 2,2,3,3-тетраметилбутану за таблицею № 2.1: оскільки $t_{\text{cc}} = 440 \text{ } ^\circ\text{C}$ лежить у межах від 300 до $450 \text{ } ^\circ\text{C}$ 2,2,3,3-тетраметилбутан відноситься до групи вибухонебезпечних сумішей T2.

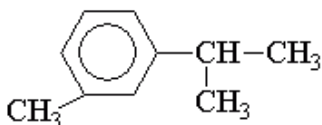
Висновок: розрахункова стандартна температура самоспалахування 2,2,3,3-тетраметилбутану дорівнює $440 \text{ } ^\circ\text{C}$. Температура нагріву поверхонь технологічного обладнання не повинна перевищувати $352,6 \text{ } ^\circ\text{C}$. Пароповітряна суміш 2,2,3,3-тетраметилбутану відноситься до групи вибухонебезпечних сумішей T2.

Приклад розв'язання задачі

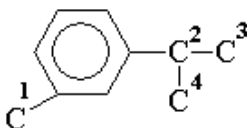
Розрахувати стандартну температуру самоспалахування 3-метил-ізопропілбензолу.

Розв'язання

1. 3-метил-ізопропілбензол належить до ароматичних сполук; складаємо структурну формулу молекули:



2. Нумеруємо атоми карбону в ланцюгах, не враховуючи при цьому атоми гідрогену:



3. Визначаємо число кінцевих груп m у молекулі 3-метил-ізопропілбензолу. Кінцевими групами в даному випадку будуть три метильні групи C^1 , C^3 , C^4 і ароматичне кільце Ar (як було відмічено раніше, цикл, розташований в середині ланцюга, вважається одночасно і кінцевою і проміжною групою). Отже, число кінцевих груп $m = 4$.

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 ланцюгів l_i , враховуючи, що розрахункове число атомів карбону в ланцюзі, у якому є ароматичне кільце, дорівнює фактичному числу атомів карбону мінус одиниця. Атоми карбону у ароматичному кільці в розрахунок не беруться.

№ ланцюга	Склад ланцюга	Довжина ланцюга l_i .
1	1 - Ar	2
2	1 - Ar - 2 - 4	4

3	1 - Ar - 2 - 3	4
4	Ar - 2 - 3	3
5	Ar - 2 - 4	3
6	4 - 2 - 3	3

6. Розраховуємо умовну середню довжину ланцюга $l_{\text{сер}}$:

$$l_{\text{сер}} = \frac{2 + 4 + 4 + 3 + 3 + 3}{6} = 3,2.$$

7. За таблицею додатків № 15 визначаємо температуру самоспалахування 3-метил-ізопропілбензолу. Оскільки умовна середня довжина карбонового ланцюга склала $l_{\text{сер}} = 3,2$, температура самоспалахування дорівнює $t_{\text{cc}} = 460$ °С.

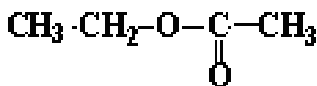
Висновок: температура самоспалахування 3-метил-ізопропілбензолу становить 460 °С.

Приклад розв'язування задачі

Розрахувати стандартну температуру самоспалахування етилацетату та безпечну температуру нагріву поверхонь технологічного обладнання. Порівняти розраховане значення з експериментально визначеною температурою самоспалахування, яка дорівнює 446 °С.

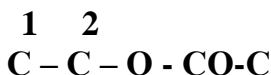
Розв'язання

1. Складаємо структурну формулу етилацетату, додаток 20:



2. Нумеруємо атоми карбону в ланцюзі етил-радикалу

молекули, не записуючи при цьому атоми гідрогену карбонового ланцюгу:



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

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

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

5. Визначаємо довжину ланцюга l_i по ланках: “1 – 2”:

$$l_{\text{сер}} = 2.$$

6. Визначаємо температуру самоспалахування алкан-радикалу, довжині ланцюга “2” відповідає етан, який має $t_{\text{cc}} = 515$ °С.

7. Визначаємо стандартну температуру самоспалахування за формулою (55) з використанням таблиці додатків № 17 за константами для ацетатів:

$$a = 0,7909, b = 52;$$

$$t_{\text{cc}} = 0,7909 \cdot 515 + 52 = 459,3 \text{ °С.}$$

8. Розраховуємо максимальну безпечну температуру нагріву робочих поверхонь:

$$t_{\text{р. без}} = 0,8 \cdot 459,3 = 367,5 \text{ °С.}$$

Висновок: розрахункова стандартна температура самоспалахування етилацетату дорівнює 459,3 °С; відхилення розрахунку від експериментального значення становить 13,3 К або 1,8 %. Температура нагріву поверхонь технологічного обладнання не повинна перевищувати 367,5 °С.

2.4. РОЗРАХУНОК МОЖЛИВОСТІ ВИМУШЕНОГО ЗАПАЛЮВАННЯ

Вимушене запалювання виникає внаслідок прогріву малої частки холодної горючої системи від джерела запалювання. Джерелом запалювання може бути відкрите полум'я, розжарене тіло, електричний розряд, які мають енергію і температуру, достатні для запалювання інших речовин. Виділяють безумовні джерела запалювання: прямі удари блискавок, потужні електричні дуги, полум'я газових пальників, сірника.

На відміну від самоспалахування, вимушене запалювання виникає при зовнішньому нагріві горючої системи малим джерелом тепла, від якого полум'я поширюється на всю суміш. Для малого джерела тепла існує велика інтенсивність тепловтрат, тому і температура для запалювання $T_{\text{зап}}$ необхідна значно більша, ніж при самоспалахуванні. Горіння поширяться на всю горючу суміш, якщо за час дії джерела запалювання тепло не встигне розсіятися в холодну суміш шляхом теплопровідності, а біля стінки джерела запалювання утвориться прогрітий до температури запалювання $T_{\text{зап}}$ шар товщиною δ . За умови тривалого впливу джерела запалювання на горючу повітряну суміш, температура запалювання зменшується, але не менше ніж до температури самоспалахування $T_{\text{сс}}$.

На практиці 40 відсотків пожеж відбувається внаслідок теплових проявів електричної енергії: електричні розряди статичної та атмосферної електрики; іскри та краплі металу короткого замикання; нагрів поверхні ламп накалювання, електричних дротів і контактів при перевантаженнях.

Існує певна мінімальна енергія електричного розряду E_{min} , яка достатня для прогріву сферичного об'єму холодної горючої суміші радіусом r_{min} до температури

горіння. За такої умови виникає критичний незгасаючий елемент полум'я, здатний до поширення. Тобто є мінімальна енергія запалювання для даної горючої речовини. Мінімальну енергію запалювання в досліді визначають як найменшу енергію електричного конденсатора, при розряді якого через повітряний простір виникає іскра, що запалює стехіометричну суміш газу або аерозолі горючої речовини з повітрям з імовірністю 0,01.

Якщо джерело запалювання буде мати запас енергії рівний або більший за мінімальну енергію запалювання $Q_{\text{іскри}} > E_{\text{minГР}}$ та достатню температуру $T_{\text{зап}}$, то запалювання відбудеться. Запас енергії нагрітої твердої частки $Q_{\text{іск}}$, наприклад фрикційної іскри, залежить від її маси, об'єму $V_{\text{іск}}$, густини матеріалу $\rho_{\text{іск}}$, теплоємності $C_{p \text{ іск}}$, перевищення температури частки $T_{\text{іск}}$ над температурою самоспалахування: $Q_{\text{іск}} = V_{\text{іск}} \rho_{\text{іск}} C_{p \text{ іск}} (T_{\text{іск}} - T_{\text{сс гр}})$.

Фрикційні іскри – це шматочки металу відірвані і нагріті при механічному впливі і частково окислені, що може підвищити температуру іскри ще на 500 °С.

Мінімальну енергію запалювання даної речовини E_{min} можна визначити шляхом розрахункового порівняння з відомими властивостями бутану за значенням нормальної швидкості поширення горіння u_n даної горючої речовини:

$$E_{\text{min}} = 0,036 / u_n^2, \text{ мДж.} \quad (56)$$

Розжарене тіло, що почало діяти на горючу систему, буде безпечним, тобто не запалить дану пароповітряну суміш, або тверду речовину, якщо його енергія буде менша ніж безпечна:

$$E_{\text{без}} = 0,4E_{\text{min}}, \text{ мДж,} \quad (57)$$

а температура – менша ніж безпечна температура самоспалахування, яку можна розрахувати за формулою (50).

Методика розрахунку можливості вимушеного запалювання

1. За довідником [11] визначити для даної речовини нормальну швидкість поширення полум'я, u_n , $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$, та температуру самоспалахування, t_{cc} .

2. Розрахувати мінімальну енергію запалювання даної речовини за формулою (56).

3. Розрахувати безпечну енергію джерела запалювання для даної речовини за формулою (57).

4. Розрахувати безпечну температуру джерела запалювання для даної речовини за формулою (50).

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

Приклад розв'язування задачі

Розрахувати безпечні енергію та температуру за умови дії джерела запалювання на стехіометричну пароповітряну суміш етилацетату, визначити можливість її запалювання іскрою з енергією 0,2 мДж та температурою 2000°C.

Розв'язання

1. За довідником [11], для етилацетату $u_n = 0,39 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, $t_{cc} = 446 \text{ }^\circ\text{C}$.

2. Розраховуємо мінімальну енергію запалювання етилацетату за формулою (56):

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

3. Розрахувати безпечну енергію іскри для даної речовини за формулою (57):

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

4. Розрахувати безпечну температуру іскри для даної речовини за формулою (50):

$$t_{\text{дж. без}} = 0,8 \cdot 446 = 356,8 \text{ }^\circ\text{C.}$$

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

РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ РЕЧОВИН ТА МАТЕРІАЛІВ

3.1. РОЗРАХУНОК ТИСКУ НАСИЧЕНОЇ ПАРИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ СТУПЕНЯ НЕБЕЗПЕКИ РІДИНИ ЗА ВИЗНАЧЕНИХ УМОВ

Для механізму горіння рідин найважливішою обставиною є те, що температура їх кипіння завжди нижча за температуру самоспалахування, отже, горіння рідин можливе тільки в паровій фазі. Горіння рідин можливе лише за умов утворення над її поверхнею пари в концентрації, не меншій за нижню КМПП. Концентрація пари над поверхнею рідини залежить від її температури. За підвищення температури рідини зростає інтенсивність випаровування, що обумовлює зростання концентрації пари та її тиску.

Рідина може випаровуватися у відкритий або закритий простір. При випаровуванні в закритому просторі встановлюється *динамічна рівновага* - стан системи, за якого кількість речовини, що випаровується, дорівнює кількості сконденсованої пари. Відбувається насичення газової фази, а пара, що утворилася при динамічній рівновазі в системі, називається *насиченою парою*.

Якщо рідина знаходиться в незакритому об'ємі, то частина пари дифундує в навколишній простір. При цьому кількість речовини, що випарувалася, буде більшою, ніж сконденсованої, динамічна рівновага не встановиться, пара буде *ненасиченою*, а випаровування буде тривати, поки вся рідина не випарується.

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

100 % парогазової суміші — $P_{\text{заг}}$
 $\varphi_{\text{нп}}$ % пари рідини — $P_{\text{нп}}$

Тобто:
$$P_{\text{нп}} = P_{\text{заг}} \frac{\varphi_{\text{нп}}}{100}, \text{кПа}, \quad (58)$$

або
$$\varphi_{\text{нп}} = 100 \frac{P_{\text{нп}}}{P_{\text{заг}}}, \%, \quad (59)$$

де $P_{\text{нп}}$ – тиск насиченої пари, кПа;
 $P_{\text{заг}}$ – загальний тиск горючої суміші, кПа.

Розрахункові методи визначення тиску насиченої пари

Тиск насиченої пари рідини можна визначити за рівнянням Антуана:

$$\lg P_{\text{нп}} = A - \frac{B}{t_{\text{рід}} + C_a}, \quad \text{або} \quad P_{\text{нп}} = 10^{A - \frac{B}{t_{\text{рід}} + C_a}}, \text{кПа}, \quad (60)$$

де $P_{\text{нп}}$ - тиск пари, кПа;
 $t_{\text{рід}}$ – температура рідини, °С;
 A, B, C_a - константи, що визначаються для рідини із довідника [11], або за таблицею додатків 11.

Для багатьох розповсюджених горючих рідин тиск насиченої пари визначений для ряду температур і зведений в довідниках до вигляду таблиць. Для таких речовин можна розрахувати тиск насиченої пари за будь-якої температури за *методом лінійної інтерполяції*:

$$t_{\text{фак}} \rightarrow \left\langle \frac{t_1 \rightarrow P_{\text{нп}}(t_1)}{t_2 \rightarrow P_{\text{нп}}(t_2)} \right\rangle \rightarrow P_{\text{нп}}$$

Значення t_1, t_2 є найближчими до заданої температури

$t_{\text{фак}}$ за таблицею № 12 додатків для даної речовини, $P_{\text{нп}}(t_1), P_{\text{нп}}(t_2)$ - відповідні їм тиски насиченої пари. Тоді розрахунок тиску насиченої пари за даної температури здійснюють за інтерполяційною формулою:

$$P_{\text{нп}}(t_x) = P_{\text{нп}}(t_1) + \frac{(t_x - t_1)(P_{\text{нп}}(t_2) - P_{\text{нп}}(t_1))}{t_2 - t_1}, \text{кПа.} \quad (61)$$

Приклади розв'язання задач

а) з використанням констант Антуана

Визначити тиск насиченої пари та фактичну концентрацію насиченої пари етилацетату $C_4H_8O_2$ за температури 20°C та тиску 101 кПа.

Розв'язання

1. За таблицею № 11 додатків визначаємо константи Антуана:

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

2. Визначаємо тиск насиченої пари за даної температури за формулою (60):

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

$$p_{\text{нп}} = 10^{0,993} = 9,84 \text{ кПа}.$$

3. Визначаємо фактичну концентрацію насиченої пари етилацетату за формулою (59):

$$\varphi_{\text{факт}} = 100 \frac{9,84}{101} = 9,74 \text{ \%}.$$

Висновок: за даних умов тиск насиченої пари

етилацетату становитиме $P_{\text{нп}} = 9,84$ кПа, а концентрація, відповідно, $\varphi^{\circ}_{\text{факт}} = 9,74\%$.

б) з використанням методу лінійної інтерполяції

Визначити тиск насиченої пари, концентрацію пари та ступінь пожежовибухонебезпеки етилформиату $C_3H_6O_2$ за температури $5^{\circ}C$ та загального тиску 105 кПа, якщо концентраційні межі поширення полум'я для етилформиату становлять $2,85 - 16,71\%$.

Розв'язання

1. За таблицю № 12 додатків визначаємо два значення температури t_1 і t_2 , що будуть найближчими до заданої $t_{\text{факт}}$, та відповідні їм тиски насиченої пари:

$$t_{\text{факт}} = 5^{\circ}C \rightarrow \frac{t_1 = -11,5^{\circ}C \rightarrow P_{\text{нп}t_1} = 5,333 \text{ кПа}}{t_2 = 5,4^{\circ}C \rightarrow P_{\text{нп}t_2} = 13,33 \text{ кПа}} \rightarrow P_{\text{нп}} = ?$$

3. Розраховуємо тиск насиченої пари за даної температури за апроксимаційною формулою (61):

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

4. Визначаємо фактичну концентрацію насиченої пари за даних умов за формулою (59):

$$\varphi_{\text{фак}} = 100 \frac{13,14}{105} = 12,51 \% .$$

5. Визначаємо ступінь пожежовибухонебезпеки насиченої пари етилформиату:

$$\varphi_{\text{н}} = 2,85 \% < \varphi_{\text{фак}} = 12,51 \% < \varphi_{\text{в}} = 16,71 \% ,$$

отже за даних умов насичена пара етилформиату буде утворювати вибухонебезпечну концентрацію.

3.2. РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРНИХ МЕЖ ПОШИРЕННЯ ПОЛУМ'Я

За певних температур концентрація насиченої пари рідини стає рівною нижній або верхній концентраційній межі, поширення полум'я. Такі температури називають температурними межами поширення полум'я (ТМПП). Як і для концентраційних меж можна визначити нижню і верхню ТМПП.

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

Таким чином, пожежну небезпеку горючої рідини можна оцінювати не за концентрації, її пари, а за температур самої рідини. Тому замість концентраційних меж можна вказати температуру рідини, за якої ця концентрація утвориться.

За температур нижче нижньої температурної межі концентрація насиченої пари буде нижче нижньої концентраційної межі, і тому буде безпечною.

За температури вище верхньої ТМПП насичена пара не горить, через нестачу окислювача, тобто кінетичного вибухового горіння не буде. Однак, таку пару можна запалити при виході із ємності у повітря, тобто можливе горіння в дифузійному режимі. Отже, насичена пара в даній області температур є вибухобезпечною, але пожежонебезпечною.

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

- 1). потужність джерела запалювання;
- 2.) концентрація окислювача в окислювальному середовищі;
- 3). загальний тиск;

4). домішки негорючих газів;

5.) домішки негорючих рідин.

Отже, так само як і для газів, для рідин існують безпечні параметри експлуатації - безпечні температурні межі. Таким чином, для рідин характерними є наступні області концентрацій і температур:



де БК – область безпечних концентрацій;

НК – область небезпечних концентрацій (вибух ймовірний);

ВНК – область вибухонебезпечних концентрацій;

ВБК, ПНК – область вибухобезпечних, але пожежонебезпечних концентрацій;

Використання ТМПП, як показника пожежної небезпеки рідин, значно спрощує роботу по визначенню 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 область робочих температур технологічного обладнання.

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

$$t_{роб} < t_{нб}; \quad t_{роб} > t_{вб}.$$

3) визначити ступінь пожежної небезпеки парів в ємностях і закритих технологічних апаратах за фактичної температури.

Розрахункові методи визначення ТМПП

Для розрахункового визначення ТМПП можна скористатися *рівнянням Антуана*, яке враховує залежність тиску насиченої пари від температури рідини:

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

$$t_{\text{н(в)}} = \frac{B}{A - \lg(0,01 \cdot P_{\text{заг}} \cdot \varphi_{\text{н(в)}})} - C_a, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (62)$$

де A, B, C_a - константи рівняння Антуана, які вибирають із таблиці № 11 додатків;

$P_{\text{заг}}$ - атмосферний тиск, кПа;

$\varphi_{\text{н(в)}}$ - концентраційні 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:

$$t_{\text{н(в)}} = t_1 + \frac{(t_2 - t_1)(P_{\text{нп(н(в))}} - P_1)}{P_2 - P_1}, \quad (63)$$

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

$P_{\text{нп(н(в))}}$ – тиск насиченої пари на нижній або верхній ТМПП, кПа;

t_1, t_2 – температури, що відповідають тиску насиченої пари $P_1, P_2, ^\circ\text{C}$; P_1, P_2, t_1, t_2 обирають для речовини за таблицею № 12 додатків.

Тиск насиченої пари необхідно розрахувати за формулою (58), виходячи із значення нижньої або верхньої КМПП:

$$P_{\text{нп(н(в))}} = P_{\text{заг}} \frac{\Phi_{\text{н(в)}}}{100}, \text{кПа} .$$

Якщо залежність тиску насиченої пари від температури невідома, для речовин, що складаються з С, Н, О, N, значення нижньої і верхньої ТМПП обчислюється з урахуванням структури горючої речовини (додаток 20) за формулою:

$$t_{\text{н(в)}} = a_0 + a_1 \cdot t_{\text{кип}} + \sum a_j \cdot l_j, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (64)$$

де $t_{\text{н(в)}}$ – нижня або верхня ТМПП;

a_0, a_1 - коефіцієнти, які становлять:

для НТМПП $a_0 = -62,40^\circ\text{C}; a_1 = 0,655$

для ВТМПП $a_0 = -41,43^\circ\text{C}; a_1 = 0,723$

l_j - число структурних груп j-го типу;

a_j - емпіричний коефіцієнт, що характеризує вклад j-х структурних груп, наведений у таблиці № 8 додатків,

ТМПП легко можна розрахувати з використанням констант гомологічного ряду за емпіричною формулою:

$$t_{\text{н(в)}} = k \cdot t_{\text{кип}} - l, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (65)$$

де k і l - емпіричні коефіцієнти гомологічних рядів горючих рідин, наведені у таблиці №. 7 додатків.

$t_{\text{кип}}$ – температура кипіння речовини, $^\circ\text{C}$.

Безпечні ТМПП можна розрахувати за формулами:

$$t_{\text{н без}} = 0,9 (t_{\text{н}} - K_6), \quad (66)$$

$$t_{\text{в без}} = 1,1 (t_{\text{в}} + K_6), \quad (67)$$

де K_6 - коефіцієнт безпеки, який для індивідуальних речовин і нафтопродуктів становить $10,5^\circ\text{C}$, для сумішей 14

°C.

В техніці рідко використовують чисті індивідуальні рідини, частіше – суміші або рідини із значним вмістом домішок. Визначення ТМПП бінарних неazeotropних сумішей взаєморозчинних рідин проводять за формулою:

$$t_{\text{мбін}} = t_{\text{МА}} - (t_{\text{МА}} - t_{\text{МВ}}) \sqrt[3]{g_{\text{В}}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (68)$$

де $g_{\text{В}}$ – масова частка компоненту В з меншим значенням ТМПП;

$t_{\text{МА}}, t_{\text{МВ}}$ – нижня або верхня ТМПП компонентів суміші, °C;

$t_{\text{мбін}}$ – нижня або верхня ТМПП бінарної суміші, °C.

Приклади розв'язання задач

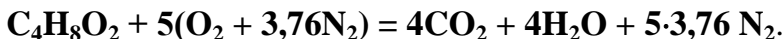
а) з використанням констант Антуана

Визначити температурні межі поширення полум'я етилацетату $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ за стандартних умов.

Розв'язання

1. Визначаємо концентраційні межі поширення полум'я для етилацетату розрахунком.

1.1. Складаємо рівняння реакції горіння:



1.2. Визначаємо нижню та верхню об'ємну концентраційну межу поширення полум'я за формулою (44).

$$\text{нижня КМПП} \quad \varphi_{\text{н}} = \frac{100}{a\beta + b} = \frac{100}{8,684 \cdot 5 + 4,769} = 2,08 \% .$$

$$\text{верхня КМПП} \quad \varphi_{\text{в}} = \frac{100}{a\beta + b} = \frac{100}{1,55 \cdot 5 + 0,65} = 12,0 \% .$$

2. Знаходимо константи Антуана за таблицею 11 додатків:

$$A = 6,2267 \quad B = 1244,95 \quad C_a = 217,88$$

3. Визначаємо температурні межі поширення полум'я етилацетату:

$$t_n = \frac{1244,95}{6,2267 - \lg(0,01 \cdot 101,3 \cdot 2,08)} - 217,88 = -6,9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$t_b = \frac{1244,95}{6,2267 - \lg(0,01 \cdot 101,3 \cdot 12,0)} - 217,88 = 24,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Висновок: За температур від $-6,9$ до $24,2^\circ\text{C}$ насичена пара етилацетату утворює вибухонебезпечні концентрації.

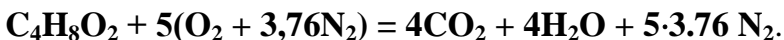
б) з використанням методу лінійної інтерполяції

Визначити, за яких температур насичена пара етилацетату $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ утворює вибухонебезпечну концентрацію, якщо загальний тиск становить $101,3$ кПа.

Розв'язання

1. Визначаємо концентраційні межі поширення полум'я для етилацетату розрахунком.

1.1. Складаємо рівняння реакції горіння:



1.2. Визначаємо нижню та верхню об'ємну концентраційну межу поширення полум'я за формулою (44):

$$\varphi_n = \frac{100}{a\beta + b} = \frac{100}{8,684 \cdot 5 + 4,769} = 2,08 \% .$$

$$\varphi_b = \frac{100}{a\beta + b} = \frac{100}{1,55 \cdot 5 + 0,65} = 12,0 \% .$$

2. Визначаємо тиск насиченої пари на нижній та верхній концентраційній межі поширення полум'я за формулою (58):

$$P_{\text{нп(н)}} = \varphi_{\text{н}}^0 \frac{P_{\text{заг}}}{100} = 2,08 \frac{101,3}{100} = 2,1, \text{ кПа};$$

$$P_{\text{нп(в)}} = \varphi_{\text{в}}^0 \frac{P_{\text{заг}}}{100} = 12,0 \frac{101,3}{100} = 12,2, \text{ кПа}.$$

3. За таблицею №12 додатків визначаємо значення тиску насиченої пари найближчі до розрахованих, P_1 (ліворуч, менше від розрахованого значення) та P_2 (праворуч, більше від розрахованого значення), а також відповідні їм температури t_1 та t_2 для нижньої та верхньої КМПП:

$$P_{\text{нп(н)}} = 2,1 \text{ кПа} \rightarrow \frac{P_{\text{нп}t_1} = 1,333 \text{ кПа} \rightarrow t_1 = -13,5^\circ \text{C}}{P_{\text{нп}t_2} = 5,33 \text{ кПа} \rightarrow t_2 = 9,1^\circ \text{C}} \rightarrow t_{\text{н}} = ?$$

$$P_{\text{нп(в)}} = 12,2 \text{ кПа} \rightarrow \frac{P_{\text{нп}t_1} = 5,33 \text{ кПа} \rightarrow t_1 = 9,1^\circ \text{C}}{P_{\text{нп}t_2} = 13,33 \text{ кПа} \rightarrow t_2 = 27,0^\circ \text{C}} \rightarrow t_{\text{в}} = ?$$

4. Визначаємо температурні межі поширення полум'я за формулою (63):

$$t_{\text{н}} = -13,5 + \frac{(9,1 - (-13,5))(2,1 - 1,333)}{(5,333 - 1,333)} = -9,1^\circ \text{C},$$

$$t_{\text{в}} = 9,1 + \frac{(27,0 - 9,1)(12,2 - 5,333)}{(13,33 - 5,333)} = 24,5^\circ \text{C}.$$

Висновок: насичена пара етилацетату $C_4H_8O_2$ утворює вибухонебезпечну концентрацію в діапазоні температур від $-9,1^{\circ}C$ до $24,5^{\circ}C$.

в) з використанням констант гомологічного ряду

Визначити температурні межі поширення полум'я етилформиату $C_3H_6O_2$ за стандартних умов.

Розв'язання

1. Визначаємо температуру кипіння етилформиату із довідника [11] $t_{\text{кип}} = 54,3^\circ\text{C}$

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

3. Визначаємо ТМПП за формулою (65):

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

$$t_b = 0,6050 \cdot 54,3 - 25,0 = 7,8^\circ\text{C}.$$

Висновок: температурні межі поширення полум'я етилформиату становлять $t_n = -18,5^\circ\text{C}$, $t_b = 7,8^\circ\text{C}$.

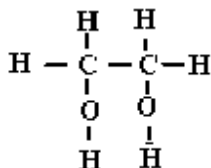
г) з використанням хімічної структури горючої речовини

Визначити температурні межі поширення полум'я етиленгліколю, $C_2H_6O_2$ за стандартних умов.

Розв'язання

1. Визначаємо температуру кипіння етиленгліколю за таблицею додатків № 11 за останньою колонкою $t_{\text{кип}} = 197,8^\circ\text{C}$.

2. Записуємо структурну формулу етиленгліколю, додаток 20:



3. Визначаємо число структурних груп l_j та коефіцієнт a_j :

$$l_{C-C} = 1 \quad a_{jn} = -0,909 \quad a_{jb} = -1,158$$

$$l_{C-H} = 4 \quad a_{jn} = -0,009 \quad a_{jb} = 0,570$$

$$l_{C-O} = 2 \quad a_{jn} = 0,110 \quad a_{jb} = 1,267$$

$$l_{O-H} = 2 \quad a_{jH} = 19,80 \quad a_{jB} = 17,80$$

4. Визначаємо ТМПП за формулою (64):

$$t_H = -62,46 + 0,655 \cdot 197,8 + (-0,009)4 + (-0,909)1 + 0,11 \cdot 2 + 19,75 \cdot 2 = 105,9^\circ\text{C};$$

$$t_B = -41,43 + 0,723 \cdot 197,8 + 0,570 \cdot 4 + (-1,158)1 + 1,267 \cdot 2 + 17,80 \cdot 2 = 140,8^\circ\text{C}.$$

Висновок: температурні межі поширення полум'я етиленгліколю становлять $t_H = 105,9^\circ\text{C}$, $t_B = 140,8^\circ\text{C}$.

д) розрахунок температурних меж поширення полум'я суміші рідин

Визначити температурні межі поширення полум'я розчину з масовим вмістом бутилового 35 % та етилового спиртів 65 %, якщо ТМПП для бутанолу складають [11] 34 – 67 °С, для етанолу складають [11] 11 – 41 °С.

Рішення

Проводимо розрахунок ТМПП суміші рідин за формулою (68), враховуючи, що речовина В обирається з меншим значенням ТМПП. Тоді речовина А – бутанол, речовина В – етанол $g = 0,65$:

$$t_{H\text{біH}} = 34 - (34 - 11)\sqrt[3]{0,65} = 14,1^\circ\text{C};$$

$$t_{B\text{біH}} = 67 - (67 - 41)\sqrt[3]{0,65} = 44,5^\circ\text{C}.$$

Висновок. Температурні межі суміші бутанолу з етанолом у співвідношенні 35 + 65 % складають 14,1 °С та 44,5 °С; в цьому діапазоні температур насичена пара суміші утворює вибухонебезпечні концентрації.

3.3 РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРИ СПАЛАХУ

Виникнення горіння пари рідини від джерела запалювання може статися тільки тоді, коли концентрація пари досягне значення нижньої концентраційної межі поширення полум'я. Якщо рідина знаходиться у відкритій посудині, через дифузію у відкритий простір за однакової температури концентрація ненасиченої пари буде завжди меншою, ніж насиченої.

Температура спалаху (t_{cn}) – це найменша температура рідини, за якої над її поверхнею в умовах спеціальних випробувань утворюється концентрація пари, здатна спалахувати від джерела запалювання середньої потужності. При цьому швидкість випаровування рідини менше швидкості згоряння пари й стійкого горіння не виникає.

Температуру спалаху взято за основу класифікації рідин за ступенем їх пожежної небезпеки. Розрізняють *горючі і легкозаймисті рідини*. Залежно від умов випробування, розрізняють температуру спалаху визначену в закритому і у відкритому тиглі. До горючих (ГР) відносять рідини із температурою спалаху в закритому тиглі більше за 61°C . Рідина з температурою спалаху в закритому тиглі 61°C і нижче відносять до класу легкозаймистих рідин (ЛЗР).

Розрахункові методи визначення температури спалаху

Розрахунок температури спалаху за *формулою Еллея*:

$$t_{cn} = t_{кип} - 18\sqrt{K_r}, \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (69)$$

де K_r - коефіцієнт горючості речовини, який визначається за формулою:

$$K_r = 4C + 4S + H + N - 2O - 2Cl - 3F - 5Br;$$

де C, S, H, N, O, Cl, F, Br – число відповідних атомів у молекулі речовини.

Температуру спалаху можна розрахувати за структурною формулою речовини (додаток 20) аналогічно до розрахунку ТМПП за формулою:

$$t_{\text{сп}} = a_0 + a_1 t_{\text{кип}} + \sum a_j I_j, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (70)$$

де $a_0 = -73,14 \text{ } ^\circ\text{C}$; $a_1 = 0,659$;

a_j - емпіричний коефіцієнт відповідної структурної групи молекули (таблиця № 9 додатків);

I_j - число структурних груп даного виду в молекулі.

У межах одного гомологічного ряду значення температури спалаху рідин монотонно зростає зі збільшенням молекулярної маси. Внаслідок обробки числових експериментальних даних була отримана емпірична формула, що враховує лінійну залежність температури спалаху від температури кипіння для певних класів хімічних сполук:

$$t_{\text{сп}} = a + b \cdot t_{\text{кип}}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (71)$$

де a, b - емпіричні константи для гомологічних рядів (табл. №10 додатків).

Температуру спалаху бінарних неазеотропних розчинів родин можна розрахувати за формулою:

$$t_{\text{сп.сум.}} = \frac{A t_{\text{сп.А}} + B t_{\text{сп.В}} - f(t_{\text{сп.А}} - t_{\text{сп.В}})}{100} \quad (72)$$

де А – рідина з більшою температурою спалаху;

f – емпіричний коефіцієнт, що знаходять за таблицею 2.1. за вмістом речовини А.

Таблиця 2.1. Визначення емпіричного коефіцієнту f для формули (72)

% А	%В	f	%А	%В	f
100	0	0	50	50	25,99
95	5	12	45	55	23,9
90	10	20	40	60	21,7
85	15	26	35	65	19,4
80	20	29,2	30	70	17
75	25	30,4	25	75	14,5
70	30	30,3	20	80	11,9
65	35	30	15	85	9,2
60	40	29	10	90	6,5
55	45	27,6	5	95	3,3

Приклади розв'язання задач

а) за формулою Еллея (69).

Визначити температуру спалаху етилформиату $C_3H_6O_2$ та групу горючості рідини.

Розв'язання

1. Визначаємо температуру кипіння етилформиату за довідником [11], $t_{\text{кип}} = 54,3$ °С.

2. Визначаємо коефіцієнт горючості:

$$K_r = 4 \cdot 3 + 6 - 2 \cdot 2 = 14.$$

3. Визначаємо температуру спалаху етилформиату:

$$t_{\text{сп}} = t_{\text{кип}} - 18 \cdot \sqrt{K_r} = 54,3 - 18 \cdot \sqrt{14} = -13,05 \text{ °С.}$$

Висновок: етилформиат має температуру спалаху –

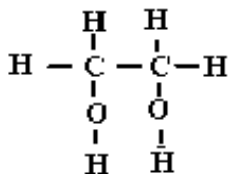
13,05°С і відноситься до легкозаймистих рідин.

б) за структурою речовини

Визначити температуру спалаху етиленгліколю $C_2H_6O_2$ за станд. умов.

Розв'язання

1. Визначаємо структуру (додаток 20) та температуру кипіння рідини етиленгліколю із довідника [11] або за таблицею додатків 12 структурної формули етиленгліколю:



3. Визначаємо число структурних груп l_j та коефіцієнт a_j .

$$\begin{array}{ll} l_{C-C} = 1 & a_j = -2,03 \\ l_{C-H} = 4 & a_j = 1,105 \\ l_{C-O} = 2 & a_j = 2,47 \\ l_{O-H} = 2 & a_j = 23,90 \end{array}$$

4. Визначаємо температуру спалаху етиленгліколю:

$$t_{\text{сп}} = -73,14 + 0,659 \cdot 197,8 + 1,105 \cdot 4 + (-2,03) \cdot 1 + 2,47 \cdot 2 + 23,90 \cdot 2 = 112,3^\circ\text{C}.$$

Висновок: етиленгліколь має температуру спалаху $112,3^\circ\text{C}$, тобто $t_{\text{сп}} > 61^\circ\text{C}$, тому етиленгліколь відноситься до горючих рідин.

в) за константами гомологічних рядів

Визначити температуру спалаху і клас дихлоретану $C_2H_4Cl_2$.

Розв'язання

1. Із довідника [11] або за таблицею 12 додатків (остання колонка) знаходимо температуру кипіння

дихлоретану ($t_{\text{кип}} = 57,3 \text{ } ^\circ\text{C}$).

2. За таблицею № 10 додатків знаходимо емпіричні константи а та b:

$$a = -55,70; b = 0,643.$$

3. Визначаємо температуру спалаху за формулою (71):

$$t_{\text{сп}} = a + b \cdot t_{\text{кип}} = -55,7 + 0,046 \cdot 57,3 = -18,3 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Висновок: дихлоретан є легкозаймистою рідиною.

г) розрахунок температури спалаху суміші рідин

Визначити температуру спалаху суміші рідин, що складається з 35 % етилформіату $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$ і 65 % гексилформіату $\text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}_2$, а також клас суміші.

Розв'язання

1. Визначаємо температури спалаху рідин за довідником [11]: етилформіат $t_{\text{сп}} = -20 \text{ } ^\circ\text{C}$, гексилформіат $t_{\text{сп}} = 48 \text{ } ^\circ\text{C}$. Оскільки гексилформіат має більшу температуру спалаху, приймаємо його за рідину А.

2. Визначаємо коефіцієнт f за таблицею №2.1.: оскільки відсоток вмісту рідини А – 65 %, $f = 30$.

3. Визначаємо температуру спалаху суміші рідин:

$$t_{\text{сп, сум}} = \frac{65 \cdot 48 + 35 \cdot (-20) - 30(48 - (-20))}{100} = 3,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Висновок: оскільки температура спалаху суміші даних рідин менша за $61 \text{ } ^\circ\text{C}$, суміш відноситься до легкозаймистих рідин.

РОЗДІЛ 4. ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖ

Пожежа – це неконтрольоване горіння поза спеціальним осередком, що розвивається в просторі і часі та завдає моральні, матеріальні, екологічні збитки.

Загальні явища пожежі обов'язкові для кожної пожежі:

1. *Горіння* з виділенням тепла та продуктів згорання.
2. *Масообмін* – рух газових потоків, надходження повітря, відвід продуктів горіння.
3. *Теплообмін* – нагрів повітря, горючих речовин, будівельних конструкцій, що розповсюджує горіння.

Окремі явища властиві конкретній пожежі (наявність агресивних, радіоактивних речовин, руйнування, загибель людей та ін.).

Небезпечні фактори пожежі: відкритий вогонь, висока температура, токсичні продукти горіння, дим, нестача кисню, падаючі уламки конструкцій, ударна хвиля, отруйні речовини з пошкодженого обладнання.

Зони пожежі: 1. У зоні горіння горюча речовина розкладається, випаровує, згоряє. 2. У зоні теплового впливу помітні зміни у матеріалах, неможлива робота особового складу. 3. У зоні задимлення видимість до 12 м, кисню менше 16 %, токсичний дим, необхідні засоби захисту дихання для людей.

Стадії розвитку пожежі: 1. *Початкова* – від загорання до охопленням полум'ям 80 % пожежної навантаги, на 10 хв. вигоряє 20 % пожежної навантаги і руйнується віконних отворів. 2. *Розвинена пожежа* – температура пожежі і швидкість вигорання максимальні, вигоряє 80 % пожежної навантаги, будівельні конструкції втрачають несучу спроможність. 3. *Догорання* – перехід полум'яного горіння у тління, повільне зменшення температури пожежі.

Параметри розвитку пожежі:

- *пожежна навантага Р* – це кількість теплоти, що може виділитись з одиниці площі приміщення;
- *температура пожежі на відкритому просторі* – температура полум'я;
- *температура пожежі в огорожі* - середньооб'ємна температура в приміщенні;
- *теплота пожежі* – кількість тепла, що виділяється в зоні горіння в одиницю часу;
- *площа пожежі* – проекція зони горіння на вертикальну або горизонтальну площину;
- *тривалість, периметр, фронт пожежі; лінійна швидкість поширення пожежі; масова швидкість вигорання речовини v_m^0 , щільність задимлення, інтенсивність газообміну.*

За умовами газообміну розрізняють пожежі на відкритому просторі та в огорожі.

Пожежі на відкритому просторі бувають: окремі – горить одна споруда, суцільні – декілька споруд, масові – існують і окремі, і суцільні пожежі, вогненний шторм – за умов слабкого вітру у зоні пожежі накопичується багато тепла, утворюється велетенський факел і конвекційна колонка, яка підіймає і переносить палаючі предмети значного розміру на велику відстань.

Пожежі в огорожі регулюються або вентиляцією, коли пожежної навантаги багато і додаткове підведення кисню підвищує температуру пожежі, або пожежною навантагою, коли пожежної навантаги мало і температура пожежі залежить від її кількості.

Розрізняють класи пожеж за видом горючої речовини:
 клас А – горять тверді горючі речовини, А1 – деревина, А2 – термопласти;
 клас В – горять горючі рідини, В1 – водонерозчинні рідини та парафіни, В2 – водорозчинні рідини;

клас *C* – горять горючі гази;

клас *D* – горять метали або металоорганічні сполуки,

клас *E* – горить електрообладнання під напругою.

Класи пожеж показують можливість використання води для гасіння. Воду доцільно використовувати лише для гасіння пожеж класу А. Для гасіння водонерозчинних рідин класу В1, пожеж класу D та E воду використовувати неможна.

4.1. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖІ КЛАСІВ “В” ТА “С” НА ВІДКРИТОМУ ПРОСТОРИ

4.1.1. Вибух пароповітряної хмари

Пожежа класу **В** виникає внаслідок запалювання пароповітряного середовища, що утворюється над поверхнею рідини. Горюча рідина може знаходитися в технологічному обладнанні (резервуарах, технологічних апаратах) або у вигляді розливу, що виник внаслідок аварійної ситуації.

При аварійному виході горючих рідин з резервуарів або іншого технологічного обладнання площа, яку займає рідина, визначається її об’ємом, рельєфом місцевості і властивостями ґрунту і визнається за формулою:

$$S_{\text{рід}} = \frac{G_{\text{вит}} \tau_{\text{вит}}}{\rho_{\text{рід}} h_{\text{рід}}}, \text{ м}^2, \quad (73)$$

де $G_{\text{вит}}$ – витрата витікання рідини, $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$;

$h_{\text{рід}}$ – висота шару рідини, м;

$\rho_{\text{рід}}$ – густини рідини, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

$\tau_{\text{вит}}$ – час витікання, с.

Інтенсивність випаровування у відкритий простір можна визначити із наступного рівняння:

$$I_{\text{вип}} = P_{\text{пар}} \mu (0,734 + 1,637 v_{\text{пов}}) 10^{-6}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (74)$$

де $P_{\text{пар}}$ - тиск насиченої пари рідини, кПа;

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

$v_{\text{пов}}$ - швидкість руху повітря над поверхнею рідини, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Загальна маса горючої пари з урахуванням часу випаровування може бути визначена як:

$$m_{\text{пар}} = I_{\text{вип}} \cdot \tau_{\text{вип}} \cdot S_{\text{вип}}, \text{ кг}, \quad (75)$$

де $S_{\text{вип}}$ – площа, з якої відбувається випаровування рідини, м^2 ;

$\tau_{\text{вип}}$ – час випаровування рідини, с.

Якщо температура рідини менша за температуру спалаху, то концентрація пари буде меншою за нижню концентраційну межу поширення полум'я і вибухонебезпечної зони загазованості не буде. Запалити таку рідину можна, якщо джерело запалювання прогріє її до температури спалаху.

Якщо температура рідини більша за температуру її спалаху, то радіус зони загазованості, де концентрація пари перевищує нижню КМПП, визначають за формулою:

$$R_{\text{нкмп}} = 3,15 \sqrt{\frac{\tau_{\text{вип}}}{3600} \left(\frac{P_{\text{нп}}}{\varphi_{\text{н}}} \right)^{0,813} \left(\frac{m_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}} P_{\text{нп}}} \right)^{0,333}}, \text{ м}, \quad (76)$$

де $\rho_{\text{пар}}$ – густина пари за даної температури, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

$P_{\text{пар}}$ – тиск насиченої пари за даної температури, кПа;

$m_{\text{пар}}$ - маса пари, що утворилась за час випаровування, кг;

$\tau_{\text{вип}}$ – час випаровування рідини (але не більше 3600 с), с.

$\varphi_{\text{н}}$ - нижня концентраційна межа поширення полум'я, %.

За умови виникнення у зоні із концентраціями від нижньої до верхньої межі поширення полум'я джерела запалювання, відбудеться запалювання пароповітряної хмари і її горіння в кінетичному (вибуховому) режимі. При

вибуху безпосередньо в процесі горіння бере участь не вся маса горючої речовини, що випарувалася, а лише її частка:

$$m_{\text{пр}} = m \cdot Z, \text{ кг}, \quad (77)$$

де m – маса пари, що утворила вибухонебезпечну суміш, кг;

Z – коефіцієнт участі пари і газів у вибуху залежить від умов вибуху:

- в незамкненому просторі	$Z = 0,1$
- в замкненому просторі:	
- для водню	$Z = 1,0$
- для інших горючих газів	$Z = 0,5$
- для парів ЛЗР і ГР	$Z = 0,3$

Потужність вибуху можна оцінити за тротиловим еквівалентом вибуху:

$$W_{\text{ТНТ}} = \frac{0,4 \cdot Q'_n}{0,9 \cdot Q_{\text{ТНТ}}} m_{\text{пр}}, \text{ кг}, \quad (78)$$

де 0,4 і 0,9 відповідно частки енергії, що витрачаються на формування ударної хвилі під час вибуху паро-газової хмари і тринітротолуолу (ТНТ);

Q'_n – масова теплота згоряння горючої речовини, кДж·кг⁻¹;

$m_{\text{пр}}$ – маса речовини, що бере участь у вибуху, кг;

$Q_{\text{ТНТ}}$ – енергія вибуху тринітротолуолу (4520 кДж·кг⁻¹).

Вибух пароповітряної хмари супроводжується підвищенням тиску. Надлишковий тиск, що виникає при цьому в ударній хвилі, може призвести до руйнування будівель і технологічного устаткування, травм і загибелі людей. До цього призводять і вторинні фактори вибуху: уламки скла, частин апаратів, що розлітаються, та інше. Обсяг руйнувань під час вибуху можна оцінити за надлишковим тиском вибуху ΔP . Величину *надлишкового тиску* ΔP , що створюється в ударній хвилі під час згоряння пароповітряної хмари на відкритому просторі, можна

розрахувати за формулою:

$$\Delta P = P_o \left(0,8 \frac{W_{\text{ТНТ}}^{0,33}}{r} + 3 \frac{W_{\text{ТНТ}}^{0,66}}{r^2} + 5 \frac{W_{\text{ТНТ}}}{r^3} \right), \text{кПа}, \quad (79)$$

де P_o – атмосферний тиск, кПа;

r - відстань до геометричного центру парогазової хмари, м.

Залежно від надлишкового тиску радіус зони ураження від центру вибуху можна розрахувати за формулою:

$$R_{\text{ураж}} = K_1 \cdot R_o = K_1 \frac{\sqrt[3]{W_{\text{ТНТ}}}}{\left[1 + \left(\frac{3180}{W_{\text{ТНТ}}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{6}}}, \text{ м}, \quad (80)$$

Межа зони впливу ударної хвилі характеризується певним значенням надлишкового тиску по фронту ударної хвилі (ΔP) і, відповідним безрозмірним коефіцієнтом (K_1) рівня впливу вибуху, див. таблицю 4.1.

Таблиця 4.1. Відповідність тиску во фронті ударної хвилі коефіцієнту K_1 та наслідкам дії ударної хвилі

Надлишковий тиск по фронту ударної хвилі, ΔP , кПа	Коефіцієнт (K_1) рівня впливу вибуху	Характеристика дії ударної хвилі
100	3,8	повне руйнування будівель, ураження легенів, розриви барабанних перетинок
70	5,6	руйнування 50 % ÷ 75 % стін
28	9,6	область значних пошкоджень конструкцій, що несуть навантагу, травми людей уламками

14	28,0	область незначних пошкоджень (розриви з'єднань і розчленування конструкцій)
2	56,0	руйнування до 10 % віконного скла

Всередині пароповітряної хмари концентрація пари 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 вигоряти на периферії в дифузійному режимі. При цьому утворюється вогненна сфера. У зоні впливу вогненної сфери відбувається практично миттєве згоряння більшості тканих матеріалів, шкіри людини. Тепловий вплив у вогненній сфері викликає смертельні наслідки.

Діаметр вогненної сфери можна визначити, виходячи із маси горючої речовини, що бере участь у вибуху формулою:

$$D_{\text{вс}} = 55 \cdot M^{0,375}, \text{ м.} \quad (81)$$

де $M = (1-z) m_{\text{пр}}$ - масова частка горючої речовини, що бере участь в утворенні вогненної сфери, т.

Час життя вогненної сфери та її тепловий вплив на особовий склад визначається за формулою:

$$\tau_{\text{вс}} = 3,8 \cdot \sqrt[3]{M}, \text{ с.} \quad (82)$$

Одним із факторів, що обумовлює поширення пожежі й ураження людей, є теплове випромінювання вогненної сфери при вибухах. Опіки відкритих ділянок шкіри виникають за густини теплового потоку, більше за $1,4 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$. Радіус зони ураження тепловим опроміненням визначають за формулою:

$$R_{\text{оп}} = \frac{K_2 \cdot D_{\text{вс}}}{2}, \text{ м;} \quad (83)$$

де K_2 – коефіцієнт рівня впливу теплового опромінення, дивись таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Вплив теплового випромінювання вогненної сфери на людину

Коефіцієнт рівня впливу K_2	Рівень ураження людини
2,3	50 % смертельних наслідків
3,04	1 % смертельних наслідків
5,5	утворення пухирів на шкірі

Індивідуальне розрахункове завдання №2

Визначити параметри вибуху при запалюванні пароповітряної хмари, що утворилася при випаровуванні у відкритий простір розлитої рідини:

$R_{\text{заг}}$ - радіус зони загазованості при випаровуванні рідини;

$R_{\text{пошк}}$ – радіус незначних пошкоджень людей та будівельних конструкцій ударною хвилею ($\Delta P = 14$ кПа);

$R_{\text{травм}}$ – радіус незначного травмування людей уламками будівельних конструкцій ($\Delta P = 28$ кПа);

$D_{\text{вс}}$ - діаметр вогненної сфери;

$\tau_{\text{вс}}$ - час життя вогненної сфери;

$R_{\text{опік}}$ - радіус ураження тепловим випромінюванням (опіки відкритих ділянок шкіри).

Для даної роботи початкову температуру рідини розрахувати як:

$$t_{\text{поч}} = t_{\text{сп}} + t_0, \text{ } ^\circ\text{C},$$

де $t_{\text{сп}}$ - температура спалаху речовини, $^\circ\text{C}$;

t_0 - початкова температура, $^\circ\text{C}$.

Температуру спалаху $t_{\text{сп}}$, розраховану за формулою Еллея, узяти із розрахункової роботи №1. Початкову температуру t_0 , швидкість вітру $v_{\text{віт}}$ узяти із таблиці 4.3; площу розливу рідини $S_{\text{вип}}$ і час випаровування $\tau_{\text{вип}}$ - із таблиці 4.4 для свого варіанту. Горюча речовина - рідина з індивідуального завдання контрольної розрахункової роботи №1.

Таблиця № 4.3

Вихідні умови обирають за другою цифрою залікової книжки

Параметр	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_0, \text{ } ^\circ\text{C}$	10	15	20	25	30	35	25	20	15	10
$v_{\text{віт}}, \text{ м/с}$	1,5	2,6	2,3	1,8	3,1	2,6	2,1	1,7	1,3	2,4

Таблиця №4.4

Вихідні дані обирають за третьою цифрою залікової книжки

Параметр	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
----------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

$S_{\text{вип}}, \text{м}^2$	210	170	260	320	300	150	250	120	175	310
$\tau_{\text{вип}}, \text{хв}$	45	38	35	48	55	50	39	52	37	42

Методика розрахунку параметрів горіння пароповітряної хмари на відкритому просторі

1. Визначити масу рідини, що випарувалася.
 - 1.1. Розрахувати тиск насиченої пари рідини $P_{\text{нп}}$ за початкової температури за формулою (60).
 - 1.2. Розрахувати інтенсивність випаровування рідини $I_{\text{вип}}$ за формулою (74).
 - 1.3. Визначити площу випаровування.
 - 1.4. Розрахувати масу рідини, що випарувалася $m_{\text{пар}}$ за формулою (75).
2. Визначити радіус зони загазованості, що утворилася за час випаровування рідини $\tau_{\text{вип}}$.
 - 2.1. Розрахувати густину пари рідини $\rho_{\text{пар}}$ за даної температури за формулою:
$$\rho_{\text{пар}} = \frac{\mu}{22,4 \cdot (1 + 0,00367 \cdot t)}$$
 - 2.2. Визначити нижню КМПП рідини $\phi_{\text{н}}$ за довідником або розрахувати за формулами (44), (45).
 - 2.3. Розрахувати радіус зони загазованості $R_{\text{заг}}$, формула (76).
3. Розрахувати тротиловий еквівалент вибуху пароповітряної суміші.
 - 3.1. Визначити коефіцієнт участі парів у вибуху.
 - 3.2. Розрахувати масу речовини $m_{\text{пр}}$, що бере участь у вибуху, за формулою (77)
 - 3.3. Визначити молярну та масову теплоту згоряння речовини $Q_{\text{н}}$ за формулами (27), (28); або за довідником [11].
 - 3.4. Розрахувати тротиловий еквівалент вибуху, формула (78).
4. Розрахувати радіус ураження ударною хвилею, формула (80).
5. Розрахувати параметри згоряння вогненної сфери.
 - 5.1. Розрахувати діаметр вогненної сфери $R_{\text{вс}}$, формула (81).
 - 5.2. Розрахувати час життя вогненної сфери $\tau_{\text{вс}}$, формула (82).

5.3. Розрахувати радіус ураження тепловим випромінюванням за формулою (83).

6. За результатами розрахунку зробити висновок.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати параметри вибуху пароповітряної хмари, що утворилась під час випаровування етилацетату у відкритий простір із поверхні розливу 25 м^2 , якщо час випаровування становив 40 хв, швидкість вітру $1,5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, температура етилацетату на 18°C перевищує температуру його спалаху.

Розв'язання

1. Визначаємо масу етилацетату, що випарувалася.

1.1. Розраховуємо тиск насиченої пари етилацетату за температури 15°C за формулою (60), $t_{\text{поч}} = -3 + 18 = 15^\circ\text{C}$:

$$P_{\text{н.п.}} = 10^{\left(6,2267 - \frac{1244,95}{15+217,88}\right)} = 7,6 \text{ кПа.}$$

1.2. Розраховуємо інтенсивність випаровування етилацетату (формула (74)):

$$\mu = 12 \cdot 4 + 1 \cdot 8 + 16 \cdot 2 = 88 \text{ кг}\cdot\text{кмоль}^{-1};$$
$$I_{\text{вип}} = 88 \cdot 7,6 (0,734 + 1,637 \cdot 1,5) \cdot 10^{-6} = 2,13 \cdot 10^{-3} \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}.$$

1.3. Розраховуємо масу рідини, що випарувалася, за формулою (75):

$$m_{\text{пар}} = 2,13 \cdot 10^{-3} \cdot 25 \cdot 40 \cdot 60 = 128 \text{ кг.}$$

2. Визначаємо радіус зони загазованості, що утворилася під час випаровування аварійного розливу етилацетату протягом 2400 с.

2.1. Розраховуємо густину пари етилацетату за $t_{\text{поч}}$:

$$\rho_{\text{пар}} = \frac{88}{22,4 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 15)} = 3,72 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

2.2. Визначаємо НКМПП етилацетату за довідником [11] $\phi_{\text{н}} = 2\%$:

2.3. Розраховуємо радіус зони загазованості за формулою (76):

$$R_{\text{заг}} \approx 3,15 \cdot \sqrt{\frac{2400}{3600}} \cdot \left(\frac{7,6}{2,07}\right)^{0,8} \cdot \left(\frac{128}{3,72 \cdot 7,6}\right)^{0,33} = 12 \text{ м}.$$

3. Визначаємо тротиловий еквівалент вибуху пароповітряної суміші.

3.1. Визначаємо коефіцієнт участі парів у вибуху z : оскільки випаровування відбувається у відкритий простір $z = 0,1$.

3.2. Розраховуємо масу етилацетату, що бере участь у вибуху (формула (77)):

$$m_{\text{пр}} = 128 \cdot 0,1 = 12,8 \text{ кг}.$$

3.3. Розраховуємо масову теплоту згоряння етилацетату за формулою (28), $Q_{\text{н}} = 2078 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ [11]:

$$Q_{\text{н}}' = \frac{2078 \cdot 1000}{88} = 23613,6 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

3.4. Розраховуємо тротиловий еквівалент вибуху пароповітряної хмари етилацетату за формулою (78):

$$W_{\text{ТНТ}} = \frac{0,4 \cdot 23613,6}{0,9 \cdot 4520} \cdot 12,8 = 29,7 \text{ кг}.$$

4. Розраховуємо радіуси ураження ударною хвилею за

формулою (80):

$$R_0 = \frac{\sqrt[3]{29,7}}{\left[1 + \left(\frac{3180}{29,7}\right)^2\right]^{0,167}} = 0,632.$$

Розраховуємо радіус незначних ушкоджень будівельних конструкцій за формулою (80), виходячи з $\Delta P = 14$ кПа, коефіцієнт $K_1 = 28$:

$$R_{\text{пошк}} = 28 \cdot 0,632 = 17,7 \text{ м.}$$

Розраховуємо радіус незначних травмувань людей за формулою (80), виходячи з $\Delta P = 28$ кПа, коефіцієнт $K_1 = 9,6$:

$$R_{\text{травм}} = 9,6 \cdot 0,632 = 6,1 \text{ м.}$$

5. Розраховуємо діаметр вогненної сфери, формула (81):

$$M = (1 - 0,1) 12,8 \cdot 10^{-3} = 0,115 \text{ т,}$$
$$D_{\text{вс}} = 55 \cdot 0,115^{0,375} = 24,4 \text{ м.}$$

6. Розраховуємо час життя вогненної сфери, формула (82):

$$\tau_{\text{вс}} = 3,8 \cdot \sqrt[3]{0,115} = 1,85 \text{ с.}$$

7. Розраховуємо радіус ураження відкритих ділянок шкіри тепловим випромінюванням вогненної сфери з утворенням пухирів на шкірі за формулою (83), $K_2 = 5,5$:

$$R_{\text{оп}} = 5,5 \cdot 24,4 = 67,1 \text{ м.}$$

Висновок: На підставі проведеного розрахунку встановлено, що за умови випаровування етилацетату протягом 40 хвилин на площі аварійного розливу 25 м^2 за

температури 15°C радіус зони, у якій концентрація пари буде перевищувати нижню КМПП, становитиме 12 м. Тротиловий еквівалент вибуху становитиме 27,7 кг. При вибуху пароповітряної хмари радіус незначних ушкоджень будівельних конструкцій 17,7 м. На відстані до 67,1 м можливі опіки відкритих ділянок шкіри людини.

4.1.2. Розрахунок критичної відстані

від факела газового фонтана, пожежа класу С

Горіння газових фонтанів – це характерний приклад дифузійного горіння газів, пожежі класу С. На практиці розрізняють:

- газові фонтани - із вмістом газу не менше за 95 %;
- газонафтові фонтани - із вмістом газу більше за 50 % і нафти до 50 %;
- нафтові фонтани - із вмістом нафти більше за 50 %.

Пожежі на газових і газонафтових фонтанах відрізняються від нафтових тим, що продукт, який виходить, встигає згоріти в повітрі, а при горінні нафтових фонтанів вигоріти встигають лише супутний газ і легкі фракції нафти, а все інше випадає навколо гирла свердловини і продовжує горіти і розтікатися по поверхні.

Природні гази із газових родовищ характеризуються низьким вмістом важких вуглеводнів і умовно називаються сухими газами. Гази із газоконденсатних родовищ складаються із суміші сухих газів, пропан-бутанової фракції, ароматичних вуглеводнів, газового бензину і дизельного пального. Нафтові гази більш багаті важкими фракціями. Вміст сухих газів в попутному газі невеликий, а основну частину складають пропан-бутанова фракція, ароматичні вуглеводні, фракції газового бензину. Крім зазначених компонентів, до складу природного газу може входити водень, сірководень, оксид карбону, азот і деякі інші гази.

Аварії на нафтогазових промислах можуть

супроводжуватися повним обривом фонтанного обладнання над поверхнею або нижче за рівень ґрунту.

При розпиленому факелі фронт полум'я має розвинену поверхню, що призводить до збільшення поверхні випромінювання.

При викиді нафти і газу із свердловини продукт виходить зі швидкістю, близькою до швидкості звуку. За таких швидкостей горіння має чітко виражений турбулентний режим. Фонтан, що горить, за висотою умовно можна розділити на наступні зони:

1. Зона відриву полум'я, частина фонтану безпосередньо від гирла до видимої зони горіння факела; вона залежить від температури горіння, тиску і може сягати до трьох метрів.
2. Зона запалювання, в якій відбувається запалювання і горіння фонтана. У цій зоні газ і нафта повністю згорають, оскільки повітря ще може проникнути в цю зону.
3. Зона горіння, яка починається від верху зони запалювання до верхньої частини факела.

Через пульсацію потоку контури зон умовні і розміри зон можуть змінюватися.

Висота газового фонтана меншою мірою залежить від діаметра труби, через яку виходить газ, і більшою від витрати газу, тобто дебіту свердловини. Висоту газового фонтана можна визначити як:

$$H_{\phi} = 23g_{\phi}^{0,4}, \text{ м.} \quad (84)$$

де g_{ϕ} - витрата або дебіт газу, $\text{млн.м}^3 \cdot \text{добу}^{-1}$; H_{ϕ} - висота факела полум'я газового фонтана, м.

Для спрощення розрахунків можна використати більш просту формулу.

$$H_{\phi} = 20\sqrt{g_{\phi}}, \text{ м.} \quad (85)$$

Цей зв'язок може бути використаний для орієнтовного визначення дебіту за відомою висотою факела газового фонтана:

$$g_{\phi} = 0,0025H_{\phi}^2, \text{ млн.м}^3 \cdot \text{добу}^{-1}. \quad (86)$$

Основну небезпеку при горінні фонтана являє теплове випромінювання факела. За критичною густиною теплового потоку для особового складу і пожежної техніки, можна розрахувати граничну відстань від центра факела для їх розташування.

Факел фонтану характеризується теплотою пожежі:

$$Q_{\text{пож}} = 11,57 \cdot \eta \cdot Q_{\text{н}}'' \cdot g_{\phi}, \text{ кДж} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (87)$$

де η – коефіцієнт повноти згорання;

g_{ϕ} - дебіт фонтана, $\text{млн.м}^3 \cdot \text{добу}^{-1}$;

$Q_{\text{н}}''$ - нижча об'ємна теплота згорання газу у факелі фонтану, $\text{кДж} \cdot \text{м}^{-3}$.

При збільшенні відстані від центра факелу фонтану зменшується густина теплового потоку відповідно до наступної формули:

$$R = \sqrt{\frac{f \cdot Q_{\text{пож}}}{4 \cdot \pi \cdot q_{\text{кр}}}}, \text{ м,} \quad (88)$$

де $q_{\text{кр}}$ - критична густина теплового потоку, $\text{кВт} \cdot \text{м}^{-2}$; особовий склад без засобів захисту може працювати, якщо $q \leq 1 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$, особовий склад у бойовому одязі може працювати, якщо $q \leq 4,2 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$, пожежна техніка може

працювати, якщо $q \leq 12 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$;

f - коефіцієнт випромінювання факела фонтану даного складу ($f = 0,05 \cdot \sqrt{\mu}$), μ - молярна маса речовини, що горить, ($\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$); якщо горить суміш речовин, її молярна маса $\mu_{\text{сум}}$ розраховується з врахуванням молярних мас та часток кожного газу у суміші r_i :

$$\mu_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^z r_i \cdot \mu_i, \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}. \quad (89)$$

Відповідно, відстань від свердловини для безпечного розташування різних об'єктів можна визначити за теоремою Піфагора, див. рис. 4.1.

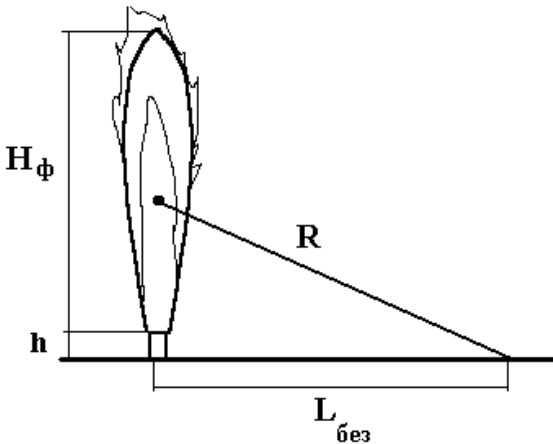


Рис. 4.1. Безпечна відстань від свердловини, що горить

$$L_{\text{безп}} = \sqrt{R^2 - \left(h + \frac{H_{\phi}}{2}\right)^2}, \text{ м}, \quad (90)$$

де h - висота зони відриву, м;

R - гранична відстань від центра факела, м;

H_{ϕ} - висота факела фонтана, м.

Індивідуальне розрахункове завдання №3

Розрахувати критичну відстань від факела газового фонтана, що горить, для особового складу та пожежної техніки.

Таблиця 4.5 - Склад газового фонтану, вибирають за другою цифрою залікової книжки

№ з/п	Компонент	Вміст компонентів										Теплота утворення ΔH_{ϕ} (кДж·моль ⁻¹)
		Номер варіанта										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1.	Метан	85	80	75	70	90	95	85	75	80	90	- 74,8
2.	Етан	5	-	15	10	-	-	-	-	5	5	- 84,68
3.	Пропан	-	10	-	-	5	-	5	10	5	-	- 103,8
4.	Бутан	5	3	-	10	-	3	5	5	-	3	- 126,0
5.	CO ₂	-	2	5	5	5	2	5	-	5	-	- 393,8
6.	N ₂	2	5	3	-	-	-	-	5	2	2	0
7.	O ₂	3	-	2	5	-	-	-	5	3	-	0

Таблиця 4.6 - Параметри газового фонтану, вибирають по третій цифрі залікової книжки

	Номер варіанта										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Дебіт газового фонтана, g_{ϕ} млн м ³ ·добу ⁻¹ .	0,1	0,3	1	0,5	0,7	0,4	1,5	2	1,8	0,2	

Коефіцієнт повноти згорання, η.	0,85	0,9	0,95	0,92	0,83	0,88	0,94	0,92	0,89	0,97
Висота зони відриву, м.	1	0,5	1,5	0	1	1,5	2,0	2,5	0	1

Методика розрахунку безпечних відстаней від фонтану, що горить

1. Скласти рівняння реакції горіння компонентів газового фонтана.

2. Визначити теплоти утворення ΔH_f° (кДж·моль⁻¹) продуктів горіння - із таблиці додатків 3, та горючих речовин - із таблиці 4.5.

3. Розрахувати нижчу молярну теплоту згоряння Q_n (кДж·моль⁻¹) компонентів газового фонтана за законом Гесса за формулою (27).

4. Розрахувати об'ємну теплоту згорання компонентів газового фонтана Q_n'' (кДж·м⁻³) за формулою (29).

5. Розрахувати об'ємну теплоту згорання газової суміші за формулою:

$$Q_{n\Gamma\Phi}'' = \frac{\sum(Q_{ni}'' \cdot \varphi_i)}{100}, \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3} \quad (91)$$

де Q_{ni}'' - нижча об'ємна теплота згорання і-го компонента газового фонтана, кДж·м⁻³;

φ_i - вміст і-го компонента газового фонтана, %.

6. Знайти висоту фонтана за формулою (85).

7. Визначити кількість тепла, що виділяється факелом за формулою (87):

8. Визначити граничну відстань від центра факела за формулою (88):

9. Визначити безпечну відстань від фонтана за формулою (90):

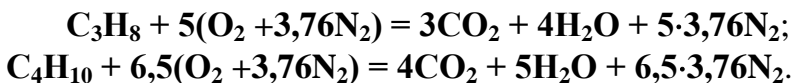
Приклад розв'язання задачі

Розрахувати критичну відстань від факела газового фонтана, що горить, для особового складу та пожежної техніки. Параметри газового фонтана наступні: склад газу - C_3H_8 – 40%; C_4H_{10} – 50%; N_2 – 7%; CO_2 – 3%; дебіт 0,1 млн. $m^3 \cdot \text{добу}^{-1}$, коефіцієнт повноти згорання 0,8; висота зони відриву 1 м.

Розв'язання

1. Горючими газами є пропан C_3H_8 і бутан C_4H_{10} .

Складаємо рівняння реакції горіння компонентів газового фонтана:



2. Визначаємо теплоти утворення продуктів горіння та горючої речовини за даними таблиць додатків №3 і №11:

$$\Delta H_{fH_2O(\text{пара})}^{\circ} = -242 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad \Delta H_{fC_3H_8}^{\circ} = -103,8 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$
$$\Delta H_{fCO_2}^{\circ} = -394 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad \Delta H_{fC_4H_{10}}^{\circ} = -126 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. Розрахуємо нижчу теплоту згорання компонентів газового фонтана:

$$C_3H_8: Q_H = |3(-394) + 4(-242) + 103,8| = 2046,2 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$
$$C_4H_{10}: Q_H = |4(-394) + 5(-242) + 126| = 2660 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

4. Розрахуємо об'ємну теплоту згорання компонентів газового фонтана:

$$C_3H_8: Q_H'' = \frac{2046 \cdot 1000}{24,5} = 83510 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$
$$C_4H_{10}: Q_H'' = \frac{2660 \cdot 1000}{24,5} = 108571 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

5. Розрахуємо об'ємну теплоту згорання газової

суміші фонтана:

$$Q_{\text{нф}}'' = \frac{83510 \cdot 40 + 108571 \cdot 50}{100} = 87689,5 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

6. Знайдемо висоту фонтана:

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

7. Визначаємо кількість тепла, що виділяється факелом:

$$Q_{\text{пож}} = 11,57 \cdot 0,8 \cdot 87689,5 \cdot 0,1 = 81165,4 \text{ кДж} \cdot \text{с}^{-1}.$$

8. Визначаємо граничну відстань від центра факела для особового складу в бойовому одязі, критична густини теплового потоку $q_{\text{кр}} = 4,2 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$. Розрахуємо середню молярну масу $\mu_{\text{сум}}$ горючої газової суміші:

$$\begin{aligned} \mu (\text{C}_3\text{H}_8) &= 12 \cdot 3 + 8 = 44 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}; \\ \mu (\text{C}_4\text{H}_{10}) &= 12 \cdot 4 + 10 = 58 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}; \\ \mu_{\text{сум}} &= 0,4 \cdot 44 + 0,5 \cdot 58 = 46,6 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}. \end{aligned}$$

Розрахуємо коефіцієнт випромінювання: $f = 0,05 \cdot \sqrt{46,6} = 0,34$
Розрахуємо граничну відстань від центра факела:

$$R = \sqrt{\frac{0,34 \cdot 81165,4}{4 \cdot 3,14 \cdot 4,2}} = 23 \text{ м.}$$

9. Розрахуємо безпечну відстань від свердловини фонтана за формулою (90):

$$L_{\text{безп}} = \sqrt{23^2 - \left(1 + \frac{6,3}{2}\right)^2} = 23,5 \text{ м.}$$

Безпечна відстань від газового фонтана, що горить, для особового складу в бойовому одязі – більше ніж 23,5 м.

4.2. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖІ В ОГОРОДЖЕННІ

Пожежі, в яких газообмін обмежений будівельними конструкціями, називаються пожежами в огороженні. Якщо приміщення має великий вільний об'єм (більше 1000 м³) або відкриті отвори значної площі, процес поширення пожежі протікає за рахунок поступового охоплення полум'ям поверхні горючих матеріалів. У приміщеннях меншого об'єму за температури 300÷350 °С вміст газоподібних продуктів розкладання досягає нижньої концентраційної межі. При цьому поширення пожежі відбувається вже не по поверхні горючого матеріалу, а по об'єму газового середовища, тобто вільний об'єм приміщення перетворюється в зону горіння (об'ємна пожежа). Звичайно це супроводжується руйнуванням скління і у приміщення починає поступати свіже повітря, що сприяє інтенсифікації горіння і розвитку пожежі.

При пожежі в огороженні тепло і дим, що виділяються під час горіння, накопичуються в приміщенні. Отже, зона теплового впливу і зона задимлення з часом змінюються. *Зона задимлення* характеризується зниженим вмістом кисню та підвищеним вмістом токсичних речовин, а зона теплового впливу характеризується критичною температурою, за якої відбуваються помітні зміни у фізичному стані матеріалу.

Для того, щоб можна було описувати, досліджувати, або порівнювати пожежі, необхідно використовувати параметри, які б характеризували різні сторони розвитку пожеж. Основними параметрами розвитку пожежі є: *площа, периметр і фронт пожежі, температура пожежі, інтенсивність газообміну*. Які в свою чергу залежать від виду горючої речовини, параметрів

приміщення, зовнішніх умов. Знання закономірностей зміни параметрів пожежі і факторів, які на них впливають, необхідно для прогнозування обстановки на пожежі та розробки заходів щодо попередження поширення пожежі та її ліквідації, забезпечення безпеки людей, які знаходяться під впливом пожежі, та для складання планів евакуації людей і матеріальних цінностей.

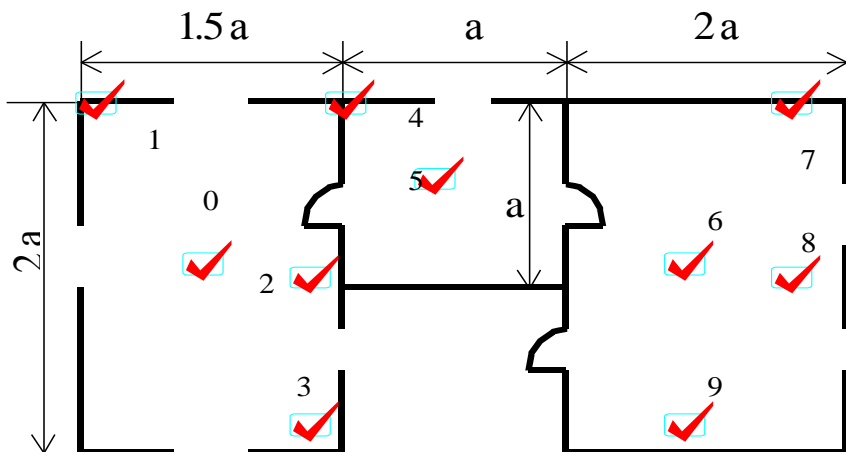
Індивідуальне розрахункове завдання №4

Розрахувати основні параметри розвитку пожежі в приміщенні:

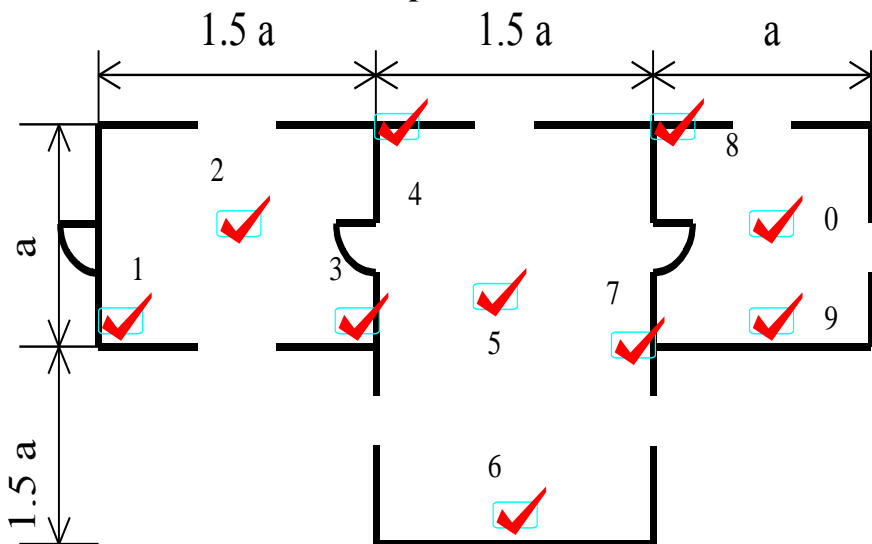
- критичний час розвитку пожежі за температурою та за вмістом кисню;
- площу, периметр та фронт пожежі на задані моменти часу вільного розвитку пожежі;
- температуру пожежі, температуру на стелі над осередком пожежі та у дверному отворі на заданий час вільного розвитку пожежі;
- висоту нейтральної зони на заданий час вільного розвитку пожежі.

Конфігурація приміщення визначається за першою цифрою номеру залікової книжки. Параметри приміщення, місце виникнення пожежі, вид горючої речовини та лінійна швидкість поширення полум'я визначаються за двома останніми цифрами номеру залікової книжки. Умови газообміну (через один або два отвори) задає викладач під час консультації.

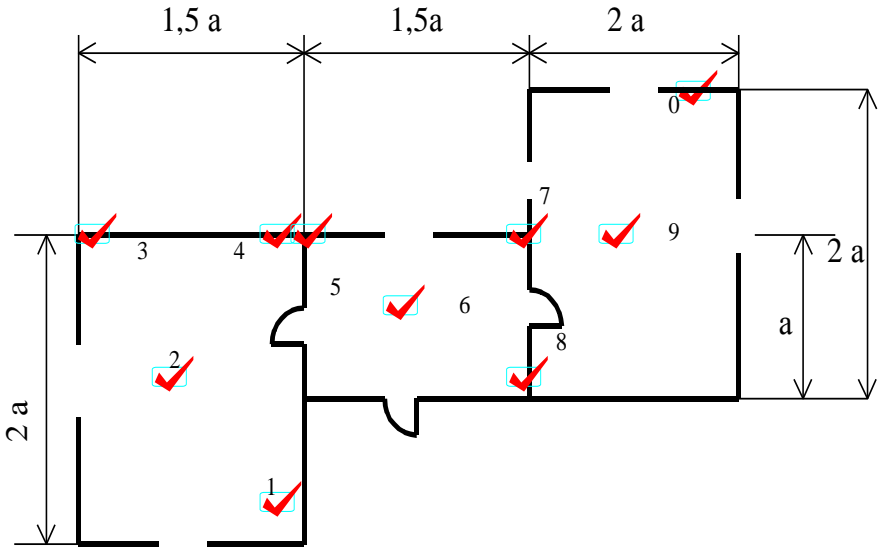
Конфігурація приміщення Варіант -«0»



Варіант -«1»



Варіант-«2»



Таблиця № 4.7 - Параметри приміщення та пожежі визначаються за другою цифрою залікової книжки

Умови задачі	Номер варіанта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Масштаб «а», м	10	8	12	7	6	11	9	13	10	14
Розміри вікон, м	1,5 х 2,1	0,9 х 2,3	1,1 х 2,0	0,9 х 1,8	0,9 х 0,6	1,6 х 2,2	1,8 х 2,3	1,6 х 2,0	1,8 х 2,1	1,6 х 2,4
Розміри дверей, м	0,8 х 2,2	0,7 х 2,1	0,9 х 2,4	1,2 х 2,3	1,1 х 2,1	1,2 х 2,0	1,3 х 2,1	1,1 х 2,4	0,9 х 2,2	0,8 х 2,3
Висота приміщення, м	4,0	4,5	3,8	5,0	4,3	2,9	3,2	3,6	3,4	4,2
Час розвитку пожежі, хв.	7 18	9 12	4 11	6 15	8 16	2 14	5 16	3 19	7 13	4 17
Лінійна швидкість поширення пожежі, м·хв⁻¹	1,5	0,9	1,1	0,6	0,9	1,3	1,0	1,2	0,8	1,4

Таблиця № 4.8 - Вид горючого матеріалу визначається за третьою цифрою залікової книжки

Номер цифри	Речовина	Номер цифри	Речовина
0	Папір	5	Каучук синтетичний
1	Бавовна	6	Поліетилен у виробках
2	Деревина у виробках	7	Волокно штапельне
3	Книги на стелажах	8	Поліпропілен у виробках
4	Гумовотехнічні вироби	9	Каучук натуральний

Таблиця № 4.9 - Місце виникнення пожежі визначається за другою та третьою цифрою залікової книжки

Друга цифра	Третя цифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
2	9	8	7	6	5	4	3	2	1	10
3	8	7	6	5	4	3	2	1	10	9
4	7	6	5	4	3	2	1	10	9	8
5	6	5	4	3	2	1	10	9	8	7
6	5	4	3	2	1	10	9	8	7	6
7	4	3	2	1	10	9	8	7	6	5
8	3	2	1	10	9	8	7	6	5	4
9	2	1	10	9	8	7	6	5	4	3
0	1	10	9	8	7	6	5	4	3	2

4.2.1. Розрахунок критичного часу розвитку пожежі за температурою та вмістом кисню

З розвитком пожежі в огороженні настає момент, коли все приміщення буде в зонами задимлення або теплового впливу, отже перебування людей стає неможливим. Такий час називають критичним часом розвитку пожежі.

Критичний час розвитку пожежі – час від виникнення горіння до настання теплового удару або зниження концентрації кисню у повітрі нижче гранично припустимих значень.

Критичний час розвитку пожежі для перебування людей у приміщенні визначається досягненням критичної температури (70°C) та зниженням концентрації кисню в повітрі приміщення до критичного значення. Відомо, що за зниження концентрації кисню в повітрі до 17% відбувається втрата свідомості, за зниження концентрації нижче 14- 15 % в організмі людини настають необоротні процеси, і може наступити смерть.

Критичний час розвитку залежить від об'єму приміщення, площі пожежі, теплоти згорання, масової швидкості вигорання, об'єму повітря, необхідного для повного згорання одиниці кількості речовини.

Якщо вважати, що нормальна життєдіяльність організму припиниться при вигоранні $21-14 = 7\%$ кисню, що відповідає $7 \cdot 4,76 = 33,32\%$ повітря за об'ємом, тоді за умов, що площа пожежі не змінюється (наприклад під час горіння рідин), час до настання критичного стану за концентрацією кисню може бути аналітично визначений як:

$$\tau_{\text{кр}}^{0_2} = \frac{0,33V_{\text{прим}}}{\eta S_{\text{пож}} v_{\text{т}}^0 v_{\text{п}}^0}, \text{ хв} \quad (25)$$

де v_m – масова швидкість вигорання горючої речовини, $(\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1})$;

η – коефіцієнт повноти згоряння;

$V_{\text{прим}}$ - повний об'єм приміщення, (м^3) ;

$S_{\text{пож}}$ - площа пожежі, (м^2) ;

$v_{\text{п}}^0$ – витрата повітря для повного згоряння, $(\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1})$.

Розрахунок часу до досягнення критичної температури у приміщенні проводиться за формулою:

$$\tau_{\text{кр}}^t = 71 \cdot \frac{V_{\text{прим}}}{\eta Q_{\text{н}}' S_{\text{пож}} v_m}, \text{ хв}, \quad (26)$$

де $Q_{\text{н}}'$ - масова теплота згоряння горючого матеріалу, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$.

При горінні твердих горючих матеріалів пожежа з часом поширюється, а площа пожежі зростає. Таким чином при горінні твердих горючих матеріалів критичний час розвитку пожежі залежить від місця виникнення пожежі, а отже і від форми розвитку пожежі.

Якщо форма розвитку пожежі – *кругова* (осередок пожежі в центрі приміщення), критичний час розвитку пожежі за температурою та вмістом кисню можна виразити наступними формулами:

$$\tau_{\text{кр}}^t = 4,5 \sqrt[3]{\frac{V_{\text{прим}}}{\eta Q_{\text{н}}' v_m (v_l^0)^2}}, \text{ хв.}, \quad (94)$$

$$\tau_{\text{кр}}^{\text{O}_2} = 0,75 \sqrt[3]{\frac{V_{\text{прим}}}{\eta v_m v_{\text{пов}} (v_l^0)^2}}, \text{ хв.}, \quad (95)$$

якщо форма розвитку пожежі – *півколо* (осередок пожежі – біля стіни):

$$\tau_{кр}^t = 5,65 \sqrt[3]{\frac{V_{прим}}{\eta Q'_н v_m (v_l^0)^2}}, \text{ хв.}, \quad (96)$$

$$\tau_{кр}^{O_2} = 0,94 \sqrt[3]{\frac{V_{прим}}{\eta v_m v_{пов} (v_l^0)^2}}, \text{ хв.}; \quad (97)$$

якщо форма розвитку пожежі – *чверть кола* (осередок пожежі знаходиться у куті приміщення):

$$\tau_{кр}^t = 7,12 \sqrt[3]{\frac{V_{прим}}{\eta Q'_н v_m (v_l^0)^2}}, \text{ хв.}, \quad (98)$$

$$\tau_{кр}^{O_2} = 1,19 \sqrt[3]{\frac{V_{прим}}{\eta v_m v_{пов} (v_l^0)^2}}, \text{ хв.}, \quad (99)$$

де v_l - лінійна швидкість поширення пожежі, м·хв⁻¹.

При розвитку пожежі в перші 10 хвилин поширення горіння відбувається із меншою швидкістю. Для розрахунків приймають, що $v_l (\tau < 10 \text{ хв}) = 0,5 \cdot v_l^0$.

Методика розрахунку критичного часу розвитку пожежі

1. Із таблиці № 13 додатків для обраної горючої речовини визначити такі параметри: v_m , $Q'_н$, η .

2. Розрахувати лінійну швидкість поширення пожежі на заданий час (v_l^0 взяти із таблиці № 4.7 завдання): $v_l = 0,5 \cdot v_l^0$.

3. Згідно варіанта завдання розрахувати об'єм приміщення $V_{прим}$.

4. Згідно варіанта завдання визначити форму розвитку пожежі при її виникненні.

5. Розрахувати критичний час розвитку пожежі за температурою і вмістом кисню, залежно від форми

розвитку пожежі, за формулами (94) - (99).

Приклад розв'язання задачі

В куті приміщення розмірами $10 \times 12 \times 3,5$ м сталося загоряння поліпропілену. Визначити критичний час розвитку пожежі за температурою і вмістом кисню.

Розв'язання

1. Для поліпропілену: $v_m = 0,87 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1}$, $\eta = 0,85$,
 $Q'_n = 45600 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$.

2. Розраховуємо лінійну швидкість поширення полум'я:

$$v_l = 0,5 \cdot 1,2 = 0,6 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}.$$

3. Розраховуємо об'єм приміщення:

$$V_{\text{прим}} = 10 \times 12 \times 3,5 = 420 \text{ м}^3.$$

4. Оскільки осередок виникнення пожежі знаходиться в куті приміщення, форма розвитку пожежі – кутова.

5. Розраховуємо критичний час розвитку пожежі за температурою і вмістом кисню для кутової форми пожежі, формули (98), (99):

$$\tau_{\text{кр}}^t = 4,7 \cdot 3 \sqrt{\frac{420}{0,85 \cdot 45600 \cdot 0,87 \cdot 0,6^2}} = 1,53 \text{ , хв};$$

$$\tau_{\text{кр}}^{\text{O}_2} = 0,749 \cdot 3 \sqrt{\frac{420}{0,85 \cdot 0,6^2 \cdot 0,87 \cdot 11,42}} = 3,9 \text{ , хв}.$$

Висновок. Таким чином, при горінні поліпропілену в заданому приміщенні критичне значення температури (70°C) настане через 1,5 хвилин, а критичний вміст кисню (15 %) – через 3,9 хвилин. Отже при виникненні пожежі за цей час слід забезпечити евакуацію людей із даного приміщення.

4.2.2. Розрахунок площі, периметру та фронту пожежі класу А на задані моменти часу

Під розвитком пожежі розуміють зміну основних параметрів пожежі в часі та просторі. Ці параметри можна не тільки виміряти, але й розрахувати та спрогнозувати їх зміну. На практиці для прогнозування розвитку пожежі приймається ряд припущень:

1. Пожежна навантага у приміщенні розподілена рівномірно.
2. Пожежа поширюється в усіх напрямках рівномірно.
3. Пожежа приймає розрахункові форми розвитку: коло, півколо, сектор або прямокутну форму.
4. Перехід з однієї форми розвитку пожежі в іншу відбувається при підході фронту пожежі до конструкцій, що огороджують.
5. Лінійна швидкість поширення пожежі залежить від часу розвитку пожежі і змінюється таким чином:
 - вільний розвиток пожежі
 - до 10-ї хвилини розвитку – 0,5 від табличного значення:

$$v_{1 \tau < 10} = 0,5 v_1^0, \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}; \quad (100)$$

- за 10-у хвилину розвитку до введення сил і засобів по гасінню пожежі приймається рівною табличному значенню:

$$v_{1 \tau > 10} = v_1^0, \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}; \quad (101)$$

- з моменту введення сил і засобів до локалізації пожежі - 0,5 табличного значення: $v_{1 \text{лок}} = 0,5 v_1^0, \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}$;
- після локалізації: $v_1 = 0$.

Фронт пожежі - це частина периметра пожежі, на якій пожежа поширюється найбільш інтенсивно. При досягненні фронтом пожежі протипожежних конструкцій, поширення пожежі припиняється на час їх вогнестійкості.

Якщо пожежа доходить до дверей, її розвиток продовжується після прогорання дверей. Для дверей звичайного виконання час затримки приймається 10 хвилин, а для протипожежних – відповідно до ступеню їх вогнестійкості.

Розрахунок прогорання дверей базується на порівнянні вільного часу розвитку $\tau_{\text{віль}}$ пожежі з часом проходження пожежі до дверей $\tau_{\text{дв}}$ в купі з часом вогнестійкості дверей (для звичайних дверей це 10 хв.). Якщо $\tau_{\text{віль}} > \tau_{\text{дв}} + 10$, то прогорання відбудеться, з'являються додаткові площа, периметр, фронт пожежі у другому приміщенні, їх розраховують по схемі розвитку від середини стіни (місця розташування дверей) відразу з повною швидкістю поширення пожежі v^0_1 .

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 $R_{10} = 0,5 v^0_1 10$, а час досягнення полум'ям дверей $\tau_{\text{дв}} = L / (0,5 v^0_1)$.

Якщо $L > R_{10}$, то час досягнення полум'ям дверей $\tau_{\text{дв}} = 10 + (L - R_{10}) / v^0_1$.

Методика розрахунку площі, периметру, фронту пожежі

1. Визначити шлях, що пройшов фронт полум'я за час вільного розвитку (радіус розвитку пожежі):

$$\text{якщо } < 10 \text{ хвилин} \quad R = 0,5 v^0_1 \tau \quad (102)$$

$$\text{якщо } \tau_{\text{розв}} > 10 \text{ хвилин} \quad R = 0,5 v^0_1 10 + v^0_1 (\tau - 10) \quad (103)$$

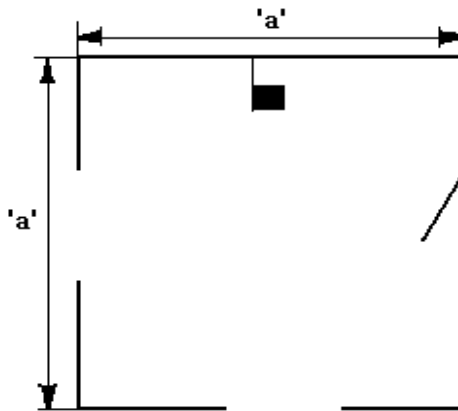
2. Визначити форму розвитку пожежі з урахуванням місця виникнення пожежі (табл. 4.9) і розмірів

приміщення (табл. 4.7).

3. Залежно від форми розвитку пожежі розрахувати площу, периметр та довжину фронту пожежі.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати параметри пожежі у приміщенні розмірами 10x10 м на 5-й і 15-й хвилині вільного розвитку пожежі при горінні поліпропілену. Розташування осередку пожежі вказано на плані; $v_1^0 = 1,5 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}$.



Розв'язання

1. За таблицею № 4.7 визначаємо лінійну швидкість поширення полум'я v_1^0 . Приймаємо $v_1^0 = 1,5 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}$.

2. На 5 хв. визначаємо радіус пожежі:

$$R = 0,5 \cdot 1,5 \cdot 5 = 3,75 \text{ м.}$$

3. Форма пожежі – півколо.

$$S_{\text{пож}} = \frac{\pi R^2}{2} = \frac{3,14 \cdot 3,75^2}{2} = 22,1 \text{ м}^2;$$

$$P_{\text{пож}} = \pi \cdot R + 2 \cdot R = 3,14 \cdot 3,75 + 2 \cdot 3,75 = 19,28 \text{ м};$$

$$\Phi_{\text{пож}} = \pi \cdot R = 3,14 \cdot 3,75 = 11,78 \text{ м.}$$

4. На 15-ту хвилину: $R = 0,5 \cdot 1,5 \cdot 10 + 5 \cdot 1,5 = 15 \text{ м.}$

5. Оскільки радіус поширення пожежі більший за розміри приміщення, то вогонь охоплює все приміщення, форма пожежі - прямокутна.

$$S_{\text{пож}} = a \cdot a = 10 \cdot 10 = 100 \text{ м}^2.$$

$$P_{\text{пож}} = 4 \cdot a = 40 \text{ м.}$$

$$\Phi_{\text{пож}} = 0 \text{ м.}$$

З'ясуємо, чи прогорять двері. Відстань до дверей:

$$L = \sqrt{5^2 + 5^2} = 7 \text{ м.}$$

Час проходження фронту пожежі до дверей становить $7 / (0,51,5) = 9,3$ хв. Фронт пожежі діє на двері $15 - 9,3 = 5,7$ хв. Оскільки вогнестійкість дверей 10 хв, то пожежа не вийде за межі приміщення.

Висновок: у даному приміщенні при горінні поліпропілену й розташуванні вогнища пожежі біля середини стіни на 5 хвилину пожежа має розрахункову форму «півколо» і наступні параметри: площа $S_{\text{пож}} = 22,1 \text{ м}^2$, периметр $P_{\text{пож}} = 19,3 \text{ м}$, фронт $\Phi_{\text{пож}} = 11,8 \text{ м}$;

на 15 хвилину пожежа доходить до всіх стін і дверей, але двері не прогоряють, тому пожежа приймає розрахункову форму «прямокутник», що відповідає розмірам одного приміщення, і наступні параметри: площа $S_{\text{пож}} = 100 \text{ м}^2$, периметр $P_{\text{пож}} = 40 \text{ м}$, фронт $\Phi_{\text{пож}} = 0 \text{ м}$.

4.2.3. Визначення температури пожежі та висоти нейтральної зони на заданий час розвитку пожежі

Кількісною характеристикою зміни тепловиділення на пожежі, залежно від умов горіння, є температурний режим.

Під температурним режимом пожежі розуміють зміну температури пожежі в часі. За температуру пожежі в огороженні приймають середньооб'ємну температуру газового середовища у приміщенні, в якому відбувається пожежа.

Температура пожежі в огороженні суттєво залежить від об'єму приміщення, часу розвитку, площі пожежі, кількості пожежної навантаги, виду горючої речовини (теплоти згорання речовини, масової швидкості вигорання речовини, швидкості поширення горіння), інтенсивності газообміну, тепловтрат на нагрівання конструкцій, температури повітря, що надходить в приміщення та ін. Якщо повітрообмін у приміщенні не обмежений, то інтенсивність горіння збільшується, зростає температура в зоні реакції горіння. З іншого боку, це повітря має достатньо низьку температуру, тому температура пожежі може падати. Який саме з цих двох факторів буде впливовішим, залежить від конкретної ситуації.

Газообмін на пожежі має вирішальне значення у забезпеченні безпеки людей, що знаходяться в середині приміщення, і забезпеченні умов для організації і проведенні бойових дій з їх рятування та гасіння самої пожежі.

При пожежі в огороженні залежно від умов газообміну в 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.

Визначення рівня нейтральної зони при пожежі в огороженні необхідно для організації евакуації людей, роботи особового складу в зоні задимлення з використанням індивідуальних засобів захисту.

Основними *способами регулювання газообміну* під час пожежі в огороженні можуть бути:

- зниження тиску у верхній частині приміщення шляхом відкачки нагрітих продуктів згоряння пересувними димовсмоктувачами і використання систем вентиляції для примусового видалення диму;
- розкриття витяжних отворів у зоні, де створюється максимальна температура і тиск продуктів горіння. Для цього зазвичай розкривають димові та аераційні люки у верхній частині приміщення;
- зниження температури і тиску продуктів горіння за допомогою тонкорозпилених струменів води;
- регулювання співвідношення площі припливних і витяжних отворів. За збільшення площі витяжних отворів відбувається підвищення рівня нейтральної зони, поліпшується процес аерації приміщення. Нейтральна зона завжди розташовується ближче до тих отворів, площа яких більше;
- підвищення тиску повітря в нижній частині приміщення нагнітанням чистого повітря в нижню частину приміщення пересувними пожежними димовсмоктувачами.

Найбільш простою моделлю розрахунку температурного режиму пожежі в приміщенні є *інтегральна модель*, яка припускає, що тепло пожежі витрачається на нагрівання продуктів горіння і рівномірно розподілено по об'єму приміщення. З деякими припущеннями цю модель можна використовувати при розрахунку температурного режиму пожежі в огороженні

на будь-який момент її розвитку. Використовують спрощення:

1. Все тепло пожежі рівномірно розподілено по об'єму приміщення і витрачається на нагрівання газового середовища та будівельних конструкцій.
2. Осередок пожежі – в центрі підлоги приміщення.
3. Температура лінійно збільшується по висоті, і зменшується при віддаленні від центру приміщення. Середньооб'ємна температура визначається в геометричному центрі приміщення.

Розрахунок $T_{\text{пож}}$ ґрунтується на рівнянні теплового балансу пожежі, який враховує, що тепло пожежі витрачається на нагрів: 1) продуктів горіння, які видаляються з приміщення, $Q'_{\text{пг}}$; 2) продуктів горіння, які залишаються в приміщенні $Q''_{\text{пг}}$ (саме $Q''_{\text{пг}}$ і визначає температуру пожежі); 3) будівельних конструкцій, $Q_{\text{БК}}$; 4) на підготовчі процеси в горючому матеріалі, $Q_{\text{підг}}$; 5) на випромінювання за межі приміщення $Q_{\text{випр.}}$.

Значення температури пожежі у першому наближенні можна розрахувати за формулою стандартного температурного режиму пожежі, якщо час вільного розвитку більший за 10 хв:

$$t = 55 \lg (8 \tau_{\text{пож}} + 1), \text{ } ^\circ\text{C} \quad (104)$$

$$t = 345 \lg (8 \tau + 2), \text{ } ^\circ\text{C} \quad (105)$$

де τ - час розвитку пожежі, хв. $\tau = \tau_{\text{пож}} - 10$, хв.

Більш точно температуру пожежі на заданий час її вільного розвитку можна оцінити за відповідною площею пожежі по відношенню до площі підлоги:

$$T_{\text{пож}} = 298 + 1200 \frac{S_{\text{пож}}}{S_{\text{підл}}}, \text{ К.} \quad (106)$$

За допомогою критеріальних рівнянь теплового балансу пожежі в огорожі температура пожежі на будь-який момент розвитку визначається як добуток адиабатичної температури горіння $T_{ад}$:

$$T_{пож\ \tau} = \Theta T_{ад} = 0.66 T_{ад} \left(\frac{\eta S_{пож} v_m C_p v_{пг}}{60 \sigma_o \varepsilon_{пр} S_{огор} T_{ад}^3} \right)^{0.17}, \text{ К}, \quad (107)$$

де σ_o - постійна Больцмана, $5.76 \cdot 10^{-11}$ кВт/(м К); $S_{огор}$ - загальна площа огорожуючих конструкцій, м²; $v_{пг}$ - питомий об'єм ПГ, м³/кг; $\varepsilon_{зв.}$ - приведена ступінь чорноти; C_p - теплоємність ПГ, кДж/(м³ К). Θ - безрозмірний коефіцієнт, що враховує втрати тепла теплопровідністю і на нагрів навколишніх конструкцій тепловим випромінюванням.

Відповідно до положень інтегральної моделі пожежі можна розрахувати значення температури в заданих точках приміщення на заданий час вільного розвитку пожежі за формулою:

$$T_{x,y,\tau} = T_{\tau} \left(0,8 + 0,2 \frac{y}{y_0} \right) \left(1,33 - \frac{x}{2x + x_0} \right), \text{ К} \quad (108)$$

де $x_0 = 0,25 l$, $y_0 = 0,5h$.

При розрахунках приймають, що розкриваються всі отвори, які потрапляють у зону горіння до 10 хвилини пожежі. Після десятої хвилини пожежі в приміщенні руйнуються всі вікна внаслідок контрасту температур.

В разі розташування отворів на різних рівнях, на приплив працюють нижні отвори, а на виток продуктів

горіння – верхні (газообмін через два отвори). Якщо отвори знаходяться на одному рівні, на приплив повітря працює лише їх нижня частина - 1/3 площі всіх відкритих отворів:

$S_{\text{прип}} = \frac{S_{\text{отв}}}{3}$, м² (газообмін через один отвір). Висоту нейтральної зони для цих випадків газообміну можна розрахувати за формулами:

газообмін через один отвір:

$$h_{\text{нз}} = \frac{h_{\text{отв}}}{1 + \sqrt[3]{\frac{T_{\text{пож}}}{T_0}}}, \text{ м}; \quad (109)$$

газообмін через два отвори:

$$h_{\text{нз}} = \frac{H}{\left(\frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{вит}}}\right)^2 \frac{T_{\text{пож}}}{T_0} + 1} + 0,5h_{\text{пр}}, \quad (110)$$

де $h_{\text{отв}}$ – висота отвору, через який здійснюється газообмін, м;

$T_{\text{пож}}$ – температура пожежі в приміщенні, К;

T_0 – температура навколишнього повітря, К;

$S_{\text{пр}}$ – площа припливного отвору, м²;

$S_{\text{вит}}$ – площа витяжного отвору, м²;

H – висота між центрами припливного і витяжного отворів, м.

Методика розрахунку температури пожежі та висоти нейтральної зони

1. Із таблиць № 4.7 і № 4.8 для визначеного варіанта завдання виписати розміри приміщення, вікон, дверей, час розвитку пожежі, вид горючої речовини, лінійну швидкість поширення горіння.

2. Для заданої горючої речовини з таблиці № 13 додатків виписати параметри:

v_m^0 - масова швидкість вигорання, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1}$;

Q_n^0 - нижча теплота згорання речовини, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$;

$v_{\text{п}}^0$ - питомий теоретичний об'єм повітря, $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$;

$v_{\text{пр}}^0$ - питомий теоретичний об'єм продуктів згорання, $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$;

η - коефіцієнт повноти згорання.

3. Розрахувати радіус пожежі $R_{\text{пож}}$ на задані моменти часу, формули (102), (103).

4. Залежно від форми розвитку пожежі розрахувати площу пожежі $S_{\text{ПОЖ}}$ на задані моменти часу.

5. Визначити загальну площу розкритих отворів і площу отворів, що працюють на приплив повітря.

6. Визначити коефіцієнт надлишку повітря за номограмою (додаток 18).

6.1. Розрахувати співвідношення $S_{\text{ПОЖ}}/S_{\text{ПДЛ}}$ і $S_{\text{ПРИП}}/S_{\text{ПОЖ}}$.

6.2. За значенням $S_{\text{ПОЖ}}/S_{\text{ПДЛ}}$ визначити тип кривої (суцільна або пунктирна), а за значенням $S_{\text{ПРИП}}/S_{\text{ПОЖ}}$ – номер кривої.

Для зручності всі необхідні дані занести в таблицю.

Час, хв.	$S_{\text{ПОЖ}}$	$S_{\text{ПРИП}}$	$S_{\text{ПРИП}}/S_{\text{ПОЖ}}$	$S_{\text{ПОЖ}}/S_{\text{ПДЛ}}$	Тип і номер кривої	α

6.3. На осі абсцис номограми знайти значення питомого теоретичного об'єму повітря $v_{\text{п}}^0$, від якого провести вертикаль до перетину із визначеною кривою. На осі ординат

визначити значення коефіцієнта надлишку повітря.

7. Розрахувати питомий дійсний об'єм продуктів згоряння з урахуванням надлишку повітря за формулою(19).

8. Розрахувати приведену масову швидкість вигорання речовини v_m . Масова швидкість вигорання речовини змінюється залежно від часу розвитку пожежі:

$$v_m = v_m^0 \left(0,3 + 0,7 \sqrt{\frac{\tau_{\text{пож}}}{30}} \right), \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1}, \quad (111)$$

де $\tau_{\text{пож}}$ - час розвитку пожежі, хв.

9. Визначити $T_{\text{пож}}$ у першому наближенні за формулами (104), (105) або (106):

10. Розрахувати об'ємну теплоємність газового середовища в приміщенні під час пожежі:

$$c_p = 1,25 + \left(0,12 + \frac{0,1}{0,25 + \alpha} \right) \frac{T_{\text{пож}}}{1000}, \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}, \quad (112)$$

де α - коефіцієнт надлишку повітря;

$T_{\text{пож}}$ - температура пожежі, К.

11. Розрахувати значення приведеного ступеня чорноти системи "полум'я - поверхня будівельної конструкції":

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1 + 0,0022 \cdot t_{\text{пож}}}, \quad (113)$$

де $t_{\text{пож}}$ - температура пожежі, °С.

12. Визначити повну поверхню теплообміну. У якості поверхні теплообміну приймають поверхню конструкцій, що огорожують пожежу, $S_{\text{ОГОР}}$, яка визначається як сума

поверхонь стін, підлоги і стелі, які сприймають тепловий потік. Якщо пожежа відбувається в декількох суміжних приміщеннях, то площу конструкцій, що огороджують, можна визначати як суму площ конструкцій кожного приміщення:

$$S_{\text{огор}} = \sum_{i=1}^n S_{\text{огор},i}, \text{ м}^2. \quad (114)$$

13. Розрахувати адіабатичну температуру горіння:

$$T_{\text{ад}} = \frac{\eta Q_{\text{н}}'}{c_p \nu_{\text{шт}}} + 273, \text{ К}. \quad (115)$$

14. Розрахувати температуру пожежі в приміщенні на заданий час розвитку за формулою (107).

15. Провести порівняння розрахованої температури пожежі з попередньо розрахованими значеннями температури пожежі в першому наближенні. При розбіжності більше 10% необхідно задатися новим значенням температури і повторити розрахунок. При цьому отримане значення температури пожежі приймають за друге наближення.

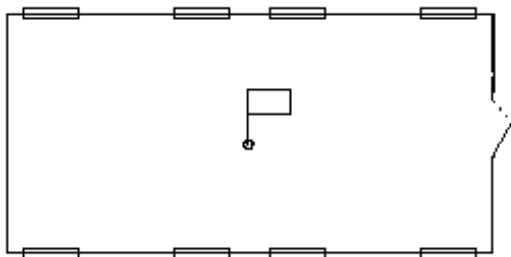
16. Для розрахунку температури пожежі у довільно визначеній точці визначити координати x і y цієї точки приміщення. Початок відліку ведуть від осередку пожежі (в центрі підлоги за інтегральною моделлю).

17. Розрахувати значення температури в заданих точках приміщення на заданий час вільного розвитку пожежі за формулою (108).

18. Розрахувати висоту нейтральної зони за формулами (109) або (110).

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати температуру пожежі та температуру на рівні середини дверей приміщення бібліотеки розміром $48 \cdot 24 \cdot 4,2$ м на 9-й і 15-й хвилинах пожежі. Газообмін у приміщенні може здійснюватись через 8 віконних отворів $3 \cdot 1,8$ м та відкритий дверний отвір $1,8 \cdot 2,2$ м. Вікна та двері розташовані у приміщенні на одному рівні. Осередок пожежі та отвори показано на плані. Прийняти лінійну швидкість поширення горіння $1,25 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}$.



Розв'язання

1. З таблиці 13 додатків для книг в стелажах виписуємо:

$$v_m^0 = 0,438 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1}; \quad Q_n^/ = 13400 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1};$$

$$v_n^0 = 3,95 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}; \quad v_{nr}^0 = 4,64 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}; \quad \eta = 0,97.$$

2. Розраховуємо радіуси поширення пожежі $R_{\text{ПОЖ}}$, на 9-й і 15-й хвилині вільного розвитку:

$$\text{на 9-й хв.: } R_{\text{ПОЖ}(9)} = 0,5 \cdot 1,25 \cdot 9 = 5,6 \text{ м.}$$

$$\text{на 15-й хв.: } R_{\text{ПОЖ}(15)} = 0,5 \cdot 1,25 \cdot 10 + 1,25 \cdot (15 - 10) = 12,5 \text{ м.}$$

3. Будуємо план розвитку пожежі і залежно від форми розвитку пожежі розраховуємо площу пожежі $S_{\text{ПОЖ}}$ на задані моменти часу.

На 9-й хвилині фронт пожежі не дійшов до стін, форма розвитку пожежі – кругова. Площа пожежі:

$$S_{\text{ПОЖ}(9)} = \pi R^2 = 3,14 \cdot 5,6^2 = 98,5 \text{ м}^2.$$

На 15-й хвилині фронт пожежі дійшов до стін приміщення, отже форма розвитку пожежі прямокутна. Площа пожежі на 15-й хвилині:

$$S_{\text{ПОЖ}(15)} = b \cdot 2R = 24 \cdot 2 \cdot 12,5 = 600 \text{ м}^2.$$

4. Визначаємо загальну площу розкритих отворів і площу отворів, що працюють на приплив. Вважаємо, що двері і вікна знаходяться на одному рівні.

На 9-й хвилині пожежа не дійшла до вікон, вважаємо, що газообмін здійснюється тільки через відкриті двері. Площа дверного отвору дорівнює:

$$S_{\text{ДВ}} = 1,8 \cdot 2,2 = 3,96 \text{ м}^2.$$

Площа отвору, що працює на приплив:

$$S_{\text{ПРИП}(9)} = 3,96 : 3 = 1,32 \text{ м}^2.$$

На 10-й хвилині пожежі внаслідок підвищення середньооб'ємної температури в приміщенні бібліотеки зруйнувались всі віконні отвори. Тому на 15-й хвилині загальна площа отворів, що розкрилися, дорівнює:

$$S_{\text{ВІКОН}} = 8 \cdot 3 \cdot 1,8 = 43,2 \text{ м}^2.$$

Ці отвори разом з дверима нижньою третиною власної площини працюють на приплив повітря. Площа отворів, що працюють на приплив:

$$S_{\text{ПРИП}(15)} = (43,2 + 3,96) : 3 = 15,7 \text{ м}^2.$$

5. Визначаємо коефіцієнт надлишку повітря за допомогою номограми:

$$S_{\text{ПІДЛОГИ}} = 24 \cdot 48 = 1152 \text{ м}^2.$$

Складаємо таблицю:

Час, хв.	Площа пожежі, м ²	Площа припливу, м ²	$\frac{S_{\text{прип}}}{S_{\text{пож}}}$	$\frac{S_{\text{пож}}}{S_{\text{підл}}}$	Тип, номер кривої	α
9	98,5	1,32	0,013	0,09	пунктирна, №1	2,8
15	600	15,7	0,026	0,52	суцільна, №1	2,5

6. Розраховуємо фактичний питомий об'єм продуктів згоряння:

$$V_{\text{пг}}(9) = 4,64 + 3,95 \cdot (2,8 - 1) = 12,1 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1};$$

$$V_{\text{пг}}(15) = 4,64 + 3,95 \cdot (2,5 - 1) = 10,8 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

7. Розраховуємо приведену масову швидкість вигорання речовини:

$$v_{\text{м}}(9) = 0,438 \cdot \left(0,3 + 0,7 \sqrt{\frac{9}{30}} \right) = 0,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1};$$

$$v_{\text{м}}(15) = 0,438 \cdot \left(0,3 + 0,7 \sqrt{\frac{15}{30}} \right) = 0,35 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1}.$$

8. Визначасмо температуру пожежі у першому наближенні.

на 9-й хвилині: $t_{\text{пож}}(9) = 55 \lg(8 \cdot 9 + 1) = 102,5 \text{ } ^\circ\text{C};$

$$T_{\text{пож}}(9) = 375,5 \text{ К};$$

на 15-й хвилині: $t_{\text{пож}}(15) = 345 \lg(8(15 - 10) + 2) = 560 \text{ } ^\circ\text{C};$

$$T_{\text{пож}}(15) = 833 \text{ К}.$$

9. Розраховуємо об'ємну теплоємність середовища у приміщенні:

$$c_p(9) = 1,25 + \left(0,12 + \frac{0,1}{0,25 + 2,8} \right) \frac{375,5}{1000} = 1,256 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1};$$

$$c_p(15) = 1,25 + \left(0,12 + \frac{0,1}{0,25 + 2,5} \right) \frac{833}{1000} = 1,261 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}.$$

10. Розраховуємо значення приведенного ступеня чорноти полум'я:

$$\varepsilon_{\text{пр}}(9) = \frac{1}{1 + 0,0022 \cdot 102,5} = 0,82;$$

$$\varepsilon_{\text{пр}}(15) = \frac{1}{1 + 0,0022 \cdot 560} = 0,45.$$

11. Розраховуємо площу поверхонь, що огорожують зону горіння та сприймають тепловий потік:

$$S_{\text{ОГОР}} = 2 \cdot (48 \cdot 24 + 48 \cdot 4,2 + 24 \cdot 4,2) = 2908,8 \text{ м}^2.$$

12. Розраховуємо адіабатичну температуру горіння на 9-й і 15-й хвилині:

$$T_{\text{ад}(9)} = \frac{0,97 \cdot 13400}{1,256 \cdot 12,1} + 273 = 1067 \text{ К.}$$

$$T_{\text{ад}(15)} = \frac{0,97 \cdot 13400}{1,261 \cdot 10,8} + 273 = 1228 \text{ К.}$$

13. Розраховуємо значення температури пожежі на 9-й і 15-й хвилині:

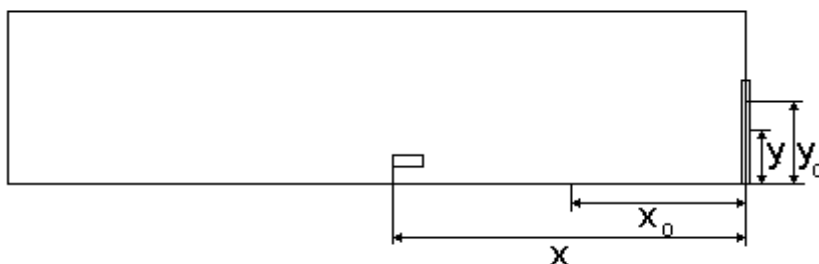
$$T_{\text{пож}}(9) = 18,1 \cdot 1067 \cdot \left(\frac{0,97 \cdot 98,5 \cdot 0,3 \cdot 1,256 \cdot 12,1}{0,82 \cdot 29088 \cdot 1067^3} \right)^{0,17} = 459 \text{ К.}$$

$$T_{\text{пож}}(15) = 18,1 \cdot 1228 \cdot \left(\frac{0,97 \cdot 600 \cdot 0,35 \cdot 1,261 \cdot 10,8}{0,45 \cdot 29088 \cdot 1228^3} \right)^{0,17} = 836 \text{ К.}$$

14. Отримана температура для 9 хвилини пожежі виходить за межі допустимої похибки 10 % у порівнянні із значенням температури, яке прийняли у першому наближенні п.8, тому отримане значення $T_{\text{ПОЖ}}(9) = 459 \text{ К}$ приймаємо за температуру пожежі у другому наближенні і повторюємо розрахунок, починаючи з п.9. Отримана температура для 15 хвилини пожежі потрапляє в межі допустимої похибки, тому приймаємо $T_{\text{ПОЖ}}(15) = 836 \text{ К}$ за фактичну температуру пожежі.

15. Результати другої ітерації $T_{\text{ПОЖ}}(9) = 430 \text{ К}$ потрапляють у межі допустимої похибки, тому використовуємо у подальших розрахунках як фактичну температуру пожежі на 9 хвилині вільного розвитку.

16. Визначаємо безрозмірні координати заданої точки X, Y – посередині висоти дверного отвору, відносно X_0, Y_0 – центр половини приміщення.



Точка $X = 24 \text{ м}$; $Y = 1,1 \text{ м}$.

Точка $X_0 = 48 \cdot 0,25 = 12 \text{ м}$. $Y_0 = 4,2 \cdot 0,5 = 2,1 \text{ м}$.

17. Розраховуємо значення температури у площині дверного отвору на 9-й і 15-й хв. розвитку пожежі:

$$T_{x,y,(9)} = 430 \cdot \left(0,8 + 0,2 \frac{1,1}{2,1} \right) \cdot \left(1,33 - \frac{24}{2 \cdot 24 + 12} \right) = 362 \text{ К};$$

$$T_{x,y,(15)} = 836 \cdot \left(0,8 + 0,2 \frac{1,1}{2,1} \right) \cdot \left(1,33 - \frac{24}{2 \cdot 24 + 12} \right) = 698 \text{ К}.$$

18. Розраховуємо висоту нейтральної зони.

На 9-й хвилині розвитку пожежі повітрообмін здійснюється через один отвір:

$$h_{\text{НЗ}}(9) = \frac{2,2}{1 + \sqrt[3]{\frac{430}{293}}} = 1,02 \text{ м}.$$

На 15-й хвилині розвитку пожежі газообмін здійснюється через отвори, що лежать на одному рівні:

$$h_{\text{НЗ}}(15) = \frac{2,2}{1 + \sqrt[3]{\frac{836}{293}}} = 0,91 \text{ м}.$$

Висновок. Таким чином, на 9-й хвилині вільного розвитку пожежі в заданому приміщенні середньооб'ємна температура газового середовища становить 157 °С, температура на рівні середини дверного отвору 89 °С, а висота нейтральної зони становить 1,02 метра. На 15-й хвилині вільного розвитку температура пожежі зросла до 563 °С, температура на рівні середини дверного отвору піднялась до 425 °С, а висота нейтральної зони знизилась

до 0,91 метра.

РОЗДІЛ 5. ЗАПОБІГАННЯ ТА ПРИПИНЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ

5.1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПОЖЕЖОГАСІННЯ

Горіння виникає, коли є горюче середовище та джерело запалювання з достатньою температурою і енергією, тобто якщо тепловиділення хімічної реакції більше за тепловтрати в навколишнє середовище, фактична концентрація пари або газу потрапляє в область між нижньою та верхньою концентраційною межею поширення полум'я, для рідин – в область між нижньою та верхньою температурною межею поширення полум'я, енергія джерела запалювання більша за мінімальну енергію запалювання, температура зони горіння більша за критичну. Поза граничних значень цих параметрів процес горіння існувати не може.

Якщо створити умови для зменшення тепловиділення реакції горіння або для збільшення тепловтрат, можна досягти *температуру погасання*, нижче якої горіння неможливе. Для погасання температуру зони горіння необхідно знизити на певну величину $T_{\text{пог}} = T_{\text{ад}} - \Delta T$:

$$\text{для дифузійного полум'я:} \quad \Delta T = \frac{3RT_{\text{ад}}^2}{E_{\text{акт}}},$$

$$\text{для кінетичного полум'я:} \quad \Delta T = \frac{RT_{\text{ад}}^2}{E_{\text{акт}}}.$$

Для досягнення температури погасання і припинення горіння використовують наступні прийоми: охолодження, розбавлення, ізоляція, інгібування. При цьому подача вогнегасного засобу може здійснюватись в об'єм або на

поверхню середовища, що захищається.

Охолоджувати можна зону горіння розпорошеною водою або поверхню речовин компактним струменем води. Охолодження водою або твердою вуглекислою частіше використовують для гасіння пожеж класу А.

Розбавлювати можна негорючим газом зону горіння або пароповітряний простір апарату, а також горючі рідини негорючими (наприклад спирти водою). Розбавлення негорючими газами повітряного простору приміщення на першій стадії пожеж класів А, В, С, Е в деяких державах є головним прийомом пожежогасіння.

Ізоляція досягається при відокремлюванні однієї з умов, необхідних для горіння. Піною при горінні рідин ізолюють горючу пару від зони горіння. Ковдрою ізолюють окисник від зони горіння. Ізоляція піною є головним прийомом пожежогасіння пожеж класу В. Ізоляція порошками спеціального призначення є головним способом пожежогасіння пожеж класів D (метали) та А1 в режимі гетерогенного горіння (тління).

Інгібування – це гальмування хімічної реакції горіння за рахунок введення у зону горіння інгібіторів, які збільшують енергетичні витрати на початок хімічної реакції. Для цього використовують хладони, порошки загального призначення, вогнегасні аерозолі.

Вимоги до вогнегасних засобів:

1. Висока вогнегасна здатність за малої витрати.
2. Безпечність для людей, природи, обладнання.
3. Простота та зручність подачі в осередок пожежі.
4. Можливість тривалого зберігання без зміни властивостей.
5. Економічність, дешевизна, доступність та великі запаси.

Забороняється застосовувати вогнегасні засоби, якщо вони реагують:

- з горючою речовиною та приймають участь у горінні

- (наприклад CO_2 при контакті з металами, що горять);
- з горючою речовиною з утворенням вибухонебезпечних продуктів (наприклад N_2 при контакті з металами, що горять);
 - з негорючими речовинами з утворенням горючих речовин (наприклад, при подачі води у приміщення, де зберігався карбід кальцію, внаслідок реакції цих речовин виділяється вибухонебезпечний ацетилен);
 - розкладаються з утворенням горючих речовин (наприклад, при контакті води з металами, що горять, вона розкладається з вибухом: $2\text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_2 + \text{O}_2$).

Параметри пожежогасіння:

Час гасіння $\tau_{\text{гас}}$ – час від початку подачі вогнегасної речовини до припинення горіння.

Вогнегасна ефективність E тим більша, чим менша концентрація вогнегасної речовини необхідна для припинення горіння.

Загальна кількість вогнегасної речовини на гасіння m , (кг, л, м^3).

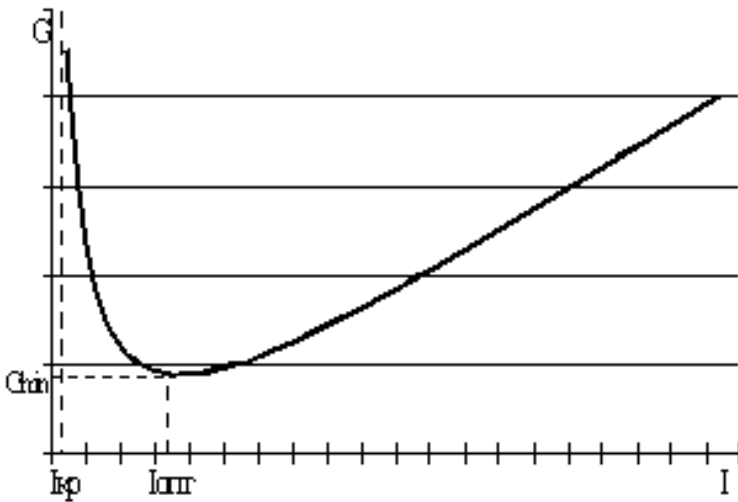
Загальна витрата G вогнегасної речовини під час гасіння на одиницю розрахункового параметра пожежі (фронт, площа, периметр, об'єм).

Питома витрата g вогнегасної речовини в одиницю часу гасіння.

Інтенсивність подачі I вогнегасного засобу в одиницю часу на одиницю об'єму, периметру, площі або фронту пожежі:

- *критична інтенсивність* $I_{\text{кр}}$ – за якої гасіння ще не може бути досягнуто;
- *оптимальна* $I_{\text{опт}}$ – за якої витрата вогнегасного засобу найменша;
- *теоретична* $I_{\text{теор}}$ – з теоретичних можливостей і умов припинення горіння;

- *нормативна* $I_{\text{норм}}$ – за статистичною обробкою результатів гасіння даною вогнегасною речовиною, наведена в довіднику [6];



- *фактична* $I_{\text{факт}}$ – що отримана на даній пожежі.

Визначають *коефіцієнт використання* вогнегасного засобу за порівнянням фактичної і теоретичної інтенсивності подачі: $K_{\text{вик}} = I_{\text{т}}/I_{\text{ф}}$; та *коефіцієнт втрат* за порівнянням з нормативною інтенсивністю подачі: $K_{\text{втр}} = I_{\text{ф}}/I_{\text{н}}$.

5.2. ЗАПОБІГАННЯ ТА ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ НЕГОРЮЧИМИ ГАЗАМИ

Припинення горіння шляхом введення в зону реакції негорючих речовин є одним із найбільш ефективних засобів гасіння та попередження пожеж. Негорючі гази знаходять широке застосування при гасінні пожеж у приміщеннях. Особливо ефективно їх застосування для захисту музейних приміщень, архівів, бібліотек, обчислювальних центрів та інших особливо важливих об'єктів, де найбільш пріоритетною задачею є максимально можливе збереження матеріальних цінностей.

Якщо за фіксованого співвідношення вмісту пального й окислювача до їх суміші додати інертні гази, то концентрація компонентів горючої суміші зменшиться. Це призведе до зниження швидкості реакції окиснення в зоні горіння і зменшення інтенсивності тепловиділення, а, отже, і знизить температуру в зоні реакції. За деякої критичної концентрації розріджувача температура в зоні горіння може зменшитися аж до температури погасання, що призведе до припинення горіння.

При введенні інертних газів відбувається також втрата частини тепла, що виділяється, на нагрів цих розріджувачів від початкової температури до температури зони горіння. Тому чим більша теплоємність негорючого газу, тим більша його вогнегасна ефективність. Припинення горіння полум'я методом розбавлення

Більш ефективні наступні *гази розріджувачі* – CO_2 , N_2 , Ar, пара H_2O , димові і вихлопні гази. Цінні архіви, музеї гасять сумішами: склад Inergen - CO_2 10%, N_2 50%, Ar 40% або склад Conar (CO_2 50%, N_2 40%, Ar 10%).

Найменшу концентрацію негорючого газу, за якої

припиняється полум'яне горіння, називають вогнегасною. Але умова повної неможливості горіння досягається за дещо більшої концентрації негорючого газу у горючій суміші. При введенні в горючу суміш негорючих газів, область вибухонебезпечних концентрацій звужується. За деякої концентрації негорючого газу нижня та верхня концентраційні межі поширення полум'я отримують однакові значення, а область вибухонебезпечних концентрацій для такої суміші зникне. Така умова є точкою флегматизації, а відповідна концентрація негорючого газу є флегматизуючою.

Флегматизація це запобігання утворення горючого середовища в газовому просторі апаратів або помешкань за допомогою газів-розріджувачів.

Мінімальна флегматизуюча концентрація $\phi_{\text{фл}}$ – це найменша концентрація негорючого газу в стехіометричній суміші горючого та окисника, за якої суміш нездатна до поширення полум'я.

Негорючі гази подають:

1. У повітряну зону при пожежі закритих технологічних апаратів і помешкань середніх об'ємів - для припинення горіння і запобігання вибухів.

2. У зону горіння - для гасіння речовин, що горять на відкритому просторі.

3. У горючу речовину - для зниження інтенсивності і температури її горіння або для запобігання запалювання.

Переваги газового пожежогасіння: майже не пошкоджує матеріали і обладнання, що захищаються; оперативність при використанні; можливість тривалої експлуатації в автоматичному режимі; знижені вимоги до профілактики при обслуговуванні; можна використовувати при гасінні пожеж класу В, С, Е та А1 в початковій стадії розвитку.

Недоліки об'ємного гасіння негорючими газами:

- ◆ витрата газу становить приблизно двократний об'єм приміщення, тому використовується для гасіння пожеж у приміщеннях з обмеженим об'ємом;
- ◆ для гасіння потрібні велика кількість балонів, витрати на їх обслуговування та приміщення для їх розташування;
- ◆ вогнегасна концентрація в 3 – 5 разів вище, ніж безпечна для людей, тому необхідна сигналізація, витяжна вентиляція, засоби захисту органів дихання;
- ◆ не рекомендується застосовувати газове пожежогасіння для волокнистих, сипучих і пористих матеріалів, які можуть тліти; хімічних речовин, здатних окислюватися без доступу повітря; пірофорних матеріалів. Висока температура горіння металів не дозволяє використовувати CO_2 та N_2 . Метали можуть горіти в атмосфері CO_2 . Азот з металами утворює вибухонебезпечні азиди.

Для гасіння пожеж необхідно правильно розрахувати загальну кількість вогнегасного засобу; при цьому витрата вогнегасного засобу G повинна бути мінімальною, час гасіння τ - не більш допустимого, а інтенсивність подачі I – оптимальною.

Критична витрата негорючого газу на процес гасіння залежить від параметрів пожежі і, зокрема, від часу її вільного розвитку й умов газообміну, що впливають на витрату продуктів горіння, які витікають.

Індивідуальне розрахункове завдання №5

Визначити основні параметри гасіння пожежі горючої рідини у приміщенні за допомогою негорючих газів: вогнегасну концентрацію даного флегматизатора $\varphi_{\text{фл}}$, мінімальну вибухонебезпечний вміст кисню, $\varphi_{\text{МВВК}}^{\text{O}_2}$, безпечну концентрацію кисню, $\varphi_{\text{без}}^{\text{O}_2}$, питому витрату подачі негорючого газу, критичну $g_{\text{НГ}}^{\text{кр}}$ і оптимальну $g_{\text{НГ}}^{\text{опт}}$, інтенсивність подачі негорючого газу (критичну і оптимальну) $I_{\text{НГ}}$; час гасіння (оптимальний) $\tau_{\text{гас}}$, загальну витрату негорючого газу на гасіння $G_{\text{НГ}}$, загальну масу негорючого газу на гасіння $m_{\text{НГ}}$.

Схему приміщення і його розміри взяти з індивідуального завдання №4, горючу рідину і значення температури повітря з індивідуального завдання №1.

Вид вогнегасної речовини та коефіцієнт надлишку повітря α визначається за першою цифрою залікової книжки із таблиці № 5.1. Масова швидкість вигорання, площа пожежі, час вільного розвитку пожежі та коефіцієнт повноти згоряння вибираються за другою цифрою залікової книжки із таблиці № 5.2.

Таблиця № 5.1 - Вид негорючого газу та α

Параметр	0	1	2
Вид негорючого газу	CO ₂	N ₂	H ₂ O(пара)
α	2,5	3	2

Таблиця № 5.2 - Параметри горіння

Параметр	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S _{пож} % від S _{підлоги}	5	8	10	15	12	9	11	13	7	14
v _m , кг·м ⁻² ·хв ⁻¹	2,2	2,7	1,3	2,12	0,98	0,72	1,75	1,9	1,2	1,46

η	0,97	0,95	0,92	0,9	0,8	0,87	0,85	0,82	0,84	0,89
τ , хв.	10	8	2	5	3	4	6	12	7	9

Методика визначення основних параметрів гасіння пожежі за допомогою негорючих газів

I. Визначити температуру газової суміші, яка витікає з приміщення.

1.1. Визначити параметри горючої речовини:

- масову швидкість вигорання v_m , $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1}$;

- нижчу масову теплоту згорання Q'_n $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$, за формулою (28);

- коефіцієнт повноти згорання η .

1.2. Визначити площу підлоги, пожежі, отворів і конструкцій, що огорожують.

1.3. Розрахувати густину теплового потоку:

$$q = \frac{\eta Q'_n v_m S_{\text{пож}}}{60 S_{\text{огор}}}, \text{кВт} \cdot \text{м}^{-2}. \quad (116)$$

1.4. Визначити температуру пожежі у приміщенні за номограмою, додаток №19, виходячи зі значень коефіцієнта надлишку повітря, часу розвитку пожежі, густини теплового потоку.

II. Визначити питому витрату газової суміші, що витікає з приміщення.

2.1. Розрахувати густину навколишнього повітря:

$$\rho_{\text{пов}} = \frac{\mu_{\text{пов}}}{V_{\mu}}, \text{кг} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (117)$$

де $\mu_{\text{пов}}$ - молярна маса повітря, яка становить $29 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$;

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

формула (14).

2.2. Розрахувати питому витрату суміші за газообміну через один отвір:

$$g_{\text{ПГ}}^{\text{ВИТ}} = 0,42 \cdot S_{\text{ПР}} \cdot \rho_{\text{ПОВ}} \cdot \sqrt{\frac{2gh_{\text{ОТВ}} \left(1 - \frac{T_{\text{ПОВ}}}{T_{\text{ПГ}}}\right) \cdot \frac{T_{\text{ПОВ}}}{T_{\text{ПГ}}}}{\left(1 + 3\sqrt{\frac{T_{\text{ПОВ}}}{T_{\text{ПГ}}}}\right)^3}}, \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}; \quad (118)$$

в разі газообміну через два отвори:

$$g_{\text{ПГ}}^{\text{ВИТ}} = 0,625 \cdot S_{\text{ПР}} \cdot S_{\text{ВИТ}} \cdot \rho_{\text{ПОВ}} \times \sqrt{\frac{2gH \left(1 - \frac{T_{\text{ПОВ}}}{T_{\text{ПГ}}}\right) \cdot \frac{T_{\text{ПОВ}}}{T_{\text{ПГ}}}}{S_{\text{ПР}}^2 + S_{\text{ВИТ}}^2 \cdot \frac{T_{\text{ПОВ}}}{T_{\text{ПГ}}}}}, \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (119)$$

де $S_{\text{ПР}}$, $S_{\text{ВИТ}}$ – площі припливного та витяжного отворів м^2 ;

$\rho_{\text{ПОВ}}$ – густина повітря, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

$h_{\text{ОТВ}}$ – висота отвору, м;

H – відстань між центрами припливного і витяжного отворів, м;

$T_{\text{ПОВ}}$ – температура повітря, К;

$T_{\text{ПГ}}$ – температура продуктів згорання, К.

III. Визначити вогнегасну концентрацію негорючого газу.

3.1. Із таблиці додатків № 11 знайти значення теплоти утворення даної горючої речовини ΔH_f , $\text{кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$.

3.2. Визначити число атомів i -го виду у структурі горючої речовини.

3.3. Із таблиці № 14 додатків виписати значення $h'_{\text{ф}}$, $h''_{\text{ф}}$, h'_{f} , h''_{f} , h'_{j} , h''_{j}

3.4. Розрахувати флегматизуючу концентрацію даного негорючого газу:

$$\varphi_{\text{ф.л}} = 100 \cdot \frac{h'_f \Delta H_f^0 + h'_{\text{ф}} + \sum h'_j m_j}{h''_{\text{ф}} - 1 + \sum h''_j m_j}, \% \quad (120)$$

m_j - число атомів j -го виду у структурі горючої речовини.

3.5. Розрахувати мінімальну вибухонебезпечну концентрацію кисню:

$$\varphi_{\text{МВКК}}^{\text{O}_2} = \frac{100 - \varphi_{\text{ф.л}}}{4,84}, \% \quad (121)$$

3.6. Розрахувати безпечну концентрацію кисню:

$$\varphi_{\text{без}}^{\text{O}_2} = 1,2 \cdot \varphi_{\text{МВКК}} - 4,2, \% \quad (122)$$

IV. Визначити питому витрату подачі негорючого газу.

4.1. Критична витрата подачі негорючого газу:

$$g_{\text{нг}}^{\text{кр}} = 0,5 \cdot g_{\text{нг}}^{\text{вит}} \cdot \frac{\varphi_{\text{ф.л}}^0}{100}, \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (123)$$

4.2. Оптимальна витрата подачі негорючого газу:

$$g_{\text{нг}}^{\text{опт}} = 2,4 \cdot g_{\text{нг}}^{\text{кр}}, \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (124)$$

V. Визначити критичну і оптимальну інтенсивність подачі негорючого газу:

$$I_{\text{нг}}^{\text{опт(кр)}} = \frac{g_{\text{нг}}^{\text{опт(кр)}}}{V_{\text{пр}}}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (125)$$

VI. Визначити оптимальний час гасіння:

$$\tau_{\text{гас}} = \frac{2V_{\text{пр}} \cdot \frac{\Phi_{\text{фл}}^0}{100}}{2g_{\text{нг}}^{\text{опт}} - \frac{g_{\text{нг}}^{\text{внт}} \cdot \Phi_{\text{фл}}^0}{100}}, \text{ с.} \quad (126)$$

VII. Розрахувати оптимальну та фактичну загальну витрату негорючого газу на гасіння:

$$G_{\text{нг}}^{\text{опт}} = I_{\text{нг}} \cdot \tau_{\text{гас}}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \quad (127)$$

$$G_{\text{нг}}^{\text{факт}} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot G_{\text{нг}}^{\text{опт}}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \quad (128)$$

де k_1 – коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу НГ по об'єму приміщення (1,2÷1,5);

k_2 – коефіцієнт запасу (1÷1,5);

k_3 – коефіцієнт неповноти випаровування (1÷1,4)

VIII. Розрахувати загальну масу негорючого газу, витрачену на гасіння:

$$m_{\text{нг}} = V_{\text{пр}} \cdot G_{\text{нг}}^{\text{факт}}, \text{ кг.} \quad (129)$$

Приклад розв'язання задачі

Визначити основні параметри гасіння вуглекислим газом на десятій хвилині розвитку пожежі, якщо відбувається горіння ацетону, співвідношення $S_{\text{пож}}/S_{\text{підлоги}} = 12\%$, у приміщенні розмірами 7 x 20 x 2,9 м, і відкритим дверним отвором розмірами 1,2 x 2,3 м. Температура навколишнього повітря 15°C, тиск 101,3 кПа.

Розв'язання

1. Визначаємо температуру газової суміші, яка витікає з приміщення

1.1. Визначаємо параметри для горючої речовини

- масова швидкість вигорання $v_m = 0,72 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1}$;
- коефіцієнт хімічного недопалу $\eta = 0,9$;
- нижча молярна теплота згорання $Q_n = 2039 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$

1.2. Розраховуємо:

- нижчу масову теплоту згорання:

$$Q'_n = \frac{Q_n \cdot 1000}{\mu} = \frac{2039 \cdot 1000}{58} = 351085 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

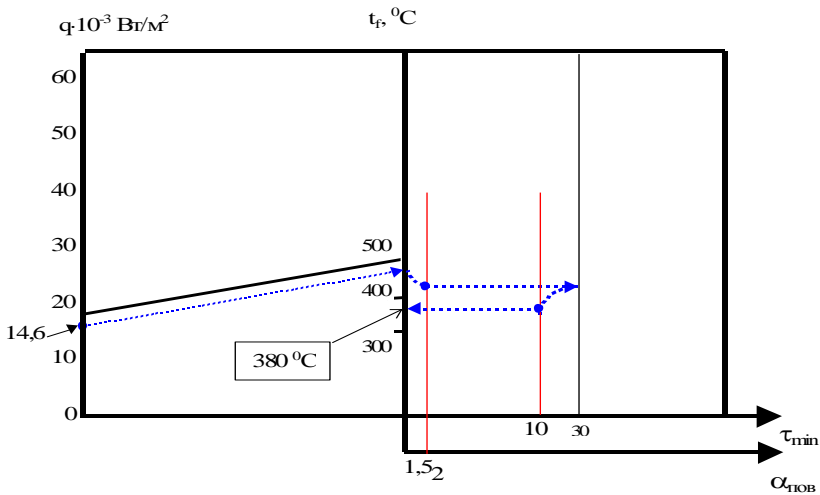
- площу підлоги $S_{\text{підл}} = 7 \cdot 20 = 140 \text{ м}^2$,
- площу пожежі: $S_{\text{пож}} = \frac{S_{\text{підл}} \cdot \% \text{пож}}{100} = \frac{140 \cdot 12}{100} = 16,8 \text{ м}^2$,
- площу отворів $S_{\text{отв}} = 1,2 \cdot 2,3 = 2,76 \text{ м}^2$,
- площу конструкцій, що огорожують:

$$S_{\text{огор}} = 2 \cdot 20 \cdot 7 + 2 \cdot 20 \cdot 2,9 + 2 \cdot 7 \cdot 2,9 = 436,6 \text{ м}^2.$$

1.3. Розраховуємо густину теплового потоку:

$$q = \frac{0,9 \cdot 351085 \cdot 0,72 \cdot 16,8}{60 \cdot 436,6} = 14,6 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}.$$

1.4. Визначаємо температуру газової суміші у приміщенні за номограмою із додатку №19 з урахуванням часу розвитку пожежі, густини теплового потоку, якщо коефіцієнт надлишку повітря α становить 1,5.



На лівій осі ординат знаходимо значення густини теплового потоку $q = 14,6, \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$ і рівновіддалено від найближчої залежності температури пожежі від густини теплового потоку проводимо пряму на праву вісь ординат – вісь температур. Потім рівновіддалено від найближчої кривої залежності температури від коефіцієнта надлишку повітря опускаємось до перетину із перпендикуляром, встановленим із точки, що відповідає $\alpha = 1,5$. Із одержаної точки, паралельно осі абсцис проводимо пряму до перетину із перпендикуляром, встановленим із точки $\tau = 30$ хв. Потім рівновіддалено від найближчої кривої залежності температури від часу розвитку пожежі пересуваємось вліво до перетину із перпендикуляром, встановленим із точки, що відповідає $\tau = 10$ хв. Із отриманої точки паралельно осі абсцис проводимо пряму на ось температур і знаходимо значення температури пожежі в огороженні: $t_{\text{пр}} = 380 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\text{пр}} = 653 \text{ К}$.

2. Визначаємо питому витрату суміші, що витікає з приміщення.

2.1. Розраховуємо густину навколишнього повітря:

$$V_{\mu} = \frac{22,4 \cdot 101,3 \cdot 288}{273 \cdot 101,3} = 23,56 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}.$$

$$\rho_{\text{пов}} = \frac{29}{23,56} = 1,23 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

2.2. Розрахуємо питому витрату суміші, що витікає з приміщення *через один дверний отвір*:

$$g_{\text{пт}}^{\text{внт}} = 0,42 \cdot 2,76 \cdot 1,23 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 9,8 \cdot 2,3(1 - 288/653) \cdot 288/653}{(1 + \sqrt[3]{288/653})^3}} = 2,02 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

3. Визначаємо вогнегасну концентрацію флегматизатора.

3.1. Із таблиці додатків № 11 знаходимо значення теплоти утворення ацетону, $\Delta H_f = -217,6 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$.

3.2. Визначаємо число атомів і-го виду у структурі горючої речовини: С – 3, Н – 6, О – 1.

3.3. Із таблиці додатків № 14 випишуємо значення $h'_{\text{ф}}$, $h''_{\text{ф}}$, $h'_{\text{н}}$, $h''_{\text{н}}$.

3.4. Розраховуємо вогнегасну концентрацію даного флегматизатора (CO_2):

$$\varphi_{\text{фл}} = 100 \cdot \frac{0,736 \cdot 10^{-2}(-217,6) + 0,584 + 3 \cdot 1,292 + 6 \cdot 0,427 + 1 \cdot 0,57}{2,02 - 1 + (3 \cdot 4,642 + 6 \cdot 1,160 + 1 \cdot (-2,321))} = 30,6\%$$

3.5. Розраховуємо мінімальну вибухонебезпечну концентрацію кисню:

$$\varphi_{\text{МВКК}}^{\text{O}_2} = \frac{100 - 30,6}{4,84} = 14,3 \%$$

3.6. Розраховуємо безпечну концентрацію кисню:

$$\varphi_{\text{без}}^{\text{O}_2} = 1,2 \cdot 14,3 - 4,2 = 12,96, \%$$

4. Визначаємо питому витрату подачі негорючого газу.

4.1. Критичну витрату подачі негорючого газу:

$$g_{\text{нг}}^{\text{кр}} = 0,5 \cdot 2,02 \cdot 30,6/100 = 0,309 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

4.2. Оптимальну витрату подачі негорючого газу:

$$g_{\text{нг}}^{\text{опт}} = 2,4 \cdot 0,309 = 0,74 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

5. Визначаємо критичну і оптимальну інтенсивність подачі негорючого газу:

$$I_{\text{нг}}^{\text{крит}} = 0,309/406 = 0,76 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$I_{\text{нг}}^{\text{опт}} = 0,74/406 = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}.$$

6. Визначаємо оптимальний час гасіння:

$$\tau_{\text{гас}} = \frac{2 \cdot 406 \cdot 30,6/100}{2 \cdot 0,74 - 2,02 \cdot 30,6/100} = 288,3 \text{ с}.$$

7. Розраховуємо загальну витрату негорючого газу на гасіння:

$$G_{\text{нг}}^{\text{опт}} = 0,0018 \cdot 288,3 = 0,519 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$G_{\text{нг}}^{\text{факт}} = \kappa_1 \kappa_2 \kappa_3 G_{\text{нг}}^{\text{опт}} = 1,25 \cdot 1,35 \cdot 1,2 \cdot 0,519 = 1,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

8. Розраховуємо загальну масу негорючого газу, витрачену на гасіння:

$$m_{\text{нг}} = 406 \cdot 1,05 = 426,6 \text{ кг}.$$

Висновок. Таким чином, для гасіння пожежі ацетону на площі $16,8 \text{ м}^2$ в заданому приміщенні з відкритим дверним отвором з оптимальною інтенсивністю подачі вуглекислого газу $1,8 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ потрібно приблизно 5 хвилин, при цьому фактична витрата вогнегасної речовини становитиме $1,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, а фактично витрачена маса негорючого газу – 426,6 кг.

ЛІТЕРАТУРА

Основна:

1. Абдурагимов И.М., Андросов А.С., Исаева Л.К., Крылов Е.В. Процессы горения. М. ВИПТШ МВД СССР, 1984.

2. Абдурагимов И.М., Говоров В.Ю., Макаров В.Е. Физико-химические основы развития и тушения пожаров.- М.: ВИПТШ МВД СССР, 1980,-255 с.

3. Баратов А.Н., Иванов Е.Н., Корольченко А.Я и др. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность. Спр., М.: Химия 1987.

4. Демидов П.Г. Саушев В.С. Горение и свойства горючих веществ. М., ВИПТШ МВД СССР, 1975.

5. Демидов П.Г., Шандыба В.А., Щеглов П.П. Горение и свойства горючих веществ. М., Химия 1981.

6. Иванников В.П., Ключ П.П. Справочник руководителя тушения пожара. М; Стройиздат, 1987. – 288 с.

7. Лаб. практи. з курсу «Теорія розвитку та припинення горіння» Тарахно О.В., Жернокльов К.В., Баланюк В.М., Харків, 2004.

8. Монахов В.Т. Методы исследования пожарной опасности веществ. М.: Химия, 1979.

9. Повзик Я.С., Ключ П.П., Матвейкин А.М., Пожарная тактика. М.: Стройиздат, 1990.

10. Романенко И.М., Кошмаров Ю.А., Башкирцев М.П. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле. - М.: ВИПТШ МВД СССР, 1977-415 с,

11. Справочник “Пожаровзвывоопасность веществ и материалов и средства их тушения”. Под редакцией Баратова А.Н. и Корольченко А.Я., ч. I и II. - М.: Химия, 1990.

Додаткова:

12. Асеева Р.М., Зайков Г.Е. Горение полимерных материалов. – М.: Наука, 1981.

13. Астапенко В.М., Кошмаров Ю.А., Молчадский И.С. Термогазодинамика пожаров в помещениях. - М.: Стройиздат, 1988.

14. Баратов А.Н., Иванов Е.Н. Пожаротушение на

предприятиях хим. и нефтеперерабатывающей пром.. М.: Наука, 1979.

15. Бахман Н.А., Беляев А.Ф. Горение гетерогенных конденсированных систем. – М.: Наука, 1967.

16. Блинов В.И., Худяков Г.Н. Диффузионное горение жидкостей. - М.: РИСО АН СССР, 1961. - 210 с.

17. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров. Пер. с англ. М.: Стройиздат, 1990.

18. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Матем. теория горения и взрыва. - М.: Наука, 1980.

19. Иванов Е.Н. Противопожарная защита открытых технологических установок. М.: Химия 1986.

20. Исаев С.И. Курс химической термодинамики. М.: Высшая школа, 1986.

21. Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность промышленной пыли. – М.: Химия, 1986.

22. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. Пер. с англ. М.: Мир, 1968.

23. Мальцев В.М., Мальцев М.И., Кошпоров Л.Я. Основные характеристики горения. – М.: Химия, 1979.

24. Михеев В.П. Газовое топливо и его сжигание. – М.: Недра, 1966.

25. Померанцев В.В. Основы практической теории горения. Л.: Энергоатомиздат, 1986.- 312 с.

26. Розловский А.Н. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. М.: Химия, 1980. -376 с.

27. Соколик А.С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. – М.: Изд-во АН СССР, 1960.

28. Таубкин С.И. Пожар и взрыв, экспертиза. - М., 1999.

29. Таубкин С.И., Таубкин И.С. Пожаро- и взрывоопасность пылевидных материалов и технологических процессов их переработки. – М.: Химия, 1976.

30. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1967.

31. Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва. – М.: МГУ, 1957.

32. Шрайбер Г., Порст П. Огнетушащие средства. Пер. с нем. М.: Стройиздат, 1975.

33. Юбилейный сб. трудов Всероссийского н.-иссл. института противопожарной обороны. – М.: ВНИИПО МВД России, 1997.

ДОДАТКИ

Додаток № 1 Ентальпія газів за постійного тиску

Температура, К	Ентальпія, кДж·моль ⁻¹							
	Повітря	CO ₂	H ₂ O	N ₂	HF	HCl	HBr	SO ₂
298,15	8,66	9,35	9,91	8,67	8,60	35,99	76,50	44,61
400	11,64	13,36	13,36	11,64	11,56	38,96	79,50	78,86
600	17,62	22,25	20,41	17,56	17,40	44,83	85,40	88,15
800	23,86	32,14	27,93	23,71	23,28	50,82	91,50	98,33
1000	30,36	42,72	35,94	30,13	29,25	57,04	97,80	109,04
1200	37,09	53,77	44,48	36,78	35,36	63,48	104,40	120,08
1400	44,00	65,19	53,51	43,61	41,63	70,12	111,20	131,35
1600	51,05	76,87	62,97	50,58	48,08	76,94	118,10	142,77
1800	58,20	88,70	72,82	57,65	54,70	83,90	125,20	154,31
2000	65,44	100,71	83,02	64,81	61,45	90,99	132,40	165,95
2200	72,76	112,82	93,41	71,97	68,27	98,08	139,60	177,55
2400	80,14	125,04	104,14	79,26	75,26	105,34	147,00	189,27
2600	86,58	137,32	115,08	86,57	82,32	112,67	154,40	201,21
2800	95,06	149,69	126,22	93,91	89,48	120,09	161,70	213,16
3000	102,60	162,10	137,56	101,30	96,74	127,64	169,40	225,15
3200	110,17	174,55	149,05	108,71	104,04	135,06	177,00	237,24
3400	117,77	187,06	160,69	116,14	111,40	142,62	184,70	249,36
3600	125,41	199,61	172,47	123,61	118,84	150,24	192,40	261,59
3800	133,08	212,19	184,37	131,08	126,33	157,90	200,00	273,89
4000	140,77	224,81	196,42	138,58	133,85	165,60	207,90	286,20

Додаток № 2 Внутрішня енергія продуктів горіння за постійного об'єму

Температура, К	Внутрішня енергія продуктів горіння, кДж·моль ⁻¹ .							
	Повітря	CO ₂	H ₂ O	N ₂	HF	HCl	HBr	SO ₂
298,15	6,24	6,93	7,49	6,25	6,18	33,57	74,10	42,19
400	8,39	10,11	10, 11	8,39	8,31	35,71	76,20	75,61
600	12,74	17,37	15,53	12,68	12,52	39,96	80,50	83,28
800	17,36	25,64	21,43	17,21	16,78	44,32	85,00	91,83
1000	22,23	34,59	27,81	22,00	21,12	48,91	89,70	100,92
1200	27,34	44,02	34,73	27,03	25,61	53,73	94,70	110,33
1400	32,62	53,81	42,13	32,23	30,25	58,74	99,80	119,98
1600	38,05	63,87	49,97	37,58	35,08	63,94	105,10	129,77
1800	43,57	74,07	58,19	43,02	40,07	69,27	110,60	139,69
2000	49,18	84,46	66,77	48,55	45,19	74,74	116,20	149,70
2200	54,88	94,94	75,53	54,09	50,39	80,20	121,70	159,68
2400	60,63	105,54	84,64	59,75	55,75	85,84	127,50	169,77
2600	65,45	116,19	93,95	65,44	61,19	91,54	133,30	180,09
2800	72,30	126,94	103,46	71,15	66,72	97,33	138,90	190,41
3000	78,22	137,72	113,18	76,92	72,36	103,26	145,10	200,78
3200	84,16	148,55	123,04	82,70	78,03	109,05	151,00	211,24
3400	90,14	159,43	133,06	88,51	83,77	114,99	157,10	221,74
3600	96,15	170,36	143,21	94,35	89,58	120,98	163,10	232,34
3800	102,20	181,31	153,49	100,20	95,44	127,02	169,30	243,02
4000	108,26	192,31	163,91	106,07	101,34	133,09	175,40	253,70

Додаток № 3 Теплоємність та теплота утворення простих речовин і продуктів горіння

Речовина	Теплоємність молярна, $C_p^0 = a + bT$, Дж·моль ⁻¹ ·К ⁻¹		Теплоємність об'ємна, $C_p^0 = a + bT$, Дж·м ⁻³ ·К ⁻¹		Теплота утворення, ΔH_{fi}^0 кДж·моль ⁻¹
	а	в·10 ⁻³	а	в	
Повітря	29,830	2,030	1331,718	0,090625	0,00
N₂	29,143	2,135	1301,031	0,095312	0,00
O₂	32,471	1,695	1449,586	0,075669	0,00
CO	29,632	2,050	1322,876	0,091517	-110,50
HF	28,574	1,465	1275,606	0,065401	-268,61
HCl	27,901	2,300	1245,602	0,102678	-92,30
HBr	27,891	2,930	1245,409	0,130803	-35,98
HJ	29,689	5,650	1325,406	0,25223	25,94
NO	30,728	1,925	1371,780	0,085937	90,37
CO₂	46,835	4,520	2090,861	0,201785	-393,78
H₂O (газ)	33,193	5,355	1481,839	0,239062	-241,84
HCN	42,739	5,650	1907,991	0,252232	130,54
SO₂	46,292	6,275	2066,597	0,280133	-296,90
H₂O (рідина)					-285,84
H₂S	33,962	7,700	1516,139	0,343753	-20,15
SO₃	69,332	6,715	3095,179	0,299782	-395,20
NH₃	37,397	12,740	1669,503	0,568754	-46,19

Додаток № 4 Значення коефіцієнтів h_j , h_s для визначення концентраційних меж поширення полум'я за хімічним складом горючої речовини

$$\varphi_H^0 = \frac{100}{1 + h_f \Delta H_f^0 + \sum_{j=1}^n h_j m_j + \sum_{s=1}^q h_r l_r}, \%$$

де h_f - параметр теплоти утворення газу, моль·кДж⁻¹;
 H_f^0 - стандартна теплота утворення речовини, кДж·моль⁻¹;
 h_j - параметр j-го елемента в молекулі горючої речовини, моль·кДж⁻¹;
 m_j - число атомів j-го елемента в молекулі горючої речовини.

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

Додаток № 5 Коефіцієнти a , b для визначення концентраційних меж поширення полум'я за апроксимаційною формулою

$$\varphi^0 = \frac{100}{a\beta + b}, \%$$

де β - стехіометричний коефіцієнт реакції горіння

Область застосування		Константи	
		a	b
Для НКМПП		8,684	4,769
Для ВКМПП	при $\beta \leq 7,5$	1,55	0,56
	при $\beta > 7,5$	0,768	6,554

Додаток № 6 Коефіцієнти h_s для визначення концентраційних меж поширення полум'я за хімічною будовою горючої речовини

$$\varphi_M^0 = \frac{100}{\sum_{\mu=1}^s h_s l_s}, \%$$

де φ_M^0 – концентраційна межа поширення полум'я (нижня або верхня),
 h_s - вклад s -тої структурної групи,
 l_s - число s -х структурних груп у хімічній формулі речовини.

Вид структурної групи	h_s	
	НКМПП	ВКМПП
C — C	3,75	-0,84
C = C	11,10	0,24
C ≡ C	31,05	1,93
C — H	4,47	1,39
C — O	0,90	-1,40
C = O	3,12	1,31
C — N ³	2,27	-1,17
C — Cl	0,71	0,71
O — H	0,52	1,25
N — H	1,90	0,69
N — N	13,84	13,84
C ÷ C (ароматичний зв'язок)	7,36	0,89

Додаток № 7 Константи k і l гомологічних рядів для визначення температурних меж поширення полум'я

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

$t_{кип}$ – температура кипіння речовини, $^\circ\text{C}$.

Гомологічний ряд	Формула	Константи НТМПП		Константи ВТМПП	
		k	l	k	l
Нормальні алкани	$\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_n\text{-CH}_3$	0,6957	73,8	0,7874	50,3
2-Метилалкани	$(\text{CH}_3)_2\text{CH-(CH}_2\text{)}_n\text{-CH}_3$	0,6885	74,9	0,7900	52,2
Нормальні алкени-1	$\text{CH}_2=\text{CH-(CH}_2\text{)}_n\text{-CH}_3$	0,6867	74,5	0,7976	49,5
1-Фенілалкани	$\text{C}_6\text{H}_5\text{-(CH}_2\text{)}_n\text{-CH}_3$	0,6751	70,2		
Нормальні жирні спирти	$\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_n\text{-OH}$	0,5746	33,7	0,6928	15,0
Ізоалкілкарбіноли	$(\text{CH}_3)_2\text{CH-(CH}_2\text{)}_n\text{-OH}$	0,6582	44,1	0,7278	21,5
Складні ефіри мурашиної кислоти	$\text{HCOO-(CH}_2\text{)}_n\text{-CH}_3$	0,5359	47,6	0,6050	25,0
Складні ефіри оцтової кислоти	$\text{CH}_3\text{COO-(CH}_2\text{)}_n\text{-CH}_3$	0,5940	50,9	0,7761	40,8
Первинні нормальні алкіламіни	$\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_n\text{-NH}_2$	0,5004	54,6		

Додаток № 8 Константи a_j , $^\circ\text{C}$ структурних груп для визначення температурних меж поширення полум'я

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

для НТМПП $a_0 = -62,40$; $a_1 = 0,655$;

для ВТМПП $a_0 = -41,43$; $a_1 = 0,723$

l_j - число структурних груп j-го типу; $t_{кип}$ – температура кипіння речовини, $^\circ\text{C}$.

Структурна група	$a_j, \text{ } ^\circ\text{C}$		Структурна група	$a_j, \text{ } ^\circ\text{C}$	
	t_n	t_b		t_n	t_b
C - C	-0,909	-1,158	C - N	-2,14	0,096
C = C	-2,66	-4,64	N - H	6,53	6,152
C - H	-0,009	0,57	O - H	19,75	17,8
C - O	0,11	1,267	C = O	5,570	5,58
C ÷ C ароматичні сполуки	-0,733	-0,767			

Додаток № 9 Константи a_j структурних груп для визначення температури спалаху

$$t_{\text{сп}} = a_0 + a_1 t_{\text{кип}} + \sum a_j l_j$$

де $a_0 = -73,14 \text{ } ^\circ\text{C}$

$a_1 = 0,659$

l_j - число структурних груп j -го типу;

$t_{\text{кип}}$ – температура кипіння речовини, $^\circ\text{C}$.

Вид структурної групи	$a_j, ^\circ\text{C}$	Вид структурної групи	$a_j, ^\circ\text{C}$
C-C	-2,03	C-Cl	15,11
C=C	1,72	C-Br	19,40
C-H	1,105	C-Si	-4,84
C-O	2,47	Si-H	11,00
C=O	11,66	Si-Cl	10,07
C-N	14,15	N-H	5,83
C≡N	12,13	S-H	5,64
C-S	2,09	P-O	3,27
C=S	-11,91	P=O	9,64
O-H	23,90	C-F	3,33
C ÷ C (ароматичний зв'язок)	-0,28		

Додаток № 10 Емпіричні константи a і b для визначення температури спалаху

$$t_{\text{сп}} = a + b \cdot t_{\text{кип}}, ^\circ\text{C}$$

$t_{\text{кип}}$ – температура кипіння речовини, $^\circ\text{C}$.

Клас речовин	Коефіцієнти	
	$a, ^\circ\text{C}$	b
Алкани	-73,22	0,693
Алкени	-60	0,64
Алкананіліни	-21,94	0,553
Алканфеноли	-38,42	0,623
Альдегіди	-74,76	0,813
Ароматичні речовини	-67,83	0,665
Бромалкани	-49,56	0,665
Карбонові кислоти	-43,57	0,708
Кетони	-52,69	0,643
Метилалкани	-73,14	0,659
Спирти	-41,69	0,652
Хлоралкани	-55,70	0,631

Додаток № 11 Властивості речовин

Речовина	Формула	ΔH_f^0 кДж·моль ⁻¹	Константи Антуана		
			A	B	Ca
Акрилова кислота	$C_3H_4O_2$	-336	7,0931	1913	236,0
Акролеїн	C_3H_4O	-58,5	6,190	1156,947	230,60
Аліловий спирт	C_3H_6O	-131,8	7,6594	1944,765	247,60
Амілбензол	$C_{11}H_{16}$	-34,4	6,6832	2069,486	210,43
Амілметилкетон	$C_7H_{14}O$	-291	9,2537	3336,004	310,07
Аміловий спирт	$C_5H_{12}O$	-302,5	6,307	1287,625	161,33
Амілциклогексан	$C_{11}H_{22}$	-233,8	6,33628	1808,242	213,89
Анілін	C_6H_7N	109	6,04162	1457,02	176,19
Ацетон	C_3H_6O	-217,57	6,3755	1281,721	237,09
Ацетонітрил	C_2H_3N	-25,62	7,27	1838	273,00
Бензиловий спирт	C_7H_8O	-220,86	8,7223	2664,684	279,64
Бензол	C_6H_6	82,9	5,6139	902,275	178,10
Бутаналь	C_4H_8O	-205	7,0839	1768,4	273,00
Бутандіол-2,3	$C_4H_{10}O_2$	-445,5	8,67	3024	273,00
Бутанова кислота	$C_4H_8O_2$	-486,3	7,4394	2158,56	233,66
Бутанол	$C_4H_{10}O$	-274,6	8,7223	2664,684	279,64
Бутанон	C_4H_8O	-238,3	6,1494	1292,791	232,34
Бутилбензол	$C_{10}H_{14}$	-13,7	6,5495	1882,488	230,94
Бутилметилкетон	$C_6H_{12}O$	-272	6,6317	1613,425	221,67
Бутилфенол	$C_{10}H_{14}O$	-285,12	6,4777	1928,57	207,18
Бутилформіат	$C_5H_{10}O_2$	-437,6	6,8194	1711,66	249,58
Валеріанова кислота	$C_5H_{10}O_2$	-490,4	8,0456	2661,49	256,17
Валеріановий альдегід	$C_5H_{10}O$	-227,8	6,4554	1460,272	225,18
Валеролактон	$C_5H_8O_2$	-421,14	7,331	2540,4	273,00
Гексадиєн	C_6H_{10}	-94,1	6,132	1184,99	227,70
Гексан	C_6H_{14}	-167,2	5,9951	1166,274	223,66
Гексилметилкетон	$C_8H_{16}O$	-311,7	6,9090	1980,4	230,92
Гексиловий спирт	$C_6H_{14}O$	-319,8	6,1789	1293,831	152,63
Гептан	C_7H_{16}	-187,7	6,0764	1295,405	219,82

Речовина	Формула	ΔH_f° кДж·моль ⁻¹	Константи Антуана		
			A	B	Ca
Декан	$C_{10}H_{22}$	-249,6	6,5202	1809,975	227,70
Диацетоновий спирт	$C_6H_{12}O_2$	-425	7,216	2188	253,00
Дибутиловий ефір	$C_8H_{18}O$	-333,9	6,4403	1648,4	230,00
Дипропіловий ефір	$C_6H_{14}O$	-293,4	6,240	1397,34	240,20
Диетиламін	$C_4H_{11}N$	-137,34	7,22	1709	273,00
Диетиленгліколь	$C_4H_{10}O_3$	-642,84	7,2767	2727,3	273,00
Диетилізопропілметан	C_8H_{18}	-211,2	5,9885	1318,12	215,30
Диетилкетон	$C_5H_{10}O$	-252	6,3555	1477,021	237,52
Диетиловий ефір	$C_4H_{10}O$	-252,2	6,1228	1098,945	232,37
Диізопропілкетон	$C_7H_{14}O$	-291	7,1	2021,4	273,00
Диоксан	$C_4H_8O_2$	-434,16	6,989	1866,7	273,00
Додекан	$C_{12}H_{26}$	-290,9	7,2957	2463,739	253,88
Етилацетат	$C_4H_8O_2$	-442,9	6,2267	1244,95	217,88
Етилбензол	C_8H_{10}	29,9	6,3587	1590,66	229,58
Етиленгліколь	$C_2H_6O_2$	-453,8	8,1375	2753,183	252,00
о-Етилголуол	C_9H_{12}	1,6	6,4147	1732,11	228,10
Етилформіат	$C_3H_6O_2$	-371,2	6,1339	1123,943	218,25
Етилциклогексан	C_8H_{16}	-171,7	5,9953	1384,036	215,13
Ізоаміловий спирт	$C_5H_{12}O$	-302	6,38314	1314,36	169,06
Ізобутилацетат	$C_6H_{12}O_2$	-535,5	6,24133	1332,3	205,57
Ізопропенілбензол	C_9H_{10}	-112,9	6,3696	1680,13	219,6
м-Крезол	C_7H_8O	-158	6,6329	1856,356	199,07
Ксилідин	$C_8H_{11}N$	-85,26	6,7578	2035,4	216,00
м-Ксилол	C_8H_{10}	17,25	6,588	1906,8	234,9
Кумол	C_9H_{12}	-21,5	6,0675	1461,643	207,56
Метанол	CH_4O	-201,3	7,352	1660,45	245,80
Метилацетат	$C_3H_6O_2$	-409,1	6,1901	1157,63	219,73
Метилбутират	$C_5H_{10}O_2$	-485	6,2263	1338	214,34
Метилгексан-2	C_7H_{16}	-194,9	5,9981	1236,026	219,55
Метилпентальдегід	$C_6H_{12}O$	-249,1	6,465	1519,1	223,65

Речовина	Формула	ΔH_f° кДж·моль ⁻¹	Константи Антуана		
			A	B	Ca
Метилпропіонат	$C_4H_8O_2$	-438,8	6,74	1667	273,00
Метилпропілкетон	$C_5H_{10}O$	-258,6	6,9891	1870,4	273,20
Метилформіат	$C_2H_4O_2$	-349,8	6,4589	1206,148	239,02
Метилциклогексан	C_7H_{14}	-154,7	5,9518	1272,864	221,63
Метилциклопентан	C_6H_{12}	-106,6	5,9877	1186,059	226,04
Метоксиетилацетат	$C_5H_{10}O_3$	-573,6	6,2500	1447,037	196,10
Мурашина кислота	CH_2O_2	-210,6	4,9927	765,889	154,55
Нонан	C_9H_{20}	-229	6,1777	1510,695	211,50
Ноніловий спирт	$C_9H_{20}O$	-387	5,8006	1276,626	123,10
Октан	C_8H_{18}	-208	6,0939	1379,556	211,89
Октаналь	$C_8H_{16}O$	-643,96	6,7024	1815,764	218,61
Октанова кислота	$C_8H_{16}O_2$	-565,3	5,2690	1014,81	72,77
Октиловий спирт	$C_8H_{18}O$	-357	5,7209	1170	120,00
Октилциклогексан	$C_{14}H_{28}$	-295,6	6,6848	2213,668	209,50
Оцтова кислота	$C_2H_4O_2$	-437,3	7,1033	1906,53	255,97
Оцтовий ангідрид	$C_4H_6O_3$	-328	6,274	1444,718	199,82
Пентан	C_5H_{12}	-146,4	5,9720	1062,555	231,81
Пентанол-2	$C_5H_{12}O$	-314,13	6,3504	1254,854	169,60
Піридин	C_5H_5N	140,6	6,007	1281,3	205,00
Пірол	C_4H_5N	63	6,4196	1501,563	210,40
Пропаналь	C_3H_6O	-221,7	6,0657	1163,288	231,17
Пропанол	C_3H_8O	-257,7	7,4420	1751,981	225,13
Пропіламін	C_3H_9N	-101,5	6,3854	1243,947	235,88
Пропілбензол	C_9H_{12}	-7,9	6,2971	1627,827	220,49
Пропілбутират	$C_7H_{14}O_2$	-556,8	6,6514	1756,37	234,96
Пропіленгліколь	$C_3H_8O_2$	-499,9	8,640	3039	273,00
Пропілетилкетон	$C_6H_{12}O$	-272	6,4469	1538,995	222,58
Пропілформіат	$C_4H_8O_2$	- 417	5,9724	1126,539	203,46
Пропілциклогексан	C_9H_{18}	-193,3	6,0135	1461,715	207,99
Пропілциклопентан	C_8H_{16}	-148	6,0796	1438,79	222,23

Речовина	Формула	ΔH_f° кДж·моль ⁻¹	Константи Антуана		
			A	B	Ca
Пропіонова кислота	$C_3H_6O_2$	-466	7,839	2410	273,00
Пропіоновий ангідрид	$C_6H_{10}O_3$	-289	4,944	810,31	108,74
Стирол	C_8H_8	155,6	7,0654	2123,057	272,99
Тетрагідрофуран	C_4H_8O	-214	6,1200	1202,29	226,25
Тетраметилпентан	C_9H_{20}	-273,2	5,9536	1397,483	213,70
Толуол	C_7H_8	50,17	6,050	1328,171	217,71
Триметилбензол	C_9H_{12}	-9,46	6,4429	1791,164	227,84
Триметилгексан	C_9H_{20}	-254	5,9602	1324,049	210,74
Ундеканол	$C_{11}H_{24}O$	-422,5	5,6520	1250	100,00
Фенілетилловий ефір	$C_8H_{10}O$	-84	6,5277	1808,8	230,00
Цимол	$C_{10}H_{14}$	28,8	6,6498	1893,381	232,66

Додаток № 12 Залежність тиску насиченої пари від температури

Речовина	Формула	Температура °С, при тиску, кПа					
		0,133	1,333	5,333	13,33	53,33	101,3
Акрилова кислота	$C_3H_4O_2$	3,5	39,0	66,2	86,1	122,0	141,0
Акролеїн	C_3H_4O	-64,5	-36,7	-15,0	2,5	34,5	52,5
Аліловий спирт	C_3H_6O	-20,0	10,5	33,4	50,0	80,2	96,6
Амілбензол	$C_{11}H_{16}$	40,7	80,6	140,0	149,9	199,6	205,4
Амілметилкетон	$C_7H_{14}O$	19,3	55,5	81,2	100,0	133,2	150,2
Аміловий спирт	$C_5H_{12}O$	13,6	44,9	68,0	85,8	119,8	137,8
Амілциклогексан	$C_{11}H_{22}$	34,9	75,3	82,4	131,1	140,2	202,8
Анілін	C_6H_7N	31,0	68,2	96,9	119,4	160,9	184,0
Ацетон	C_3H_6O	-59,4	-31,1	-9,4	7,7	39,5	56,5
Ацетонітрил	C_2H_3N	-47,0	-16,3	7,0	25,8	61,0	80,0
Бензиловий спирт	C_7H_8O	50,5	89,2	106,5	141,2	183,0	205,1
Бензол	C_6H_6	-45,0	-11,6	7,5	26,1	60,6	80,1
Бутаналь	C_4H_8O	-50,8	-18,9	5,2	23,8	57,1	75,2
Бутандіол-2,3	$C_4H_{10}O_2$	22,2	85,3	117,4	141,2	183,8	206,5
Бутанова кислота	$C_4H_8O_2$	25,5	61,5	88,0	108,0	144,0	163,5
Бутанол	$C_4H_{10}O$	-1,2	30,2	53,4	70,1	100,8	117,5
Бутанон	C_4H_8O	-48,3	-17,7	6,0	25,0	60,0	79,6
Бутилбензол	$C_{10}H_{14}$	24,6	62,4	91,9	115,3	158,8	183,3
Бутилметилкетон	$C_6H_{12}O$	7,7	38,8	62,0	79,8	111,0	127,5
Бутилфенол	$C_{10}H_{14}O$	64,6	106,5	125,0	163,5	195,7	235,0
Бутилформіат	$C_5H_{10}O_2$	-26,4	6,1	31,6	51,0	86,2	106,0
Валеріанова кислота	$C_5H_{10}O_2$	42,2	79,8	107,8	128,3	165,0	184,4
Валеріановий альдегід	$C_5H_{10}O$	-12,0	17,9	39,8	56,8	86,8	103,3
Валеролактон	C_5H_8O	37,5	79,8	101,9	136,5	182,3	207,5
Гексадиєн	C_6H_{10}	-47,1	-17,7	4,2	23,4	67,2	76,0
Гексан	C_6H_{14}	-54,0	-25,0	-2,3	15,8	49,6	68,7
Гексилметилкетон	$C_8H_{16}O$	23,6	60,9	89,8	111,7	151,0	172,9

Речовина	Формула	Температура °С, при тиску, кПа					
		0,133	1,333	5,333	13,33	53,33	101,3
Гексиловий спирт	$C_6H_{14}O$	24,4	58,2	83,7	102,8	138,0	157,0
Гептан	C_7H_{16}	-33,0	-2,0	22,4	41,8	78,0	98,4
Декан	$C_{10}H_{22}$	21,0	57,7	86,0	108,6	150,5	174,1
Диацетоновий спирт	$C_6H_{12}O_2$	22,0	58,0	86,7	108,2	147,5	167,9
Дибутиловий ефір	$C_8H_{18}O$	-43,8	-11,7	13,3	33,0	69,4	89,8
Дипропіловий ефір	$C_6H_{14}O$	-43,3	-11,8	13,2	33,0	69,5	89,5
Диетиламін	$C_4H_{11}N$	-38,9	-33,0	-11,3	6,0	38,0	55,5
Диетиленгліколь	$C_4H_{10}O_3$	91,8	133,8	164,3	187,5	226,5	244,8
Диетилізопропілметан	C_8H_{18}	23,3	26,0	35,2	55,7	94,0	115,6
Диетилкетон	$C_5H_{10}O$	-12,7	17,2	39,4	56,2	86,3	102,7
Диетиловий ефір	$C_4H_{10}O$	-74,3	-48,0	-27,7	-11,5	18,9	34,6
Диізопропілкетон	$C_7H_{14}O$	5,2	36,7	59,6	77,0	108,0	123,7
Диоксан	$C_4H_8O_2$	-35,8	-1,2	25,2	45,1	81,8	101,1
Додекан	$C_{12}H_{26}$	52,0	91,6	122,0	146,1	191,0	216,3
Етилацетат	$C_4H_8O_2$	-43,4	-13,5	9,1	27,0	59,3	77,1
Етилбензол	C_8H_{10}	-9,2	25,9	52,8	74,1	113,8	136,2
Етиленгліколь	$C_2H_6O_2$	53,0	92,1	120,0	141,8	178,5	197,8
о-Етилтолуол	C_9H_{12}	11,9	48,5	77,0	99,6	141,6	165,1
Етилформіат	$C_3H_6O_2$	-60,5	-33,0	-11,5	5,4	37,1	54,3
Етилциклогексан	C_8H_{16}	-13,7	20,6	47,6	69,0	109,1	131,8
Ізоаміловий спирт	$C_5H_{12}O$	15,4	49,6	74,7	94,2	129,8	132
Ізобутилацетат	$C_6H_{12}O_2$	-21,2	12,8	39,2	59,7	97,5	118,0
Ізопропенілбензол	C_9H_{10}	11,6	48,5	70,6	99,6	143,9	165,4
м-Крезол	C_7H_8O	46,9	85,7	103,0	137,7	179,0	201,9
Ксилідин	$C_8H_{11}N$	50,7	90,9	109,1	145,5	188,0	214,0
м-Ксилол	C_8H_{10}	-7,2	28,2	55,3	76,8	116,7	139,1
Кумол	C_9H_{12}	2,8	38,3	66,1	88,1	129,2	152,4
Метанол	CH_4O	-44,0	-16,2	5,0	21,2	49,9	64,7
Метилацетат	$C_3H_6O_2$	-57,2	-29,3	-7,9	9,4	40,0	57,8
Метилбутират	$C_5H_{10}O_2$	-26,8	5,0	29,6	48,0	83,1	102,3

Речовина	Формула	Температура °С, при тиску, кПа					
		0,133	1,333	5,333	13,33	53,33	101,3
Метилгексан-2	C_7H_{16}	-39,7	-9,1	14,9	34,1	69,8	90,1
Метилпентальдегід	$C_6H_{12}O$	-16,7	16,0	41,1	60,8	97,0	117,0
Метилпропіонат	$C_4H_8O_2$	-42,0	-11,8	11,0	29,0	61,8	79,8
Метилпропілкетон	$C_5H_{10}O$	-12,0	17,9	39,8	56,8	86,8	103,3
Метилформіат	$C_2H_4O_2$	-74,2	-48,6	-28,7	-12,9	16,0	32,0
Метилциклогексан	C_7H_{14}	-35,2	3,2	22,0	42,1	79,6	100,9
Метилциклопентан	C_6H_{12}	-53,2	-23,7	-0,6	17,9	52,3	71,8
Метоксиетилацетат	$C_5H_{10}O_3$	7,0	40,1	65,9	86,2	123,8	144,8
Мурашина кислота	CH_2O_2	-20,0	2,1	24,0	43,8	80,3	100,6
Нонан	C_9H_{20}	4,0	39,1	66,3	87,9	128,1	150,8
Ноніловий спирт	$C_9H_{20}O$	59,5	99,7	129,0	151,3	192,1	213,5
Октан	C_8H_{18}	-14,0	19,2	45,1	65,7	104,0	125,7
Октаналь	$C_8H_{16}O$	73,4	101,2	120,0	133,9	156,5	168,5
Октанова кислота	$C_8H_{16}O_2$	92,3	124,0	150,6	172,2	218,9	237,5
Октиловий спирт	$C_8H_{18}O$	54,0	88,3	115,2	135,2	173,8	195,2
Октилциклогексан	$C_{14}H_{28}$	77,0	122,0	142,8	184,3	220,5	264,0
Оцтова кислота	$C_2H_4O_2$	-17,2	17,1	42,4	62,2	98,1	117,9
Оцтовий ангідрид	$C_4H_6O_3$	2,4	31,2	60,6	80,7	117,9	138,6
Пентан	C_5H_{12}	-76,0	-50,1	-29,3	-12,6	18,5	36,1
Пентанол-2	$C_5H_{12}O$	1,5	32,2	54,1	70,7	102,3	119,7
Піридин	C_5H_5N	-18,9	13,2	38,0	57,8	95,6	115,2
Пірол	C_4H_5N	-19,5	15,0	41,8	63,6	104,2	129,7
Пропаналь	C_3H_6O	-63,6	-35,4	-13,3	4,3	36,9	55,4
Пропанол	C_3H_8O	-15,0	14,7	36,4	52,8	82,0	97,8
Пропіламін	C_3H_9N	-64,4	-37,2	-16,0	0,5	31,5	48,5
Пропілбензол	C_9H_{12}	7,4	43,4	71,6	94,0	135,7	159,2
Пропілбутират	$C_7H_{14}O_2$	-1,6	34,0	61,5	82,6	121,7	142,7
Пропіленгліколь	$C_3H_8O_2$	45,5	83,2	111,2	132,0	168,0	188,2
Пропілетилкетон	$C_6H_{12}O$	-12,4	20,9	46,5	66,6	103,5	124,0
Пропілформіат	$C_4H_8O_2$	-43,0	-12,6	10,8	29,5	62,6	81,3

Речовина	Формула	Температура °С, при тиску, кПа					
		0,133	1,333	5,333	13,33	53,33	101,3
Пропілциклогексан	C_9H_{18}	4,2	40,2	68,5	91,0	133,0	156,7
Пропілциклопентан	C_8H_{16}	-12,6	21,3	47,9	69,1	108,6	130,9
Пропіонова кислота	$C_3H_6O_2$	4,6	39,7	65,8	85,1	122,0	141,1
Пропіоновий ангідрид	$C_6H_{10}O_3$	20,6	57,7	85,6	107,2	146,0	167,0
Стирол	C_8H_8	-1,6	32,8	60,6	82,5	122,7	145,2
Тетрагідрофуран	C_4H_8O	-54,4	-25,7	-3,3	14,4	47,4	66,0
Тетраметилпентан	C_9H_{20}	-13,0	20,8	48,0	69,6	110,1	133,0
Толуол	C_7H_8	-26,1	6,4	31,8	51,9	89,5	110,6
Триметилбензол	C_9H_{12}	19,3	56,8	86,0	109,1	152,0	176,1
Триметилгексан	C_9H_{20}	-17,0	16,2	42,3	63,1	102,0	124,1
Ундеканол	$C_{11}H_{24}O$	71,1	112,8	143,7	167,2	209,8	232,0
Фенілетилловий ефір	$C_8H_{10}O$	18,1	56,4	86,6	108,4	149,8	172,0
Цимол	$C_{10}H_{14}$	17,3	56,8	87,1	110,9	154,3	178,3

Додаток № 13 - Параметри горіння речовин і матеріалів

Вид горючого матеріалу	Масова швидкість вигорання V_m , $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1}$	Масова теплота згорання $Q_{пз}$, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$	Коефіцієнт повноти згорання, η	Витрата повітря $V_{пг}$, $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$	Об'єм продуктів згорання $V_{пг}$, $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$
Поліетилен у виробках	0,62	47100	0,85	11,42	12,22
Бавовна	0,318	15700	0,97	3,95	4,64
Книги на стелажах	0,438	13400	0,97	3,95	4,64
Каучук натуральний	1,08	42300	0,85	10,00	10,76
Гумовотехнічні вироби	0,90	33500	0,85	10,16	10,82
Папір	0,636	13400	0,97	3,95	4,64
Полістирол	1,14	39000	0,85	10,25	10,68
Деревина у виробках	1,11	13800	0,97	4,20	4,86
Пінополіуретан	0,90	24300	0,93	6,00	6,55
Каучук синтетичний	0,72	40200	0,85	10,16	10,82
Волокно штапельне	0,54	13800	0,97	3,95	4,64
Поліпропілен у виробках	0,87	45600	0,85	11,42	12,22
Торф (вологість 40%)	0,24	11300	0,97	3,96	4,62

Додаток № 14 - Коефіцієнти формули визначення вогнегасної концентрації флегматизатора

Коефіцієнти	Значення коефіцієнтів при розведенні суміші		
	N_2	H_2O (пара)	CO_2
h_f моль·кДж ⁻¹	$0,865 \cdot 10^{-2}$	$0,802 \cdot 10^{-2}$	$0,736 \cdot 10^{-2}$
h_{ϕ}	1,256	0,780	0,584
h_C	2,528	1,651	1,292
h_H	0,759	0,527	0,427
h_O	0,197	0,446	0,570
h_N	-0,151	-0,147	-0,133
h''_{ϕ}	2,800	2,236	2,020
h''_C	5,946	5,000	4,642
h''_H	1,486	1,250	1,160
h''_O	-2,973	-2,500	-2,321
h''_N	0	0	0

Додаток 15. Залежність температури самоспалахування парафінових вуглеводнів (алканів), від ефективної довжини карбонового ланцюга

$l_{цеп}$	$t_{cc}, ^\circ C$	$l_{цеп}$	$t_{cc}, ^\circ C$	$l_{цеп}$	$t_{cc}, ^\circ C$	$l_{цеп}$	$t_{cc}, ^\circ C$
3,0	470	6,1	232	9,1	208	12,1	204
3,1	465	6,2	231	9,2	208	12,2	204
3,2	460	6,3	230	9,3	208	12,3	204
3,3	455	6,4	229	9,4	207	12,4	204
3,4	450	6,5	228	9,5	207	12,5	204
3,5	444	6,6	227	9,6	207	12,6	204
3,6	439	6,7	226	9,7	207	12,7	204
3,7	433	6,8	225	9,8	206	12,8	204
3,8	426	6,9	224	9,9	206	12,9	204
3,9	420	7,0	223	10,0	206	13,0	204
4,0	413	7,1	222	10,1	206	13,1	204
4,1	407	7,2	221	10,2	206	13,2	204
4,2	400	7,3	221	10,3	206	13,3	204
4,3	392	7,4	220	10,4	205	13,4	204
4,4	381	7,5	219	10,5	205	13,5	203
4,5	370	7,6	218	10,6	205	13,6	203
4,6	358	7,7	217	10,7	205	13,7	203
4,7	344	7,8	216	10,8	205	13,8	203
4,8	328	7,9	216	10,9	205	13,9	203
4,9	308	8,0	215	11,0	205	14,0	203
5,0	287	8,1	214	11,1	205	14,1	203
5,1	274	8,2	213	11,2	205	14,2	203
5,2	262	8,3	213	11,3	205	14,3	203
5,3	255	8,4	212	11,4	205	14,4	203
5,4	249	8,5	211	11,5	205	14,5	203
5,5	244	8,6	211	11,6	204	14,6	203
5,6	240	8,7	210	11,7	204	14,7	203
5,7	238	8,8	210	11,8	204	14,8	203
5,8	236	8,9	209	11,9	204	14,9	203
5,9	235	9,0	234	12,0	204	15,0	202
6,0	234						

Додаток 16. Залежність температури самоспалахування спиртів від ефективної довжини карбонового ланцюга

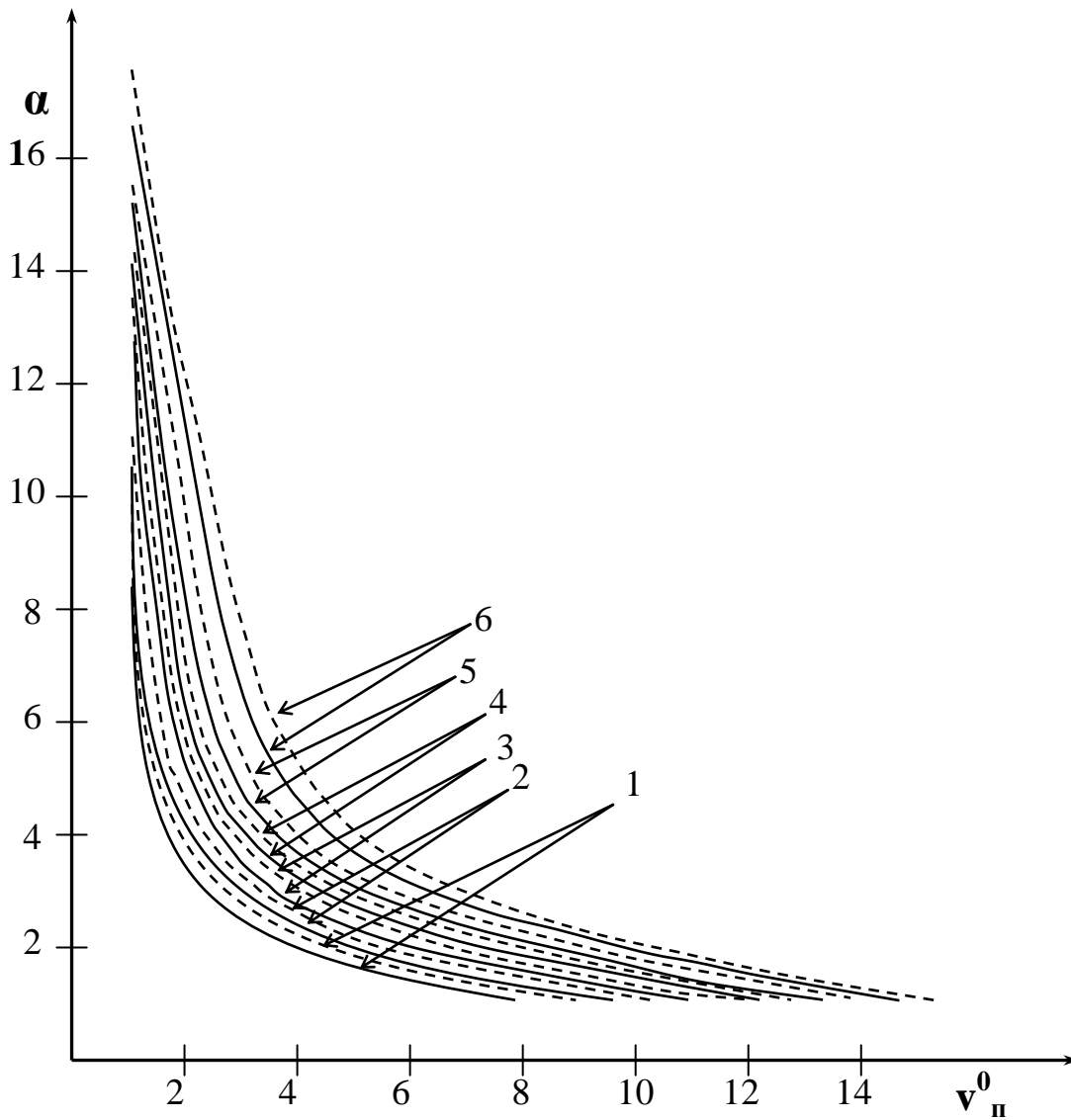
$l_{\text{цеп}}$	$t_{\text{cc}}, ^\circ\text{C}$	$l_{\text{цеп}}$	$t_{\text{cc}}, ^\circ\text{C}$	$l_{\text{цеп}}$	$t_{\text{cc}}, ^\circ\text{C}$	$l_{\text{цеп}}$	$t_{\text{cc}}, ^\circ\text{C}$
2,0	464	4,4	337	6,8	272	9,2	245
2,1	463	4,5	333	6,9	270	9,3	244
2,2	461	4,6	326	7,0	269	9,4	243
2,3	459	4,7	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

Додаток 17. Коефіцієнти для визначення температури самоспалахування окремих класів органічних сполук

$$t_{\text{cc}} = a \cdot t_{\text{cc}}^{\text{алк}} + b$$

Сполуки	a	b
Спирти	0,6796	121,2
Сполуки з гр. – NH₂	0,4722	170,4
Ароматичні сполуки	0,6412	252,9
Форміати	0,7719	81,5
Ацетати	0,7909	52,0
Пропіонати	0,7158	91,3
Кислоти	0,7556	86,0

Додаток № 18. Номограма визначення коефіцієнта надлишку повітря



$\frac{S_{\text{пож}}}{S_{\text{підл}}} \leq 0,25$ – пунктирна

$0,25 < \frac{S_{\text{пож}}}{S_{\text{підл}}} \leq 1$ – суцільна

Крива 1 – $S_{\text{прип}}/S_{\text{пож}}, < 0,04$

Крива 2 – $0,04 < S_{\text{прип}}/S_{\text{пож}}, < 0,06$

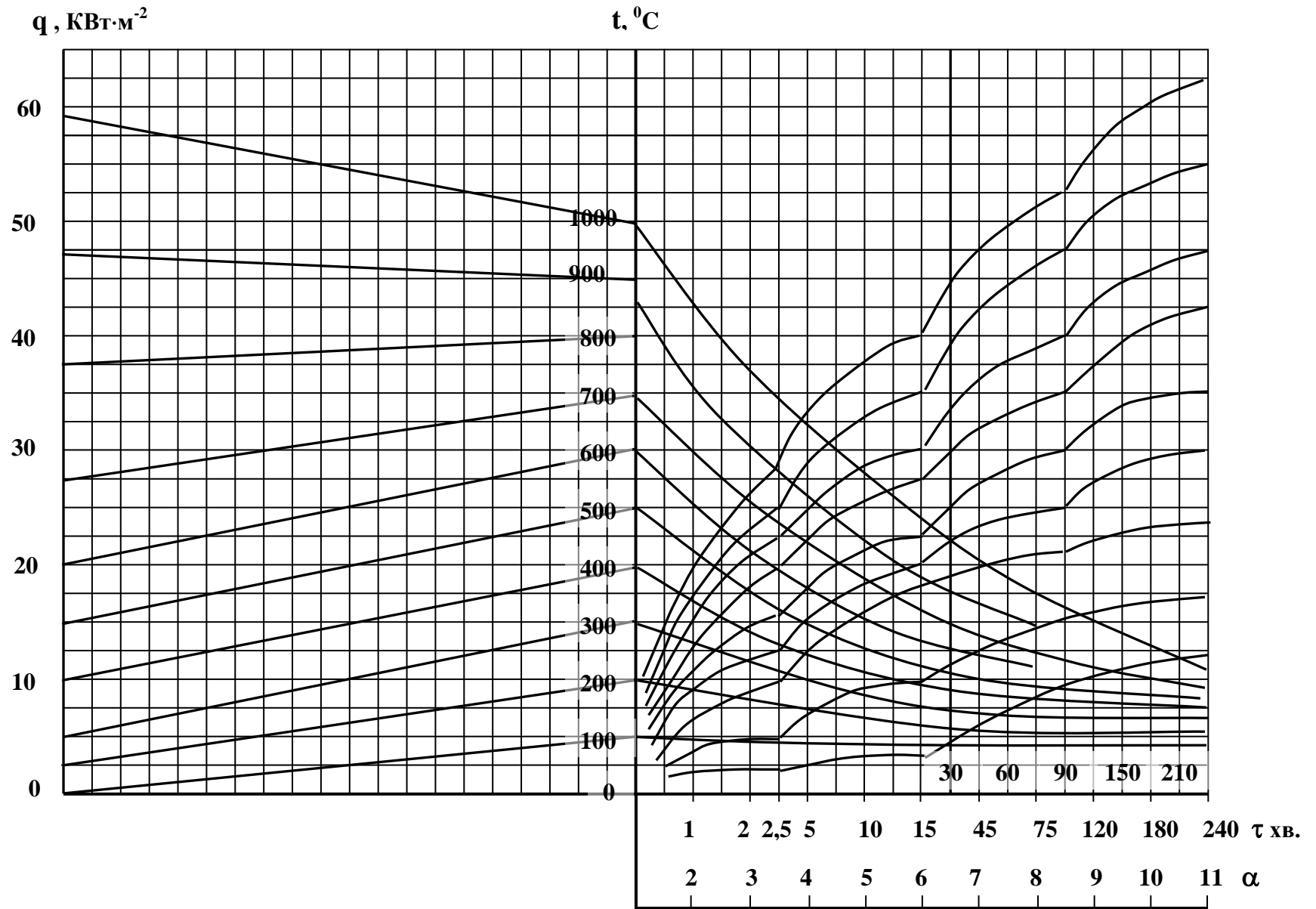
Крива 3 – $0,06 < S_{\text{прип}}/S_{\text{пож}}, < 0,10$

Крива 4 – $0,10 < S_{\text{прип}}/S_{\text{пож}}, < 0,17$

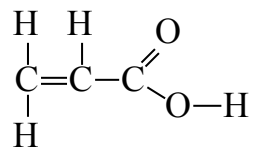
Крива 5 – $0,17 < S_{\text{прип}}/S_{\text{пож}}, < 0,25$

Крива 6 – $0,25 < S_{\text{прип}}/S_{\text{пож}}, < 0,33$

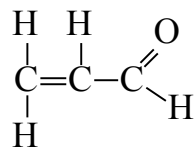
Додаток № 19. Номограма визначення температури пожежі



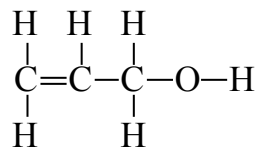
Додаток № 20. Структурні формули сполук для індивідуальних завдань



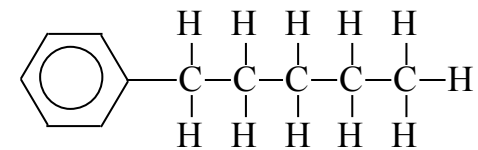
Акрілова кислота (1)



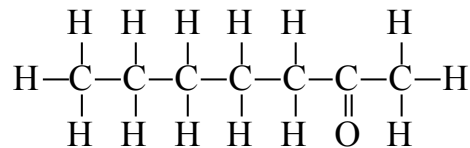
Акролеїн (2)



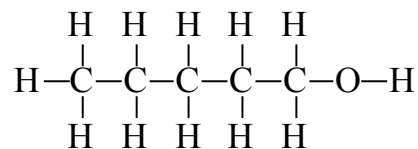
Аліловий спирт (3)



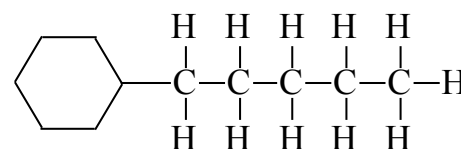
Амілбензол (4)



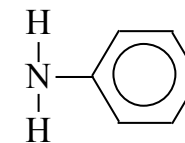
Амілметилкетон (5)



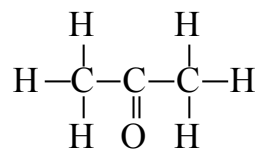
Аміловий спирт (6)



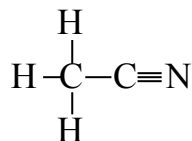
Амілциклогексан (7)



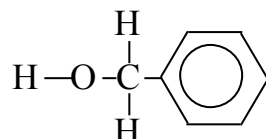
Анілін (8)



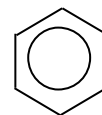
Ацетон (9)



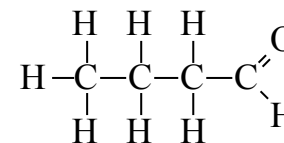
Ацетонітрил (10)



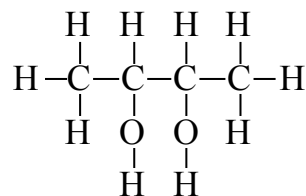
Бензиловий спирт (11)



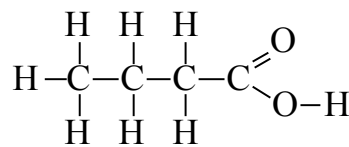
Бензол (12)



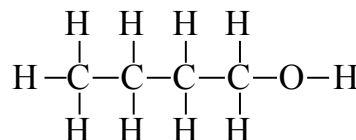
Бутаналь (13)



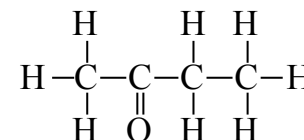
Бутандіол-2,3 (14)



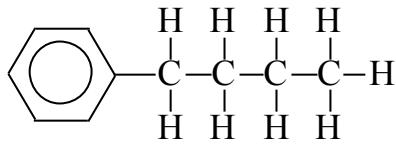
Бутанова кислота (15)



Бутанол (16)

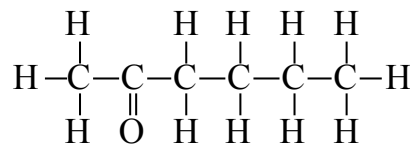


Бутанон (17)



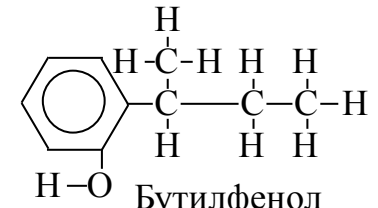
Бутилбензол

(18)



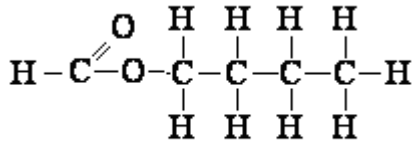
Бутилметилкетон

(19)



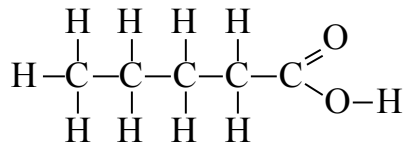
Бутилфенол

(20)



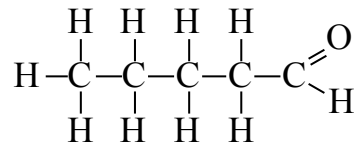
Бутилформіат

(21)



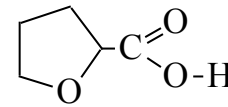
Валеріанова кислота

(22)



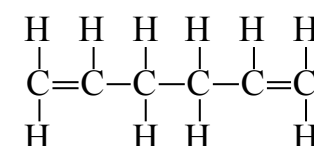
Валеріановий альдегід

(23)



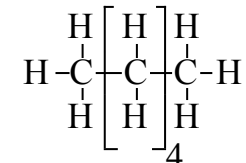
Валеролактон

(24)



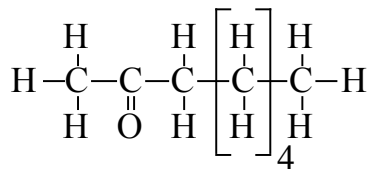
Гексадієн

(25)



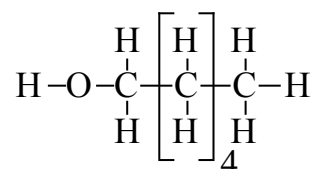
Гексан

(26)



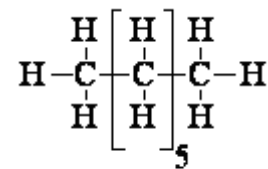
Гексилметилкетон

(27)



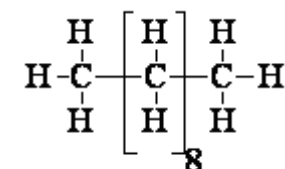
Гексильовий спирт

(28)



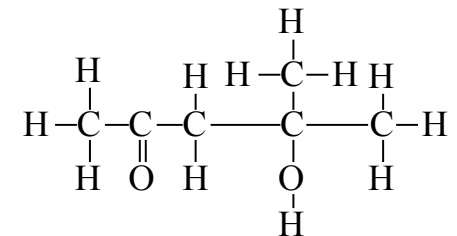
Гептан

(29)



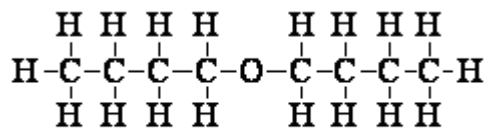
Декан

(30)



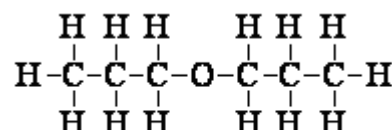
Диацетоновий спирт

(31)



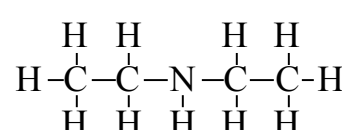
Дибутіловий ефір

(32)



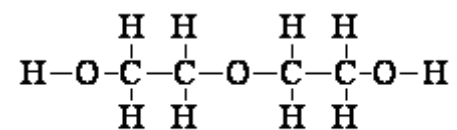
Дипропіловий ефір

(33)



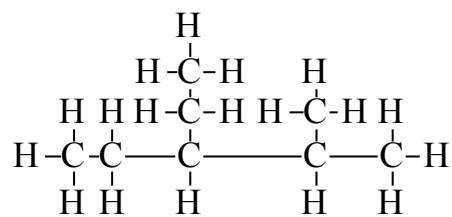
Диетиламін

(34)

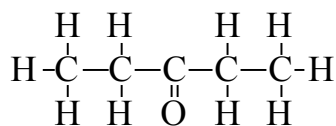


Диетіловий ефір

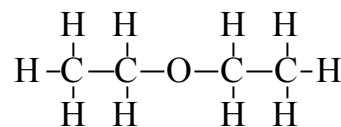
(35)



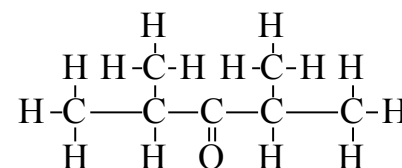
Диетилізопропілметан (36)



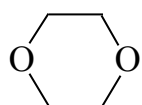
Диетилкетон (37)



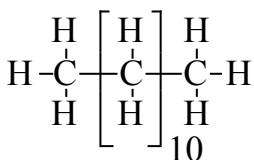
Диетиловий ефір (38)



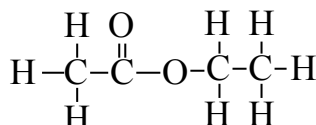
Диізопропілкетон (39)



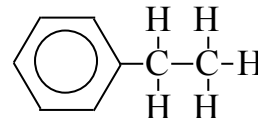
Диоксан (40)



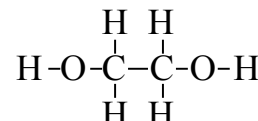
Додекан (41)



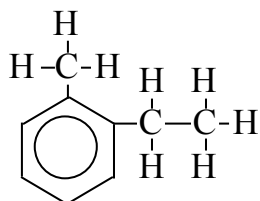
Етилацетат (42)



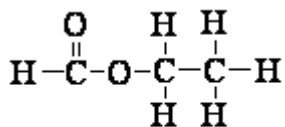
Етилбензол (43)



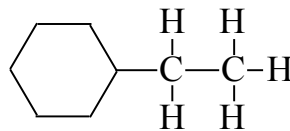
Етиленгліколь (44)



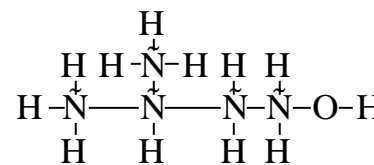
o-Етилтолуол (45)



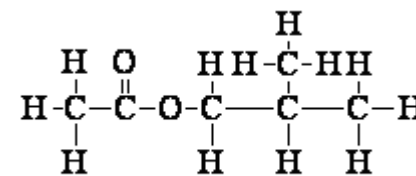
Етилформіат (46)



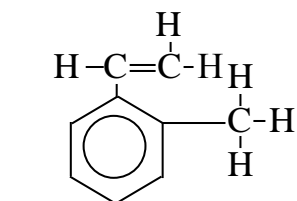
Етилциклогексан (47)



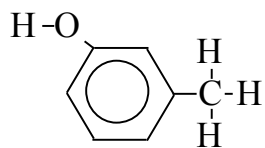
²çî àì æî âèé ñî èðò (48)



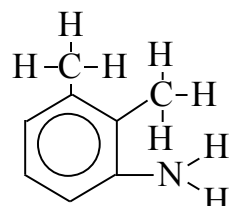
Ізобутилацетат (49)



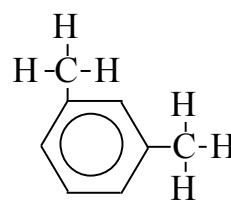
²çî î ðî î áî æááî çî è (50)



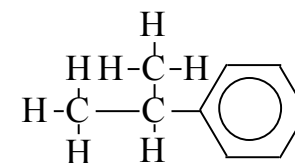
m-Крезол (51)



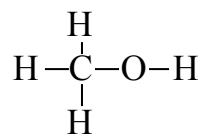
Ксилідин (52)



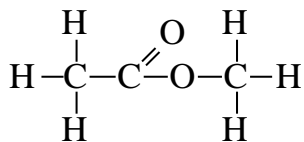
m-Ксилол (53)



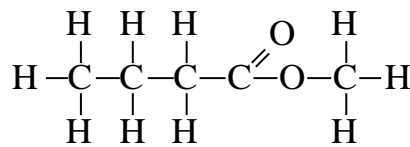
Кумол (54)



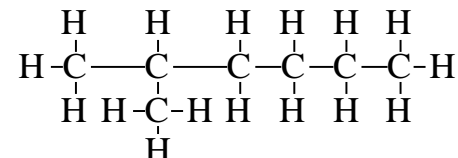
Метанол (55)



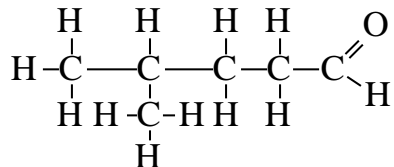
Ì àdèèäöâdàò (56)



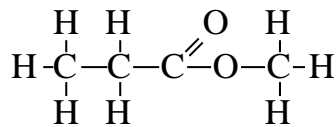
Ì àdèéáóòèdàò (57)



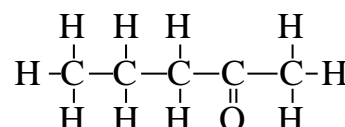
2-Ì àdèèääêñàí (58)



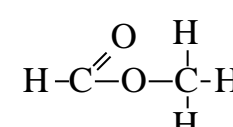
Ì àdèèí áí dâèüäãã (59)



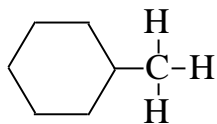
Ì àdèèí ðí ï ñí àò (60)



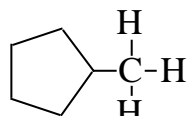
Ì àdèèí ðí ï ñèâdîí (61)



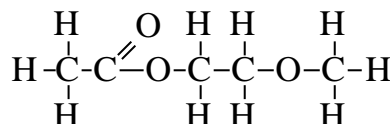
Ì àdèèôî ðì ãdò (62)



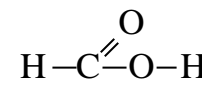
Ì àdèèöèèèí ãâêñàí (63)



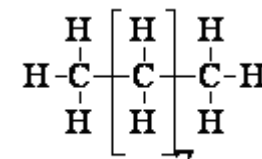
Ì àdèèöèèèí ï áí dâí (64)



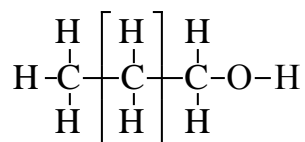
Ì àdî êñè àdèèäöâdàò (65)



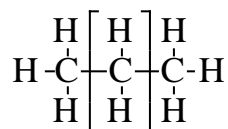
Ì ódâø èí à èèñèí dâ (66)



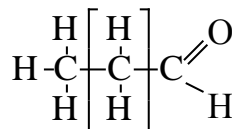
Нонан (67)



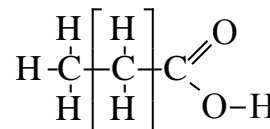
Í îí ñèí âèé ñí èðò (68)



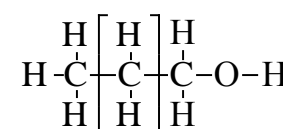
Í èdâí (69)



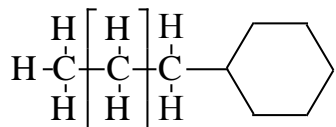
Í èdâí àèü (70)



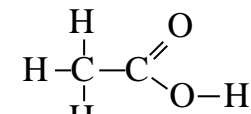
Í èdâí îâà èèñèí dâ (71)



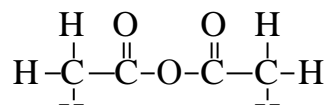
Í èdèèí âèé ñí èðò (72)



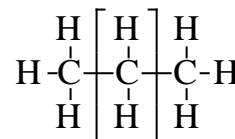
Í èdèèöèèèí ãâêñàí (73)



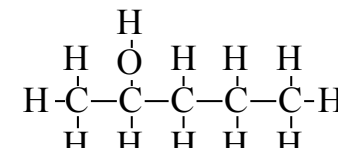
Í ödî ââ èèñèí dâ (74)



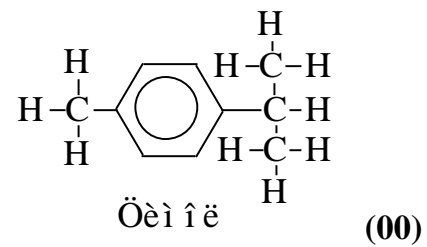
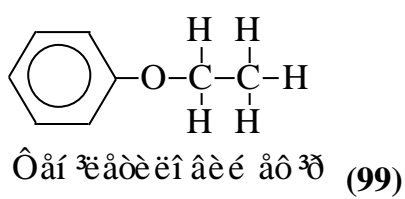
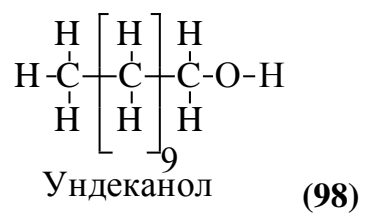
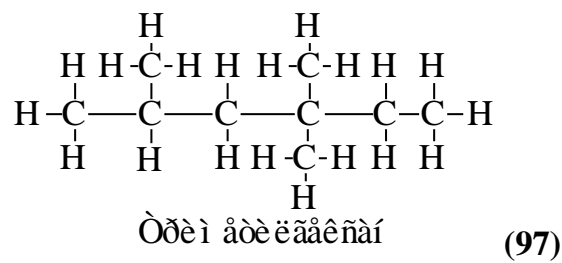
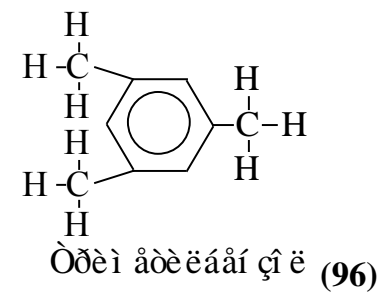
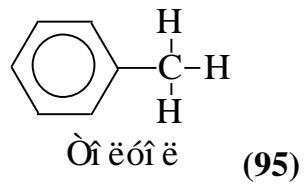
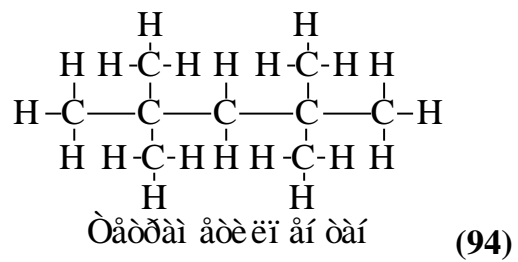
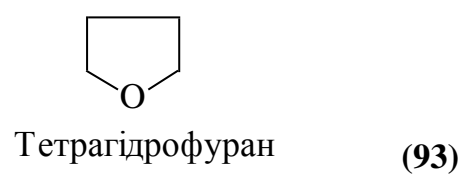
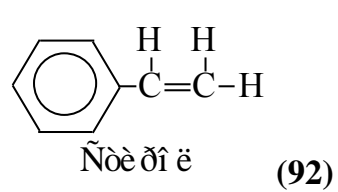
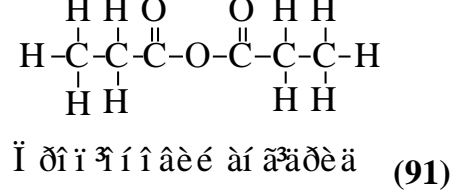
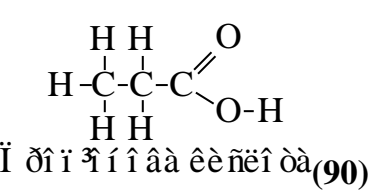
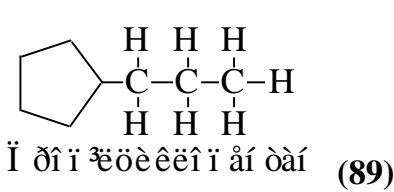
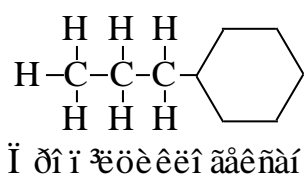
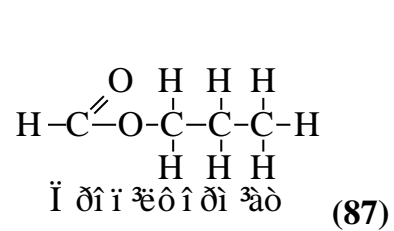
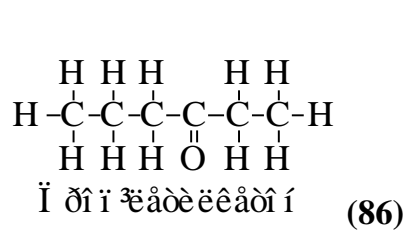
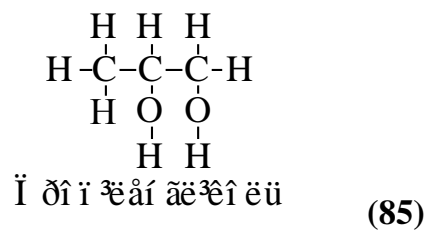
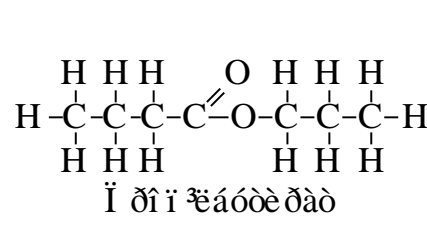
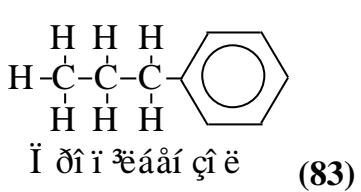
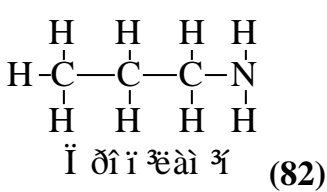
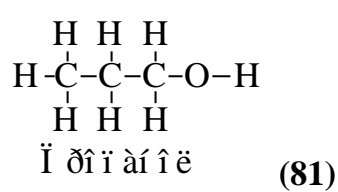
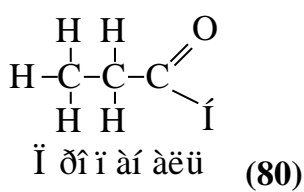
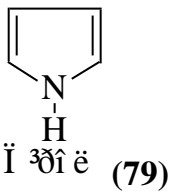
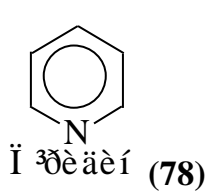
Í ödî âèé áí ãâðèä (75)



Í áí dâí (76)



Пентанол-2 (77)



Тарахно Олена Віталіївна
Жерноклев Костянтин Володиславович
Трегубов Дмитро Георгійович

Теорія розвитку та припинення горіння

Методичні вказівки до вивчення курсу

Підп. до друк.
Друк – ризограф
Тираж прим.

Формат 60x84 1/16
Умовн.-друк. арк.
Вид.№ Зам.№

НУЦЗУ, м. Харків, вул. Чернишевська, 94