

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

ТЕОРІЯ РОЗВИТКУ ТА ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ

Практикум

Частина I

**МІНІСТЕРСТВО УКРАЇНИ З ПИТАНЬ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
ТА У СПРАВАХ ЗАХИСТУ НАСЕЛЕННЯ
ВІД НАСЛІДКІВ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ КАТАСТРОФИ**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

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

ТЕОРІЯ РОЗВИТКУ ТА ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ

Практикум

ЧАСТИНА І

Харків 2010

УДК 614.84 +519

ББК 38.96

Т 34

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

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

Тарахно О.В.

Т 34

Теорія розвитку та припинення горіння. Практикум. Частина І: / О.В. Тарахно, Д.Г. Трегубов, К.В. Жернокльов, А.І. Шепелева, В.В. Коврегін — Х.: НУЦЗУ, КП «Міська друкарня», 2010. — 309 с.
ISBN 978-617-619-009-7

У навчальному виданні стисло викладені основні положення курсу «Теорія розвитку та припинення горіння» за навчальною програмою для пожежно-технічних закладів. Надано методичні поради, алгоритми і приклади розв'язання типових задач. Наведено умови задач для практичних і контрольних робіт, питання для самоконтролю та довідковий матеріал.

У першій частині практикуму розглянуто загальну характеристику процесу горіння та закономірності і параметри процесу виникнення горіння.

Видання призначено для підготовки бакалаврів та спеціалістів, що навчаються у галузі знань "Цивільна безпека" за напрямками "Цивільний захист", "Охорона праці", "Пожежна безпека".

УДК 614.84 +519
ББК 38.96

ISBN 978-617-619-009-7

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

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ	7
Глава 1. Матеріальний баланс процесу горіння	10
§ 1. Визначення кольору дифузійного полум'я за складом горючої речовини	10
§ 2. Складання рівняння реакції горіння індивідуальної речовини	16
§ 3. Розрахунок матеріального балансу процесу горіння.....	24
Завдання для самоконтролю	51
Глава 2. Енергетичний баланс процесу горіння	60
§ 1. Розрахунок теплоти згоряння індивідуальних речовин та складних матеріалів	67
§ 2. Розрахунок температури горіння речовин	81
§ 3. Розрахунок температури вибуху паро- та газоповітряних сумішей	107
Завдання для самоконтролю	120
РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ТА ПАРАМЕТРИ ПРОЦЕСУ ВИНИКНЕННЯ ГОРІННЯ	127
Глава 1. Самоспалахування горючих сумішей	131
§ 1. Температура самоспалахування.....	131
§ 2. Розрахунок температури самоспалахування.....	137

Завдання для самоконтролю	162
Глава 2. Самозаймання речовин і матеріалів	167
§ 1. Хімічне самозаймання.....	170
§ 2. Теплове самозаймання	198
Завдання для самоконтролю	210
Глава 3. Вимушене запалювання	218
§ 1. Визначення спроможності електричних розрядів до підпалювання	219
§ 2. Визначення спроможності розжарених тіл до підпалювання	228
§ 3. Визначення можливості підпалювання горючих речовин променистим потоком тепла від полум'я	249
Завдання для самоконтролю	259
ДОДАТКИ.....	264
ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ	300
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК	304
ЛІТЕРАТУРА.....	306

ВСТУП

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

Основою навчальної дисципліни “Теорія розвитку та припинення горіння” є вивчення закономірностей процесів виникнення та розвитку горіння, умов, за яких горіння може спричинити вибух, методик розрахункового та експериментального визначення основних параметрів пожежовибухонебезпеки речовин та матеріалів, основних положень теорії припинення горіння, фізико-хімічних основ розвитку пожежі та механізму дії різноманітних вогнегасних засобів.

Теоретичний матеріал базується на основі таких дисциплін як фізика, хімія, термодинаміка та теплопередача. Як дисципліна професійного напрямку “Теорія розвитку та припинення горіння” узагальнює та використовує теоретичні дослідження у галузі пожежовибухонебезпеки, практичний досвід органів цивільного захисту щодо протипожежних заходів, а також щодо гасіння пожеж. Як наукова дисципліна “Теорія розвитку та припинення горіння” є теоретичною основою для вирішення науково-дослідних задач, проведення інженерних розрахунків щодо забезпечення умов пожежної безпеки на об’єктах народного господарства, прогнозування динаміки небезпечних факторів пожежі.

Наведені у практикумі методики дозволяють визначити параметри пожежної безпеки речовин та

матеріалів, спрогнозувати наслідки надзвичайних ситуацій техногенного походження. Результати такого прогнозування необхідні практичним робітникам підрозділів цивільного захисту для забезпечення безпеки та захисту населення і територій, матеріальних і культурних цінностей та довкілля від негативних наслідків надзвичайних ситуацій.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ

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

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

Процеси горіння класифікують за кількома ознаками.

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

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

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

2. За способом утворення горючої суміші.

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

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

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

3. За механізмом поширення горіння.

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

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

4. За газодинамічним режимом горіння.

Ламінарне горіння відбувається за умови, що компоненти горючої суміші надходять до зони реакції повільно, за законами молекулярної або слабкої конвекційної дифузії. Напрямок руху окремих частин потоку співпадає.

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

Параметром, що характеризує газодинамічний режим горіння, є числове значення критерію Рейнольдса. Якщо $Re < 2300$, то полум'я можна вважати ламінарним, якщо $2300 < Re < 10\ 000$ – полум'я є перехідним, а якщо $Re > 10000$ – горіння відносять до турбулентного.

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

ГЛАВА 1. МАТЕРІАЛЬНИЙ БАЛАНС ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ

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

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

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

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

У зоні горіння відбуваються швидкі реакції згорання продуктів попереднього окислення, карбону та водню до кінцевих продуктів (CO₂, H₂O).

Спектри випромінювання двоатомних (CO) та трьохатомних газів (CO₂, H₂O) розташовані за межами світлосприйняття людини, тому їх "внеском" у колір полум'я можна знехтувати. Якщо в зону горіння потрапляє молекулярний вуглець, то він розжарюється, і це зумовлює світіння зони горіння. Якщо молекулярний вуглець не встигає окислитися у зоні горіння, то він потрапляє в зону продуктів горіння у вигляді сажі.

У разі кінетичного горіння в підготовчу зону надходить вже готова суміш у концентраціях, близьких

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

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

У процесі горіння у підготовчій зоні відбувається термічне розкладання молекули горючої речовини на складові хімічні елементи, радикали та функціональні групи, і тільки після цього у зоні горіння відбувається їх окислення. Якщо у складі горючої речовини достатньо кисню, то карбон, який утворюється при термічному розкладанні, встигає весь попередньо окислитись у підготовчій зоні до оксиду карбону CO, який у зоні горіння догоряє й утворює продукт повного згоряння – вуглекислий газ CO₂. У цьому випадку полум'я буде безбарвним або слабо блакитним. Так, наприклад, горить мурашина кислота.

Якщо частинки вуглецю потрапляють у зону горіння, то вони, розжарюючись, обумовлюють жовтий колір полум'я. За умови достатнього доступу повітря вуглець у зоні горіння встигає окислитися до оксиду та

діоксиду карбону, при цьому сажа не виділяється. Полум'я буде яскравим, але не кіптявим.

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

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

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

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

Практичне значення визначення кольору полум'я

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

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

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

речовини.

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

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

Таблиця 1.2 – Забарвлення полум'я сполуками деяких елементів

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

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

температуру зони реакції відповідно до таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Колір розжарених твердих тіл залежно від їх температури

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

Методика визначення кольору дифузійного полум'я

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

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

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

де n_{O} , n_{C} – відповідно число атомів кисню та карбону у молекулі;

μ_{O} , μ_{C} – відповідно молярна маса кисню та карбону, $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$;

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

3. Згідно з таблицею 1.1 визначити колір

дифузійного полум'я. Якщо результати визначення за киснем та карбоном розбігаються, колір полум'я визначити за киснем.

Приклад розв'язання задачі

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

Розв'язання

1. Розраховуємо молярну масу горючої речовини:

$$\mu_{\text{тр}} = n_C \cdot 12 + n_H \cdot 1 + n_O \cdot 16 = 6 \cdot 12 + 10 \cdot 1 + 3 \cdot 16 = 130 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}.$$

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

вміст O:

$$\varphi_O = \frac{3 \cdot 16 \cdot 100}{130} = 36,9 \%;$$

вміст C:

$$\varphi_C = \frac{6 \cdot 12 \cdot 100}{130} = 55,4 \%.$$

3. За таблицею 1.1 визначаємо колір дифузійного полум'я: вміст O – від 25 до 50 %, вміст C – від 50 до 75 %, отже дифузійне полум'я буде яскравим, без кіптяви.

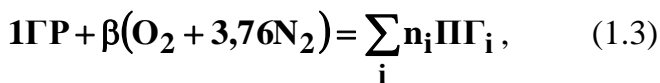
§ 2. Складання рівняння реакції горіння індивідуальної речовини

Горіння – основне явище під час пожежі. За своєю сутністю це фізико-хімічний процес, в основі якого лежить швидка реакція окиснення, що протікає при контакті горючої речовини та окисника з утворенням продуктів горіння та виділенням великої кількості енергії.

Горіння під час пожежі здійснюється у повітряному середовищі. З горючою речовиною взаємодіє тільки кисень, інші компоненти повітря, що потрапляють до зони горіння, в хімічні реакції не вступають, але беруть участь у процесі тепломасообміну, тому при складанні реакції горіння слід враховувати їх наявність [2], [3].

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

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



де n_i – число молів продуктів горіння i -го типу (ПГ_{*i*}), моль;

β – стехіометричний коефіцієнт, який показує число молів кисню, необхідного для повного згорання одного моля горючої речовини.

Стехіометричний коефіцієнт β можна визначити розрахунком за формулою:

$$\beta = n_C + n_S + \frac{n_H - n_X}{4} - \frac{n_O}{2} + \frac{5n_P}{4}, \quad (1.4)$$

де $n_C, n_H, n_O, n_P, n_S, n_X$ – число атомів карбону, гідрогену, кисню, фосфору, сульфуру, галогену у складі горючої речовини.

За умови зміни концентрації компонентів суміші змінюється швидкість хімічної реакції. Максимального значення швидкість реакції набуває за еквівалентного співвідношення компонентів, коли реакція відбувається цілком без надлишку або нестачі речовин, що реагують. Це співвідношення визначається стехіометричними коефіцієнтами у рівнянні реакції.

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

Розрахунок стехіометричної концентрації здійснюють за реакцією горіння (1.3). Горюча суміш складається з одного моля горючої речовини та $\beta \cdot (1 + 3,76)$ молів повітря. Загальна кількість вихідної горючої суміші складе $(1 + \beta \cdot 4,76)$ молів. Загальне число молів горючої суміші приймаємо за 100 % і знаходимо відсоток

горючої речовини у вихідній суміші із пропорції:

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

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

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

Якщо горіння відбувається у середовищі кисню, то стехіометричну концентрацію горючої речовини розраховують за формулою:

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

При розрахунку масової стехіометричної концентрації парів або газів враховують співвідношення між масою й об'ємом моля речовини. При цьому масову стехіометричну концентрацію горючих речовин можна визначити за формулою:

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

або безпосередньо з рівняння реакції горіння у повітрі:

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

за умови горіння у середовищі кисню:

$$\Phi'_{\text{стм}} = \frac{1000\mu_{\text{гр}}}{(1 + \beta)V_{\mu}}, \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (1.9)$$

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

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

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

Практичне значення складання рівняння реакції і визначення стехіометричної концентрації

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

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

3. Стехіометрична концентрація горючої речовини визначає умови найкращого згоряння речовини. За цих умов параметри горіння набувають найбільш небезпечних значень: температура самоспалахування речовини є

найменшою, температура горіння, тиск вибуху, витрата вогнегасних речовин для гасіння пожежі – найбільшими.

Методика складання рівняння реакції горіння

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

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

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

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

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

Елемент горючої речовини	Продукт, що утворюється у процесі горіння
карбон С	оксид карбону (IV) CO_2
гідроген Н	вода H_2O
сульфур S	оксид сульфуру (IV) SO_2
фосфор P	оксид фосфору (V) P_2O_5
силіцій Si	оксид силіцію (IV) SiO_2
метал	оксид металу
нітроген N	молекулярний азот N_2
галогени (F, Cl, Br, J)	галоген гідрогену (HF, HCl, HBr, HJ)
оксиген O	переходить до складу продуктів горіння

Галоген гідрогену утворюється внаслідок взаємодії галогенів з атомами гідрогену, що входять до складу

горючої речовини. Якщо атомів галогену більше, ніж гідрогену, то утворюється молекулярний галоген.

Найвний у горючій речовині кисень також вступає до реакції окиснення подібно до кисню повітря; при цьому відповідно зменшується потреба в повітрі для горіння.

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

6. Для полегшення розрахунку стехіометричного коефіцієнта β можна скористатися формулою (1.4).

Приклад розв'язання задачі

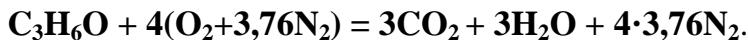
Скласти рівняння реакції горіння основних класів органічних речовин у повітрі.

Розв'язання

Вуглеводні: горіння пропану у повітрі:



Оксигенвмісні: горіння ацетону у повітрі:



Нітрогенвмісні: горіння діетиламіну у повітрі:



Сульфурвмісні: горіння тіофену у повітрі:



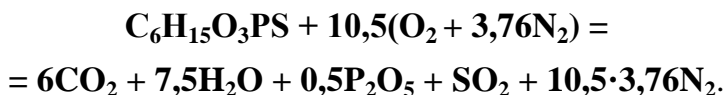
Фосфоровмісні: горіння фосфористого водню у повітрі:



Галогеновмісні: горіння дихлоретану у повітрі:



Елементоорганічні речовини: горіння триетилтіофосфату у повітрі:



Методика розрахунку стехіометричної концентрації горючої речовини

1. Скласти рівняння реакції горіння, визначити значення стехіометричного коефіцієнта реакції горіння β .

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

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

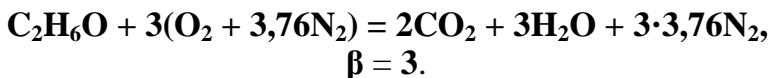
4. Розрахувати масову стехіометричну концентрацію за формулою (1.8).

Приклад розв'язання задачі

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

Розв'язання

1. Складаємо рівняння реакції горіння етилового спирту у повітрі, визначаємо стехіометричний коефіцієнт β :



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

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

3. Розраховуємо молярну масу горючої речовини:

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

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

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

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

§ 3. Розрахунок матеріального балансу процесу горіння

Матеріальний баланс реакції горіння відображає закон збереження маси речовини М.В. Ломоносова, а саме: маса речовин, що вступила у реакцію, дорівнює масі речовин, які утворилися під час реакції.

Розрахунок матеріального балансу дозволяє визначити витрату повітря на горіння, об'єм і склад продуктів горіння, температуру горіння й температуру вибуху, максимальний тиск вибуху, температуру пожежі, інтенсивність газообміну та інші параметри, що визначають характер розвитку пожежі за різних умов [2], [3].

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

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

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

Дим – це дисперсна система, що складається з твердих і рідких частинок розміром $10^{-5} \div 10^{-8}$ м (дисперсної фази), завислих у газовому дисперсійному середовищі.

Саме тверді та рідкі продукти горіння зумовлюють непрозорість диму. Непрозорий дим утворюють і продукти попереднього розкладання, які є найбільш токсичними й небезпечними. За статистикою, 70 % загиблих під час

пожежі постраждали через отруєння токсичними продуктами горіння та продуктами термічного розкладання речовин.

За умови повного окиснення горючої речовини утворюються *продукти повного згорання* (H_2O , CO_2 , SO_2 і т.п.). За умови нестачі кисню у складі горючої суміші утворюються *продукти неповного згорання* (C , CO , CH_4O). До складу продуктів неповного згорання відносяться продукти термоокиснювального розкладання (піролізу), який відбувається внаслідок нагрівання горючих речовин випромінюванням полум'я та гарячими продуктами горіння. При цьому можуть утворюватися спирти, альдегіди, кетони, HCl , HCN та ін.

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

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

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

Небезпека диму зумовлена його високою температурою,

токсичністю, зниженим вмістом кисню, непрозорістю, можливістю утворення у закритих приміщеннях продуктами термоокиснювального розкладу та неповного згорання вибухонебезпечних сумішей із повітрям.

Для зниження небезпеки диму використовують розпорошені струмені води (зниження температури та осадження диму) та видалення диму за допомогою димососів і димових люків.

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

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

Питома кількість повітря – кількість повітря, необхідна для згорання одиниці кількості горючої речовини (1 моль, 1 м^3 , 1 кг).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Для характеристики ступеня забезпеченості повітрям процесу горіння використовують поняття *коефіцієнт надлишку повітря* (α), який показує, у скільки разів кількість повітря, що дійсно надходить до зони горіння, відрізняється від теоретично необхідної кількості повітря для повного згорання горючої речовини:

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

де $n_{\text{пов}}^0$ – питоме теоретичне число молів повітря, необхідне для повного згорання 1 моля горючої речовини;

$n_{\text{пов}}$ – питоме дійсне число молів повітря, що надходить до зони реакції у дійсності при згорянні 1 моля горючої речовини.

Отже, питоме дійсне число молів повітря дорівнює:

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

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

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

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

$$n_{\text{пг}} = n_{\text{пг}}^0 + \Delta n_{\text{пов}}, \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1};$$

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

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

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

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

$$\varphi_{N_2} = 100 \frac{\alpha \cdot 3,76\beta}{n_{пт}}, \% \quad (1.20)$$

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

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

Якщо горить газ, то на 1 кмоль горючої речовини, що займає об'єм $v_{\mu}^{гр}$, m^3 , витрачається теоретичний об'єм повітря, рівний $n_{пов}^0 v_{\mu}^{пов}$, m^3 . Тоді питомий (на 1 m^3 горючої речовини) теоретичний об'єм повітря можна знайти з пропорції:

$$v_{\mu}^{гр} m^3 ГР \rightarrow n_{пов}^0 v_{\mu}^{пов} = 4,76\beta v_{\mu}^{пов} m^3 \text{ повітря,}$$

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

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

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

Якщо горюча речовина знаходиться за тих же умов, що і повітря, то $v_{\mu}^{\text{гр}} = v_{\mu}^{\text{пов}}$. Отже за умови згоряння 1 м³ газу або пари розрахунок питомих теоретичних та дійсних об'ємів співпадає з розрахунком відповідного числа молів:

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

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

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

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

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

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

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

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

За умови гомогенного горіння речовин, що знаходяться у рідкому чи твердому агрегатному стані,

відбувається попередній перехід цих речовин до газоподібної фази.

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

$$\begin{aligned} \mu \text{ кг ГР} &\rightarrow n_{\text{пов}}^0 \cdot V_{\mu}^{\text{пов}} = 4,76\beta V_{\mu}^{\text{пов}} \text{ м}^3 \text{ повітря,} \\ 1 \text{ кг ГР} &\rightarrow v_{\text{пов}}^0 \text{ м}^3 \text{ повітря,} \\ v_{\text{пов}}^0 &= n_{\text{пов}}^0 \frac{V_{\mu}^{\text{пов}}}{\mu_{\text{ГР}}}, \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}. \end{aligned} \quad (1.28)$$

За аналогією можна розрахувати питомий теоретичний об'єм продуктів горіння:

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

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

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

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

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

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

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

Практичне значення розрахунку матеріального балансу

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

§ 3.1 Розрахунок матеріального балансу процесу горіння індивідуальної речовини

Методика розрахунку матеріального балансу горіння індивідуальної речовини

1. Скласти рівняння реакції горіння (1.3), визначити стехіометричний коефіцієнт β (1.4).
2. Розрахувати питоме теоретичне число молів повітря за формулою (1.12).
3. Розрахувати питоме теоретичне число молів продуктів горіння за формулою (1.13).
4. За умови горіння з надлишком повітря розрахувати дійсне питоме число молів повітря та продуктів горіння за формулами (1.15), (1.17).
5. Розрахувати склад продуктів горіння у відсотках за формулами (1.15)–(1.17).

6. Розрахувати питомий теоретичний об'єм повітря та продуктів горіння залежно від агрегатного стану горючої речовини.

6.1. Якщо горюча речовина – газ, провести розрахунок за формулами (1.22) та (1.24).

6.2. Якщо горюча речовина знаходиться у твердому або рідкому стані, провести розрахунок за формулами (1.28) та (1.29).

7. Розрахувати дійсні об'єми повітря та продуктів горіння за формулами (1.23) та (1.25).

8. Розрахувати повні об'єми повітря та продуктів горіння за формулами (1.26) та (1.27) або (1.30) та (1.31).

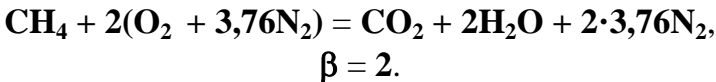
9. Розрахувати об'єм продуктів горіння за температури горіння $v_{\text{пр}}^{\text{T}_{\text{гор}}}$ за формулою (1.11).

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати об'єм повітря, об'єм і склад продуктів горіння при згорянні 10 м^3 метану CH_4 , якщо горіння протікає за нормальних умов з коефіцієнтом надлишку повітря $\alpha = 1,2$. Температура продуктів горіння дорівнює 1200 К .

Розв'язання

1. Складаємо рівняння реакції горіння:



2. Визначаємо питомих теоретичне число молів повітря:

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

3. Розраховуємо пито́ме теоретичне число мо́лів продуктів горіння:

$$\begin{aligned} n_{\text{пт}}^0 &= n\text{CO}_2 + n\text{H}_2\text{O} + \beta \cdot 3,76\text{N}_2 = \\ &= 1 + 2 + 2 \cdot 3,76 = 10,52 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \end{aligned}$$

4. Розраховуємо дійсне пито́ме число мо́лів повітря та продуктів горіння з урахуванням надлишку повітря:

$$\begin{aligned} n_{\text{пов}} &= 1,2 \cdot 9,52 = 11,42 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}; \\ n_{\text{пт}} &= 10,52 + (1,2 - 1) \cdot 9,52 = 12,42 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \end{aligned}$$

5. Визначаємо відсотковий склад продуктів горіння:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{CO}_2} &= 100 \frac{1}{12,42} = 8,05\%; \\ \varphi_{\text{H}_2\text{O}} &= 100 \frac{2}{12,42} = 16,1\%; \\ \varphi_{\text{O}_2} &= \frac{(1,2 - 1) \cdot 2 \cdot 100}{12,42} = 3,21\%; \\ \varphi_{\text{N}_2} &= \frac{1,2 \cdot 2 \cdot 3,76 \cdot 100}{12,42} = 72,64\%. \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} v_{\text{пов}}^0 &= 9,52 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}; \\ v_{\text{пт}}^0 &= 10,52 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}. \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}v_{\text{пов}} &= \mathbf{11,42 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}}; \\v_{\text{пр}} &= \mathbf{12,42 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}}.\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}V_{\text{пов}} &= v_{\text{пов}} V_{\text{гр}} = \mathbf{11,42 \cdot 10 = 114,2 \text{ м}^3}; \\V_{\text{пр}} &= v_{\text{пр}} V_{\text{гр}} = \mathbf{12,42 \cdot 10 = 124,2 \text{ м}^3}.\end{aligned}$$

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

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

Висновок: для згорання 10 м^3 метану за нормальних умов необхідно $114,2 \text{ м}^3$ повітря, об'єм продуктів горіння за температури 1200 К буде дорівнювати $545,9 \text{ м}^3$. Склад продуктів горіння такий: CO_2 – 8,05 %; H_2O – 16,1 %; O_2 - 3,2 %; N_2 – 72,64 %.

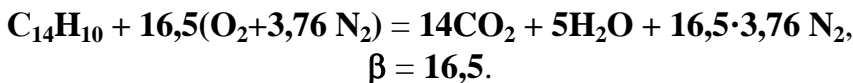
Приклад розв'язання задачі

Розрахувати об'єми повітря, продуктів горіння і відсотковий вміст CO_2 при згорянні 2 кг нафталіну $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$, якщо горіння відбувалось за температури навколишнього середовища $10 \text{ }^\circ\text{C}$, тиску повітря $100,0 \text{ кПа}$; коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1,8$,

температура продуктів горіння дорівнює 900 °С.

Розв'язання

1. Складаємо рівняння реакції горіння:



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

$$n_{\text{пов}}^0 = 4,7616,5 = 78,54 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

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

$$n_{\text{пг}}^0 = n\text{CO}_2 + n\text{H}_2\text{O} + v \cdot 3,76\text{N}_2 =$$

$$= 14 + 5 + 16,5 \cdot 3,76 = 81,0 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

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

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

$$n_{\text{пг}} = n_{\text{пг}}^0 + (\alpha - 1)n_{\text{пов}}^0 =$$

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

5. Розраховуємо відсотковий вміст CO₂ у складі продуктів горіння:

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

6. Розраховуємо питомі теоретичні об'єми повітря та продуктів горіння:

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

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

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

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

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

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

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

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

8. Розраховуємо повні об'єми повітря $V_{\text{пов}}$ та продуктів горіння $V_{\text{пг}}$ за даних умов:

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

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

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

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

Висновок: для згоряння двох кілограмів нафталіну за даних умов необхідно $37,4 \text{ м}^3$ повітря, при цьому продукти горіння займають об'єм $157,6 \text{ м}^3$, а вміст CO_2 у продуктах горіння дорівнює 9,7 %.

§ 3.2 Розрахунок матеріального балансу процесу горіння складних речовин та матеріалів

§ 3.2.1. Горіння суміші газів

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

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

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

де φ_i – відсотковий вміст i -го горючого компонента в суміші, %;

β_i – стехіометричний коефіцієнт у рівнянні реакції горіння i -го горючого компонента суміші;

φ_{O_2} – відсотковий вміст кисню у вихідній суміші, %.

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

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

де $r_i = \frac{\varphi_i}{100}$ – об'ємна частка i -го горючого компонента у суміші;

$v_{\text{пр}i}^0$ – питомий теоретичний об'єм i -го продукту горіння, що утворюється при згорянні кожного горючого компонента суміші.

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

Таблиця 1.5 – Питомі об'єми продуктів згоряння деяких газів

Газ		Об'єм продукту згоряння, м ³ ·м ⁻³			
назва	формула	CO ₂	H ₂ O	N ₂	SO ₂
водень	H ₂	–	1,0	1,88	–
оксид карбону (II)	CO	1,0	–	1,88	–
сірководень	H ₂ S	–	1,0	5,64	1,0
метан	CH ₄	1,0	2,0	7,52	–
ацетилен	C ₂ H ₂	2,0	1,0	9,40	–
етан	C ₂ H ₆	2,0	3,0	13,16	–
етилен	C ₂ H ₄	2,0	2,0	11,28	–
пропан	C ₃ H ₈	3,0	4,0	18,80	–
бутан	C ₄ H ₁₀	4,0	5,0	24,40	–
пентан	C ₅ H ₁₂	5,0	6,0	30,08	–

Методика визначення об'єму повітря та продуктів горіння за умови повного згоряння суміші газів

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

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

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

4. Розрахувати повний дійсний об'єм повітря, що витрачається за умови згоряння заданого об'єму газової суміші, за формулою (1.26).

5. Для полегшення подальших розрахунків скласти таблицю для визначення питомих об'ємів продуктів горіння, виходячи з об'ємних часток компонентів вихідної газової суміші.

6. Розрахувати питомий теоретичний об'єм продуктів горіння за умови згоряння суміші газів за формулою (1.33).

7. Розрахувати питомий та повний дійсні об'єми продуктів горіння з урахуванням коефіцієнта надлишку повітря за формулою (1.25, 1.27).

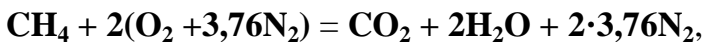
8. Розрахувати об'єм продуктів горіння за даних умов за формулою (1.11).

Приклад розв'язання задачі

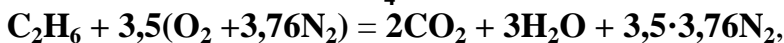
Визначити об'єм повітря і об'єм продуктів горіння, що утворюються за умови згоряння 10 м^3 супутнього газу такого складу: метан CH_4 – 58 %, етан C_2H_6 – 7,2 %, пропан C_3H_8 – 5,8 %, бутан C_4H_{10} – 7,0 %, пентан C_5H_{12} – 8,5 %, оксид карбону(IV) CO_2 – 3 %, азот N_2 – 10,5 %. Горіння відбувається із коефіцієнтом надлишку повітря $\alpha = 1,7$; температура горіння дорівнює $1000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Розв'язання

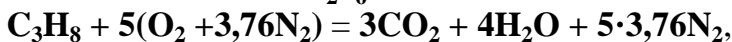
1. Складаємо рівняння реакції горіння та визначаємо стехіометричні коефіцієнти в рівняннях реакції горіння для кожного горючого компонента газової суміші:



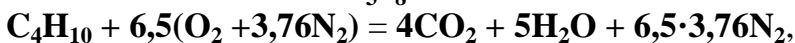
$$\beta_{\text{CH}_4} = 2;$$



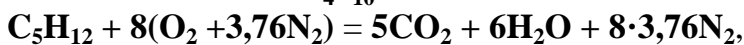
$$\beta_{\text{C}_2\text{H}_6} = 3,5;$$



$$\beta_{\text{C}_3\text{H}_8} = 5;$$



$$\beta_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 6,5;$$



$$\beta_{\text{C}_5\text{H}_{12}} = 8.$$

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

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

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

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

4. Розраховуємо повний дійсний об'єм витраченого повітря, необхідний для згорання даного об'єму газової суміші за даних умов:

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

5. Визначаємо питомі теоретичні об'єми продуктів горіння, виходячи з об'ємних часток компонентів вихідної газової суміші та коефіцієнтів табл. 1.5.

Компонент суміші	Об'ємна частка, r_i	Об'єм продуктів згорання, $\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$		
		CO_2	H_2O	N_2
метан CH_4	0,58	$0,58 \cdot 1$	$0,58 \cdot 2$	$0,58 \cdot 7,52$
етан C_2H_6	0,072	$0,072 \cdot 2$	$0,072 \cdot 3$	$0,072 \cdot 13,16$
пропан C_3H_8	0,058	$0,058 \cdot 3$	$0,058 \cdot 4$	$0,058 \cdot 18,8$
бутан C_4H_{10}	0,07	$0,07 \cdot 4$	$0,07 \cdot 5$	$0,07 \cdot 24,4$
пентан C_5H_{12}	0,085	$0,085 \cdot 5$	$0,085 \cdot 6$	$0,085 \cdot 30,08$
оксид карбону (IV) CO_2	0,03	0,03	–	–
азот N_2	0,105		–	0,105

Всього	1,0	1,6	2,5	10,8
--------	-----	-----	-----	------

6. Розраховуємо питомий теоретичний об'єм продуктів горіння:

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

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

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

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

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

$$V_{\text{пт}} = \frac{236,5 \cdot 1013 \cdot (1000 + 273)}{273 \cdot 1013} = 1102,8 \text{ м}^3.$$

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

§ 3.2.2. Горіння складних конденсованих матеріалів

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

Теоретичний об'єм повітря, необхідний для

повного згорання матеріалу заданого елементного складу, можна виразити формулою:

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

де φ_i – масовий відсотковий вміст i -го горючого елемента у складі матеріалу, %;

φ_{O} – масовий відсотковий вміст кисню в складі матеріалу, %;

β_i – стехіометричний коефіцієнт у рівнянні реакції горіння i -го горючого елемента у складі матеріалу;

μ_i – молярна маса i -го хімічного елемента у складі матеріалу, $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$;

V_{μ} – об'єм кіломоля газу за даних умов, $\text{м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$, розраховують за формулою (1.10).

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

$$\begin{aligned} v_{\text{пов}}^{\text{о}} &= \frac{4,76V_{\mu}}{4 \cdot 100} \left(\frac{\varphi_{\text{C}}}{3} + \varphi_{\text{H}} - \frac{\varphi_{\text{O}} - \varphi_{\text{S}}}{8} \right) = \\ &= 0,29 \left(\frac{\varphi_{\text{C}}}{3} + \varphi_{\text{H}} - \frac{\varphi_{\text{O}} - \varphi_{\text{S}}}{8} \right), \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}. \end{aligned} \quad (1.35)$$

Розрахунок об'єму продуктів згорання складного горючого конденсованого матеріалу проводять послідовним визначенням об'ємів продуктів згорання кожного із хімічних елементів, що входять до його складу. Питомий теоретичний об'єм продуктів горіння складного матеріалу

визначають як суму питомих об'ємів продуктів горіння кожного хімічного елемента за формулою:

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

де $g_i = \frac{\Phi_i}{100}$ – масова частка і-го хімічного елемента у складі матеріалу;

$v_{\text{пр}i}$ – питомий теоретичний об'єм продуктів горіння, що утворюються при згорянні і-го горючого елемента у складі матеріалу, $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$. Визначають за рівнянням реакції горіння кожного горючого елемента за формулою:

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

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

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

Елемент горючого матеріалу	Об'єм продукту згорання, $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$			
	CO ₂	H ₂ O	N ₂	SO ₂
карбон С	1,87(2,03)*	–	7,0 (7,65)	–
гідроген Н	–	11,2 (12,2)	21,1 (22,9)	–
сульфур S	–	–	2,63 (2,87)	0,7 (0,76)
нітроген N	–	–	0,8 (0,87)	–
оксиген O	–	–	-2,63(-2,87)	–
волога W	–	1,24 (1,36)	–	–

*) у дужках указані об'єми продуктів згорання за

Розділ 1. Загальна характеристика процесу горіння
стандартних умов ($V_{\mu} = 24,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$)

Методика визначення об'єму продуктів горіння складних матеріалів

1. Розрахувати питомий теоретичний об'єм повітря, необхідний для повного згорання матеріалу даного елементного складу, за формулою (1.34); якщо відсотковий вміст хімічних елементів у складі матеріалу не заданий, то він може бути розрахований за умовною хімічною формулою матеріалу за формулою (1.2).

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

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

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

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

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

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

Приклад розв'язання задачі

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

Розв'язання

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

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

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

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

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

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

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

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

5. Розраховуємо питомий теоретичний об'єм продуктів горіння:

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

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

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

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

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

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

8. Розраховуємо вміст пари води у продуктах горіння, використовуючи значення питомого об'єму цього продукту згорання (дивись таблицю), за формулою (1.18):

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

Висновок: при згорянні 5 кг торфу витрачається 42,0 м³ повітря та виділиться 201,6 м³ продуктів горіння за температури 950 °С; вміст води у продуктах горіння дорівнює 7,4 %.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Скласти рівняння реакції горіння у повітрі речовин, наведених у таблиці.

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

2. Визначити характер світіння дифузійного полум'я речовин, наведених у таблиці.

№	Речовина	Формула	№	Речовина	Формула
1.	етилацетат	$C_4H_8O_2$	11	стирол	C_8H_8
2.	амілацетат	$C_7H_{14}O_2$	12	гліцерин	$C_3H_8O_3$
3.	метанол	CH_4O	13	гексан	C_6H_{14}
4.	пропанол	C_3H_8O	14	пентан	C_5H_{12}
5.	гептиловий спирт	$C_7H_{16}O$	15	декан	$C_{10}H_{22}$
6.	оцтова кислота	$C_2H_4O_2$	16	етилбензол	C_8H_{10}
7.	мурашина кислота	CH_2O_2	17	етиленгліколь	$C_2H_6O_2$
8.	метилацетат	$C_3H_6O_2$	18	толуол	C_7H_8
9.	циклогексан	C_6H_{12}	19	діоксан	$C_4H_8O_2$
10	гептан	C_7H_{16}	20	гексан	C_6H_{14}

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

а) у повітрі і кисні за нормальних умов;

б) у повітрі за вказаних у таблиці умов.

№	Речовина	Формула	$t_0, ^\circ C$	$P_0, \text{кПа}$
1.	пропіловий спирт	C_3H_8O	5	102,5
2.	метиловий спирт	CH_4O	0	98,0
3.	аміловий спирт	$C_5H_{12}O$	18	100,0
4.	оксид карбону (II)	CO	25	98,0
5.	бутан	C_4H_{10}	5	100,0
6.	пентан	C_5H_{12}	18	101,5
7.	гексиловий спирт	$C_6H_{14}O$	10	100,5
8.	сульфід карбону	CS_2	25	102,5
9.	ацетон	C_3H_6O	10	102,5
10.	бензол	C_6H_6	20	101,5
11.	етилацетат	$C_4H_8O_2$	15	98,5
12.	етиленгліколь	$C_2H_6O_2$	17	100,5
13.	етиловий спирт	C_2H_6O	23	101,0
14.	бутилацетат	$C_6H_{12}O_2$	30	99,5
15.	анілін	C_6H_7N	10	101,0

4*. Скільки карбіду кальцію CaC_2 повинно прореагувати з водою, щоб у приміщенні об'ємом 480 м^3 утворилася стехіометрична концентрація ацетилену C_2H_2 в суміші із повітрям за нормальних умов.

5. Для речовин, представлених у таблиці, розрахувати повні об'єми повітря, продуктів згоряння (ПГ) та відсотковий склад продуктів горіння під час згоряння заданої кількості горючого газу або пари за визначених умов.

№	Речовина		$V_{\text{гр}}, \text{ м}^3$	α	$t_{\text{поч}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{\text{пр}}, \text{ }^\circ\text{C}$
	назва	формула				
1.	оксид карбону (II)	CO	2	1,8	20	1100
2.	метан	CH_4	14	1,5	0	900
3.	етан	C_2H_6	4	1,4	5	950
4.	етилен	C_2H_4	7	1,3	18	1200
5.	ацетилен	C_2H_2	80	1,7	10	900
6.	пропан	C_3H_8	9	1,1	25	1200
7.	пропілен	C_3H_6	200	1,6	10	1000
8.	бутан	C_4H_{10}	11	1,2	18	900
9.	бутаналь	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$	3	1,9	32	1100
10.	пентан	C_5H_{12}	25	2,2	20	1100
11.	пентанол	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$	3	1,4	15	1200
12.	гексан	C_6H_{14}	12	1,6	40	1200
13.	гексанол	$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$	1	1,4	22	800
14.	гептан	C_7H_{16}	7	1,5	50	950
15.	октан	C_8H_{18}	4	1,7	13	900
16.	диметилловий ефір	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	5	1,9	25	800
17.	сірководень	H_2S	7	1,4	30	950
18.	аміак	NH_3	5	1,6	27	1000
19.	оцтова кислота	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	2	2,0	7	1050
20.	октанова кислота	$\text{C}_8\text{H}_{16}\text{O}_2$	5	1,7	65	1000

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

№	Речовина	Формула	m, кг	α	$t_{\text{поч}}, ^\circ\text{C}$	P_0 , кПа	$t_{\text{пр}}, ^\circ\text{C}$
1.	пентанол	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$	7	1,1	25	100	900
2.	гексанол	$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$	3	2,1	5	105	1000
3.	фенол	$\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$	6	1,5	5	103	800
4.	хлорбензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$	3	1,1	25	97	1100
5.	анілін	$\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$	2	1,3	25	103	1200
6.	нітротолуол	$\text{C}_7\text{H}_7\text{NO}_2$	25	1,6	10	100	1200
7.	гліцерин	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	15	1,4	21	101	1000
8.	етанол	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	80	1,7	10	104	900
9.	діетиловий ефір	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	5	1,9	25	102	800
10.	толуол	C_7H_8	10	1,5	20	100	1100
11.	ксилол	C_8H_{10}	7	1,1	-10	101	1200
12.	етиленгліколь	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$	4	1,2	12	100	950
13.	хлоргептан	$\text{C}_7\text{H}_{15}\text{Cl}$	5	2,1	31	98	1100
14.	хлоранілін	$\text{C}_6\text{H}_6\text{NCl}$	1	1,4	17	102	1000
15.	гексаналь	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$	18	1,1	-5	100	650
16.	дибутиламін	$\text{C}_8\text{H}_{19}\text{N}$	35	1,3	25	105	700
17.	бензилтіол	$\text{C}_7\text{H}_8\text{S}$	48	1,6	25	103	880
18.	діоксан	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	56	1,4	10	97	590
19.	динітротолуол	$\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_4\text{N}_2$	14	1,7	21	103	620
20.	терпінеол	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}$	11	1,9	-10	100	1000
21.	нітроетан	$\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2\text{N}$	8	1,4	25	101	900
22.	тіофен	$\text{C}_4\text{H}_4\text{S}$	25	1,7	0	103	800
23.	евгенол	$\text{C}_{10}\text{H}_{12}\text{O}_2$	30	1,9	5	100	1100
24.	ціанамід	CH_2N_2	49	1,5	12	101	1200
25.	крезол	$\text{C}_7\text{H}_8\text{O}$	52	1,1	22	104	950

7. Розрахуйте, при горінні якої з речовин – метану CH_4 , ацетилену C_2H_2 чи бутану C_4H_{10} – у продуктах горіння буде більший вміст діоксиду карбону, якщо в першому випадку горіння відбувалося з коефіцієнтом надлишку повітря, рівним 1,7, у другому – 2,0, а в третьому – 2,5.

8*. Зловмисники планують підірвати сейф, що має об'єм 100 дм^3 . Його наповнюють 5 дм^3 водню ($T = 298 \text{ K}$) і, щоб уникнути шуму, сейф занурюють у холодне озеро ($T = 280 \text{ K}$), потім суміш підпалюють. Тиск усередині сейфа до підпалювання суміші становив 100 кПа . Процес можна вважати ізохорним. Знайти:

а) скільки молів газу знаходиться в сейфі до запалювання? (значення мольних часток водню, кисню, азоту);

б) скільки молів газу залишилося в сейфі після згоряння за умови, що вода, яка утворилася, цілком сконденсувалася?

в) яка величина тиску продуктів реакції після охолодження?

9*. Визначити коефіцієнт надлишку повітря, якщо для згоряння 7 кг етилацетату $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ фактично витрачено 240 м^3 повітря за температури 21°C та тиску $101,3 \text{ кПа}$.

10*. Для проведення зварювальних робіт необхідно ємність об'ємом 50 м^3 з-під бензолу C_6H_6 заповнити сухими продуктами його горіння. Скільки потрібно спалити бензолу та який повинен бути коефіцієнт надлишку повітря, щоб у продуктах горіння містилося не більше 5% кисню. Умови вважати нормальними.

11. Для рідин, вказаних у таблиці, визначити масу горючої речовини, що згоріла, та відсотковий вміст заданого продукту горіння (ПГ) в об'ємі приміщення,

якщо відомо, за якого вмісту кисню у повітрі горіння припинилося. Початкові умови наведені у таблиці. Прийняти, що під час горіння відбувається утворення тільки продуктів повного згорання.

№	Речовина	Формула	$V_{пр}$, м ³	$t_{поч}$, °C	P_0 , кПа	кінц. вміст O ₂ , %	ПГ, що визначає ся
1.	бензол	C ₆ H ₆	250	18	100	14,6	H ₂ O
2.	етиленгліколь	C ₂ H ₆ O ₂	150	19	98	14,2	N ₂
3.	хлорпентан	C ₅ H ₁₁ Cl	120	28	102	12,5	HCl
4.	хлорбензол	C ₆ H ₅ Cl	100	15	101	16,3	CO ₂
5.	оцтова кислота	C ₂ H ₄ O ₂	200	20	103	11,7	H ₂ O
6.	нітробензол	C ₆ H ₅ O ₂ N	350	22	99	10,5	N ₂
7.	сульфід карбону	CS ₂	180	15	104	15,2	SO ₂
8.	етилбензол	C ₈ H ₁₀	80	20	100	14,8	CO ₂
9.	циклогексан	C ₆ H ₁₂	120	0	101	15,5	H ₂ O
10.	діетилбензол	C ₁₀ H ₁₄	100	25	102	16,0	N ₂

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

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

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

№	Склад горючого газу, %							$V_{\text{газ}}, \text{ м}^3$	α	$t_0, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{\text{пр}}, \text{ }^\circ\text{C}$
	CH_4 (C_2H_4)	CO (N_2)	H_2 (H_2O)	C_5H_{12} (C_2H_2)	C_4H_{10} (C_3H_8)	H_2S (C_2H_6)	O_2				
1.	60	20	–	(20)	–	–	–	5	1,1	20	950
2.	40	30	20	–	–	–	10	15	1,2	12	890
3.	(40)	15	20	–	(20)	–	5	21	2,1	31	780
4.	15	–	–	(35)	(15)	20	15	12	1,4	17	850
5.	35	–	(10)	(25)	25	–	5	2	2,4	7	750
6.	25	5*	10	35	–	(20)	5	16	1,6	15	1085
7.	25	–	60	(5)	–	5	5	11	3,6	10	985
8.	15	–	15	(40)	10	(15)	5	35	1,4	25	1005
9.	10	(15)	22	(30)	(20)	–	3	52	2,5	15	710
10.	25	15	–	30	–	(25)	5	16	1,8	10	910
11.	(45)	20	(5)	(15)	10	–	5	50	2,2	45	1200
12.	65	15*	15	–	–	3	2	70	1,7	20	950
13.		20		50		(30)	–	30	1,7	21	1000
14.		10	10		(70)	6	4	50	1,9	10	650
15.	35	40		25			–	48	1,5	25	700
16.	(10)			20	32	30	8	20	1,1	20	880
17.	50			10	10	24	6	15	1,2	-9	590
18.		5	(8)	5	80		2	35	2,1	12	620
19.	4	6*	(30)			60	–	18	1,4	31	1000
20.			40	30	27		3	46	1,1	17	900
21.		25		(45)	23		7	75	1,3	-5	800
22.	10			10	40	(30)	10	60	1,6	25	450
23.	39		20		20	10	11	37	1,4	10	580
24.				18	10	70	2	10	1,7	25	600
25.	(35)		25		(35)		5	15	1,9	15	730

* – вміст у газі CO_2 .

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

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

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

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

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

ГЛАВА 2. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ

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

Розрахунок енергетичного балансу здійснюють відповідно до термохімічного рівняння реакції згідно із законом Г.І. Гесса, коли в рівнянні вказують тепловий ефект реакції:



де n_i – число молів початкових (вихідних) речовин A_i ;

n_j – число молів продуктів реакції A_j ;

Q_{xp} – тепловий ефект реакції.

Тепловий ефект реакції – кількість тепла, що виділяється чи поглинається системою під час протікання в ній незворотної хімічної реакції (хімічна енергія перетворюється в теплову) за умов сталої температури й об'єму чи температури й тиску.

Початковий і кінцевий рівні енергії системи відрізняються між собою на величину теплоти реакції Q_{xp} :

$$E_{\text{кін}} - E_{\text{поч}} = Q_{\text{хр}} \quad (1.38)$$

За міру енергії приймають величину *внутрішньої енергії* U або *ентальпію* H системи.

Внутрішня енергія системи – це загальний запас енергії, сума кінетичної енергії її часток та потенційної енергії їх взаємодії, зокрема енергія хімічних зв'язків.

Ентальпія – це внутрішня енергія системи, в якій відбувається робота розширення за умов сталого тиску:

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

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

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

де Δn – різниця між числом молів продуктів реакції і вихідних речовин.

Внутрішня енергія та ентальпія системи не мають нуля або точки відліку, оскільки не можна систему привести у стан, коли вона не матиме енергії. Тому для визначення енергетики реакції достатньо знайти зміну енергії (ΔH , ΔU) під час реакції.

Тепловий ефект хімічної реакції виникає за рахунок зміни в системі або внутрішньої енергії ΔU (за сталого об'єму системи), або ентальпії ΔH (якщо тиск в системі не змінюється). Реакції горіння майже завжди протікають за сталого тиску, отже, їх тепловий ефект визначається зміною саме ентальпії системи.

Процес горіння є мимовільним, тобто під час

горіння система переходить у більш стійкий стан, що відповідає зменшенню внутрішньої енергії системи, яка йде на виконання корисної роботи хімічної реакції. Корисна робота визначається за допомогою *термодинамічних потенціалів* Гіббса (ΔG), за умови сталих тиску та температури, або Гельмгольца (ΔF) за умови сталих об'єму та температури:

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

де T – абсолютна температура системи;
 ΔS – ентропія системи.

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

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

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

У тих випадках, коли ентальпія або внутрішня енергія системи після реакції зменшується, йдеться про виділення енергії, тобто реакція є **екзотермічною** ($\Delta H < 0$, $\Delta U < 0$). Коли ентальпія кінцевих продуктів є більшою, ніж вихідних, то реакція може протікати тільки за умови підведення енергії в систему, тобто вона є **ендотермічною** ($\Delta H > 0$, $\Delta U > 0$). Отже, реакції горіння завжди є екзотермічними.

Згідно із першим законом термодинаміки, тепло,

що виділилося в системі, дорівнює:

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

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

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

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

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

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

Теплотою згорання називається кількість тепла, що виділяється при повному згоранні одиниці кількості горючої речовини з утворенням продуктів повного згорання за умов, що початкові та кінцеві продукти знаходяться за стандартних умов.

Для розрахунку теплового ефекту хімічної реакції горіння використовують стандартну теплоту утворення

сполуки з простих речовин:

$$\Delta H_{\text{гор}}^{\circ} = \sum_i n_{\text{пр}i} \Delta H_{\text{ф пр}i}^{\circ} - \sum n_{\text{гс}} \Delta H_{\text{ф гс}}^{\circ}, \quad (1.46)$$

де $\Delta H_{\text{гор}}^{\circ}$ – стандартна теплота згоряння, кДж моль⁻¹;

$\Delta H_{\text{ф пр}i}^{\circ}$ – стандартна теплота утворення i -го продукту згоряння, кДж моль⁻¹;

$n_{\text{пр}i}$ – число молів i -го продукту згоряння;

$\Delta H_{\text{ф гс}}^{\circ}$ – стандартна теплота утворення компонентів горючої суміші, кДж моль⁻¹;

$n_{\text{гс}}$ – число молів компонентів горючої суміші.

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

Стандартна теплота утворення простої речовини приймається рівною нулю.

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

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

Залежно від того, як визначають одиницю кількості

горючої речовини, розрізняють такі теплоти згорання: *молярну* (або *стандартну*) Q (кДж моль⁻¹) – при згорянні одного моля, *масову* Q' (кДж кг⁻¹) – при згорянні одного кілограма та *об'ємну* Q'' (кДж м⁻³) – при згорянні одного кубічного метра горючої речовини.

Залежно від агрегатного стану води, яка утворилася у процесі горіння і знаходиться у продуктах горіння, розрізняють вищу Q_v та нижчу Q_n теплоту згорання.

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

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

Схематично різницю між нижчою та вищою теплотою згорання представлено на рис. 1.1.

Вища теплота згорання відрізняється від нижчої на величину теплоти, що виділяється при конденсації води, яка міститься у продуктах горіння, $Q_{\text{конд}}$:

$$Q_v - Q_n = Q_{\text{конд}}; \quad (1.48)$$

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

де $n_{\text{H}_2\text{O}}$ – число молів води у продуктах згорання;

$\Delta H_{\text{вип}}$ – молярна прихована теплота випаровування води, кДж моль⁻¹.

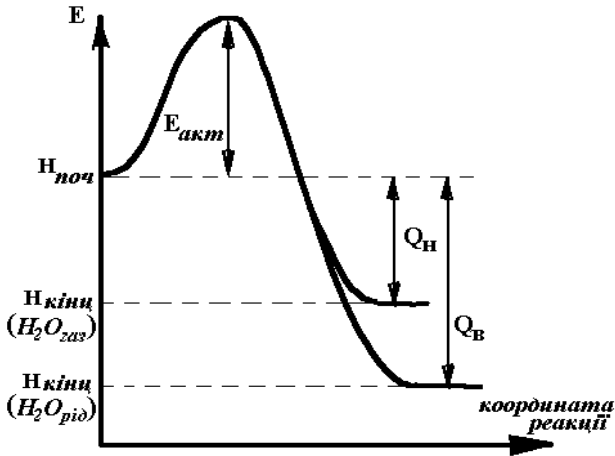


Рис. 1.1 – Тепловий ефект екзотермічної реакції горіння у разі утворення води у газоподібному або рідкому стані ($E_{\text{акт}}$ – мінімальна енергія, яку необхідно підвести до початкової системи для ініціювання хімічної реакції)

З урахуванням чинників, що впливають на теплоту згорання речовини, таких як хімічний недопал, вологість матеріалу, теплові втрати на випромінювання, визначають *практичну* або *робочу теплоту згорання* матеріалу Q_H^P , яка завжди є меншою за нижчу теплоту згорання. За збільшення вмісту води в речовині кількість енергії, витрачена на її випаровування, збільшується, а практична теплота згорання зменшується.

Практичне значення розрахунку енергетичного балансу

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

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

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

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

§ 1. Розрахунок теплоти згорання індивідуальних речовин та складних матеріалів

Для розрахунку стандартного теплового ефекту реакції горіння використовують стандартну теплоту утворення індивідуальних речовин ΔH_f^0 з елементів. Крім того, її застосовують для розрахунку таких показників пожежної небезпеки, як концентраційні та температурні межі поширення полум'я, мінімальна флегматизуюча концентрація негорючих газів та ін.

§ 1.1. Розрахунок стандартної теплоти утворення індивідуальних речовин

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

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

де $\Delta(\Delta H_f^0)$ – адитивний внесок зв'язку і-го типу в ентальпію молекули, кДж·моль⁻¹;

n_i – число зв'язків і-го типу у молекулі.

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

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

Тип зв'язку	Адитивний внесок зв'язку і-го типу, $\Delta(\Delta H_f^0)$, кДж·моль ⁻¹
C – C	19,645
C = C	115,767
C ≡ C (полуторний зв'язок)	29,04
C ≡ C (аромат. зв'язок)	22,483
C – H	-19,703
C – O	-49,866
C = O	-134,19
C – N ⁵	-21,186
C – N ³	41,869
O – H	-123,681
O – N ⁵	45,763
O = N ⁵	-3,684
H – N ³	-5,904

Методика розрахунку стандартної теплоти утворення

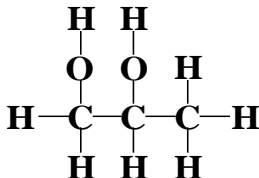
1. Записати структурну формулу речовини з позначенням видів хімічних зв'язків.
2. За структурною формулою визначити тип та число зв'язків і-го типу.
3. За табл. 1.7 визначити величини адитивних внесків зв'язків $\Delta(\Delta H_f^0)$.
4. Розрахувати теплоту утворення речовини ΔH_f^0 за формулою (1.50).

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати теплоту утворення пропіленгліколю.

Розв'язання

1. Визначаємо структурну формулу пропіленгліколю:



2. Визначаємо тип, число зв'язків і адитивні внески $\Delta(\Delta H_f^0)$ цих зв'язків у теплоту утворення речовини. Для зручності складаємо таблицю:

Тип зв'язку	Число зв'язків	Внесок $\Delta(\Delta H_f^0)$, кДж·моль ⁻¹
C – C	2	19,65
C – H	6	-19,70
C – O	2	-49,87
O – H	2	-123,68

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

$$\Delta H_f^0 = 19,65 \cdot 2 + (-19,70) \cdot 6 + (-49,87) \cdot 2 + (-123,68) \cdot 2 = -426,0 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

Висновок: розрахована теплота утворення пропіленгліколю дорівнює мінус 426,0 кДж·моль⁻¹. За довідником [7] стандартна теплота утворення цієї речовини дорівнює мінус 499,90 кДж·моль⁻¹, отже відносна похибка розрахунку дорівнює 14,8 %.

§ 1.2. Розрахунок теплоти згорання індивідуальних речовин

Молярну (стандартну) теплоту згорання (вищу та нижчу) розраховують за законом Гесса, використовуючи термохімічну систему знаків для теплоти згорання (див. (1.47)):

$$Q_{\text{гор}} = \left| \Delta H_{\text{гор}}^0 \right|, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$Q_{\text{гор}} = \left| \sum_i \Delta H_{f, \text{пг } i}^0 \cdot n_{\text{пг } i} - \Delta H_{f, \text{гр}}^0 \right|, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (1.51)$$

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

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

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

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

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

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

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

Методика розрахунку теплоти згорання індивідуальної речовини

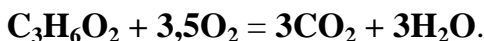
1. Скласти рівняння реакції горіння речовини.
2. Визначити стандартні теплоти утворення продуктів горіння і горючої речовини та розрахувати вищу і нижчу молярну теплоту згорання за формулою (1.51).
3. Визначити молярну масу речовини.
4. Перерахувати молярну теплоту згорання у масову за формулою (1.52).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

Приклад розв'язання задачі

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

Розв'язання

1. Складаємо рівняння реакції горіння етилформиату:



2. Розраховуємо молярні вищу та нижчу теплоти згорання етилформиату за законом Гесса (1.51).

Значення стандартних теплот утворення продуктів горіння обираємо за таблицею 4 додатків; а стандартну теплоту утворення етилформиату – за таблицею 14 додатків:

етилформиат	$\Delta H_{fC_3H_6O_2}^{\circ} = -371,2 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$;
вуглекислий газ	$\Delta H_{fCO_2}^{\circ} = -393,5 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$;
вода у стані пари	$\Delta H_{fH_2O(g)}^{\circ} = -241,8 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$;
вода у стані рідини	$\Delta H_{fH_2O(p)}^{\circ} = -285,8 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$.

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

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

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

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

3. Визначаємо молярну масу етилформиату:

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

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

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

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

5. Молярний об'єм газу за стандартних умов $V_{\mu} = 24,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$.

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

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

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

Висновок: етилформиат має такі теплоти згорання: молярна $Q_{\text{в}} = 1667,7 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$, $Q_{\text{н}} = 1535,7 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$;

масова $Q'_{\text{в}} = 22536,3 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$, $Q'_{\text{н}} = 20752,6 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$;
об'ємна $Q''_{\text{в}} = 67486,8 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}$, $Q''_{\text{н}} = 63987,1 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}$.

§ 1.3. Розрахунок теплоти згоряння складних речовин та матеріалів

Теплота згоряння газових сумішей обумовлена їх складом і теплотою згоряння кожного компонента та визначається за формулою:

$$\text{об'ємна: } Q''_{\text{н(в)сум}} = \sum_i Q''_{\text{н(в)}_i} r_i, \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3},$$

$$\text{масова: } Q'_{\text{н(в)сум}} = \sum_i Q'_{\text{н(в)}_i} g_i, \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}, \quad (1.54)$$

де $Q''_{\text{н(в)}_i}$ – нижча (або вища) об'ємна теплота згоряння i -го горючого компонента суміші, $\text{кДж} \cdot \text{м}^{-3}$;

$Q'_{\text{н(в)}_i}$ – нижча (або вища) масова теплота згоряння i -го горючого компонента суміші, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$;

r_i – об'ємна частка i -го горючого компонента у газовій суміші;

g_i – масова частка i -го горючого компонента у газовій суміші.

Об'ємна r_i і масова g_i частки компонента газової суміші пов'язані між собою за формулою:

$$g_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_k r_k \mu_k},$$

де μ_i – молярна маса відповідного i -го компонента.

Для полегшення розрахунку теплоти згоряння газових сумішей значення об'ємних теплот згоряння

основних газів за нормальних умов зведені до таблиці 1.8.

Таблиця 1.8 – Значення вищої та нижчої об'ємної теплоти згоряння деяких газів та пари за нормальних умов

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

Для горючих речовин із невизначеною структурою або для тих, що являють собою суміш хімічних сполук, масову теплоту згоряння визначають за рівнянням Менделєєва:

- вища теплота згоряння:

$$Q'_{\text{в}} = 339,4\varphi_{\text{C}} + 1256,8\varphi_{\text{H}} + 108,9(\varphi_{\text{S}} - \varphi_{\text{O}} - \varphi_{\text{N}}), \text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}; \quad (1.55)$$

- нижча теплота згоряння:

$$Q'_{\text{н}} = Q'_{\text{в}} - 25,1(9\varphi_{\text{H}} + W) \text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1};$$

$$Q'_H = 339,4\varphi_C + 1256,8\varphi_H + 108,9(\varphi_S - \varphi_O - \varphi_N) - 25,1(9\varphi_H + W), \text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}, \quad (1.56)$$

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

Формулу Менделєєва можна використовувати для розрахунку теплоти згорання як індивідуальних речовин, так і речовин складного хімічного складу.

Методика визначення теплоти згорання газової суміші

1. Скласти рівняння реакції горіння в повітрі для кожного горючого компонента.

2. Визначити теплоту утворення кожного горючого компонента суміші та продуктів згорання за таблицею додатків 4 або розрахувати за формулою (1.50).

3. Визначити нижчу або вищу молярну теплоту згорання i -го компонента суміші за законом Гесса (якщо немає довідникових даних).

4. Перерахувати отримані значення молярної теплоти згорання кожного компонента суміші в об'ємну теплоту згорання за формулою (1.53) або скористатися значеннями об'ємної теплоти згорання основних газів за таблицею 1.8.

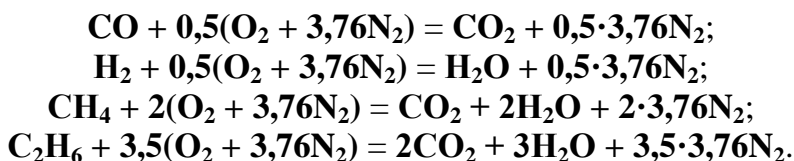
5. Визначити об'ємну теплоту згорання газової суміші з урахуванням відсоткового вмісту кожного компонента за формулою (**Error! Reference source not found.**1.54).

Приклад розв'язання задачі

Визначити нижчу теплоту згорання коксового газу такого складу: CO – 6,8 %, H₂ – 57 %, N₂ – 7,7 %, CO₂ – 2,3 %, CH₄ – 22,5 %, C₂H₆ – 3,7 % за стандартних умов.

Розв'язання

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



2. Визначаємо теплоту утворення кожного компонента суміші та продуктів згорання за довідником [9]:

оксид карбону (II)	$\Delta H_{\text{fCO}}^{\circ} = -110,6 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$,
водень	$\Delta H_{\text{fH}_2}^{\circ} = 0 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$,
метан	$\Delta H_{\text{fCH}_4}^{\circ} = -74,85 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$,
етан	$\Delta H_{\text{fC}_2\text{H}_6}^{\circ} = -84,67 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$,
азот	$\Delta H_{\text{fN}_2}^{\circ} = 0 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$,
вода у стані пари	$\Delta H_{\text{fH}_2\text{O}(г)}^{\circ} = -241,8 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$,
вуглекислий газ	$\Delta H_{\text{fCO}_2}^{\circ} = -393,5 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$.

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

$$\begin{aligned} Q_{\text{н CO}} &= |(-393,5) \cdot 1 - (-110,6)| = 283,18 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}, \\ Q_{\text{н H}_2} &= |(-241,8) \cdot 1 - 0| = 241,84 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}, \end{aligned}$$

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

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

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

$$Q''_{\text{нCO}} = \frac{28318 \cdot 1000}{24,4} = 11799 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q''_{\text{нH}_2} = \frac{24184 \cdot 1000}{24,4} = 10077 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

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

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

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

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

Відповідь: об'ємна нижча теплота згорання коксового газу заданого складу за стандартних умов

дорівнює $16273 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}$.

Методика визначення теплоти згорання складних речовин та сумішей

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

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

Приклад розв'язання задачі

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

Розв'язання

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

- для деревини:

$$Q'_H = 339,4 \cdot 49 + 1256,8 \cdot 6,5 - 108,9(39 + 0,5) - 25,1(9 \cdot 6,5 + 5) = 18841,6 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1};$$

- для вугілля:

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

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

§ 1.4. Розрахунок пожежної навантаги

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

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

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

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

де m_i – маса i -го горючого матеріалу, кг;

$Q'_{\text{н}i}$ – нижча масова теплота згорання i -го горючого матеріалу, МДж · кг⁻¹;

$S_{\text{підл}}$ – площа підлоги, м².

Методика розрахунку пожежної навантаги

1. Визначити вид та масу горючих речовин, що знаходяться у приміщенні.

2. Визначити нижчу масову теплоту згорання кожної речовини за табл. 10, 12, 12 додатків або довідниками [7], [9], [17] чи розрахувати за формулами (1.52) або (1.56).

3. Розрахувати площу підлоги приміщення.

4. Розрахувати пожежну навантагу за формулою (1.57).

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати пожежну навантагу у приміщенні розмірами 114x38 м², якщо загальна маса будівельних дерев'яних конструкцій приміщення дорівнює 400 кг. У приміщенні зберігається 400 т каучуку, 30 т мазуту й 10 т поліетиленової плівки.

Розв'язання

1. Визначаємо нижчі масові теплоти згорання горючих речовин за довідником [17]:

деревина	13800 кДж·кг ⁻¹ ,
каучук	40200 кДж·кг ⁻¹ ,
поліетилен у виробках	47100 кДж·кг ⁻¹ ,
мазут	39800 кДж·кг ⁻¹ .

2. Розраховуємо площу підлоги приміщення:

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

3. Розраховуємо пожежну навантагу у приміщенні:

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

$$= 4320 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Висновок: пожежна навантага у даному приміщенні дорівнює 4320 МДж м⁻².

§ 2. Розрахунок температури горіння речовин

Енергія, що виділяється у зоні горіння, витрачається на підготовку горючої речовини до процесу

горіння, нагрівання продуктів горіння та на теплові втрати із зони горіння в навколишнє середовище за рахунок теплового випромінювання.

Температуру, до якої нагріваються продукти горіння, називають *температурою горіння*.

Виходячи із закону Кірхгофа

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

який показує залежність ентальпії системи від температури, та з припущення, що вся теплота Q_H (за умов, що вода знаходиться у вигляді пари), яка виділяється під час горіння, витрачається на підвищення ентальпії продуктів горіння, маємо для одного моля горючої речовини:

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

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

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

де $v_{\text{гг}i}$ – об'єм i -го продукту горіння, що утворюється при згорянні 1 моля горючої речовини, м^3 ;

c_p – середньооб'ємна теплоємність продуктів

горіння за умов сталого тиску, $\text{кДж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}$;

T_0 – початкова температура системи, К;

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

Із формули (1.60) можна визначити температуру горіння у загальному вигляді:

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

або за стандартних умов за відсутності тепловтрат:

$$T_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{н}}}{\sum_i n_{\text{пр}i} c_{p\text{пр}i}} + 298, \text{ К}. \quad (1.62)$$

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

Під **калориметричною температурою горіння** розуміють температуру, до якої нагріваються продукти горіння, якщо дотримано наступних умов:

1) все тепло, що виділилося у процесі реакції, іде на нагрівання продуктів горіння ($Q_{\text{пр}} = Q_{\text{н}}$);

2) відбувається повне згоряння горючої суміші стехіометричного складу ($\alpha = 1$);

3) у процесі утворення продуктів горіння не відбувається їх термічна дисоціація;

4) вихідна горюча суміш знаходиться за стандартних умов (початкова температура 298 К, тиск 101,3 кПа).

Якщо температура горіння є достатньо високою, то

продукти горіння, що утворюються у процесі реакції, можуть розкладатися на елементи, з яких вони утворені. Дисоціацію продуктів горіння слід враховувати за температур, більших за 1700°C. За умови відсутності тепловтрат у навколишнє середовище та з урахуванням частки тепла, яке витрачається на процес дисоціації продуктів горіння, ступінь нагріву продуктів горіння буде являти собою **теоретичну температуру горіння**.

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

Дійсна температура горіння – це температура, до якої нагріваються продукти горіння за реальних умов, і при цьому враховується, що горіння може відбуватися з надлишком або нестачею повітря, тобто з недопалом горючої речовини, значними тепловтратами у навколишнє середовище, а початкові умови, за яких знаходиться горюча суміш, можуть відрізнятися від стандартних.

Дійсна температура горіння є завжди нижчою за адіабатичну, але вона завжди визначається калориметричною температурою горіння й умовами тепловтрат.

На практиці використовують метод оцінювання температури горіння за кольором тіл, нагрітих у зоні горіння. Зміна спектра випромінювання залежить від температури нагрітого тіла. Чим вище температура тіла, тим вище інтенсивність та яскравість випромінювання.

На підставі цього правила можна визначити так звану *яскравісну температуру горіння*. Дані про колір нагрітих тіл наведені у таблиці 1.3.

Експериментально визначити температуру горіння більшості речовин достатньо складно, що зумовлено необхідністю проведення дослідів 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, враховуючи закон збереження енергії та хімічного складу речовини. Використовують два розрахункових методи визначення адіабатичної температури горіння: за ентальпією продуктів горіння та з використанням залежності теплоємності продуктів горіння від їх температури.

Практичне значення розрахунку температури горіння

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

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

3. Залежно від температури горіння речовин та матеріалів обирають вогнегасні речовини, які можна застосовувати за даних умов горіння, а також розраховують витрату негорючого газу при об'ємному гасінні пожежі у приміщенні.

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

Методика розрахунку адіабатичної температури горіння індивідуальних речовин

1. Скласти рівняння реакції горіння, визначити стехіометричний коефіцієнт β .

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

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

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

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

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

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

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

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

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

9. Розрахувати теплоту продуктів горіння за температури горіння T_2 за формулою:

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

10. Розрахувати температуру горіння за методом лінійної інтерполяції за формулою:

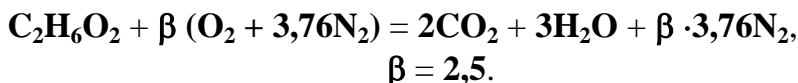
$$T_{\text{ад}} = T_1 + \frac{(T_2 - T_1) \cdot (Q_{\text{н}} - Q_{p_{\text{пг}}}^{T_1})}{(Q_{p_{\text{пг}}}^{T_2} - Q_{p_{\text{пг}}}^{T_1})}, \text{ К}. \quad (1.66)$$

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати адіабатичну температуру горіння етиленгліколю $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$, якщо теплота його утворення дорівнює $\Delta H_f^0 = -453,8 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$, а горіння здійснювалось із коефіцієнтом надлишку повітря $\alpha = 1,8$.

Розв'язання

1. Складаємо рівняння реакції горіння:



2. Розраховуємо питоме теоретичне число молів повітря:

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

3. Розраховуємо питомих дійсних число молей продуктів горіння:

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

4. Розраховуємо нижчу молярну теплоту згорання речовини за законом Гесса:

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

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

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

6. Орієнтуючись на молярну ентальпію азоту, за таблицею 1 додатків визначаємо температуру горіння у першому наближенні: $T_1 = 1400 \text{ К}$.

7. Визначаємо ентальпію кожного продукту згорання за температури 1400 К та розраховуємо теплоту продуктів горіння за формулою (1.64):

$$\Delta H_{\text{CO}_2}^{T_1} = 65,2 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{T_1} = 53,5 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$\Delta H_{\text{N}_2}^{T_1} = 43,6 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad \Delta H_{\text{пов}}^{T_1} = 44 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

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

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

9. Визначаємо ентальпію продуктів горіння за температури 1200 К та розраховуємо теплоту продуктів горіння за формулою (1.65):

$$\Delta H_{\text{CO}_2}^{T_2} = 53,8 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{T_2} = 44,5 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$\Delta H_{\text{N}_2}^{T_2} = 36,8 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad \Delta H_{\text{пов}}^{T_2} = 37,1 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

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

10. Розраховуємо температуру горіння за методом лінійної інтерполяції:

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

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

Методика розрахунку адіабатичної температури горіння складних речовин

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

1.1. Розрахувати питомий теоретичний об'єм повітря $v_{\text{пов}}^{\circ}$, необхідний для згорання 1 м^3 газової суміші або 1 кг горючого матеріалу, відповідно за формулою (1.22) або (1.28).

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

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

2. Визначити за довідниковими даними або розрахувати нижчу масову теплоту згорання речовини за рівнянням Менделєєва (1.56) або розрахувати об'ємну теплоту згорання газової суміші за формулою (**Error! Reference source not found.**1.54).

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

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

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

за формулою:

$$Q_{p_{\text{пг}}}^{T_1} = \sum_i \left(\Delta H_{\text{пг}i}^{T_1} v_{\text{пг}i} \right) \quad (1.67)$$

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

7. Розрахувати теплоту продуктів горіння за температури T_2 за формулою:

$$Q_{p_{\text{пг}}}^{T_2} = \sum_i \left(\Delta H_{\text{пг}i}^{T_2} v_{\text{пг}i} \right) \quad (1.68)$$

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

Приклад розв'язання задачі

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

Розв'язання

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$Q'_{\text{н}} = 339,4 \cdot 46 + 1256,8 \cdot 5,5 - 108,9(39,2 + 0,9) - 25,1 \cdot (9 \cdot 5,5 + 7) = 16739,8 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

3. Розраховуємо середню теплоту продуктів згоряння:

$$Q_{p\text{ср}} = \frac{167398}{7,7} = 2185 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

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

5. Визначаємо за таблицею 2 додатків об'ємну ентальпію продуктів горіння за температури 1600 К та розраховуємо теплоту продуктів горіння за формулою (1.67):

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

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

$$Q_{p\text{пг}}^{T_1} = 0,93 \cdot 3430,2 + 0,77 \cdot 2809,9 + 3,66 \cdot 2257,0 + \\ + (1,5 - 1)4,6 \cdot 2278,0 = 18853,5 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

6. Визначаємо температуру горіння у другому наближенні. Теплота продуктів горіння за температури 1600 К $18853,5 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ виявилася більшою за нижчу теплоту згоряння речовини $16739,8 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$, тому приймаємо значення температури у другому наближенні нижче, ніж попереднє значення: $T_2 = 1400 \text{ К}$.

7. Визначаємо об'ємну ентальпію продуктів горіння за температури 1400 К та розраховуємо теплоту продуктів горіння за формулою (1.68):

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

$$\Delta H_{N_2}^{T_2} = 1946,0 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}; \quad \Delta H_{\text{пов}}^{T_2} = 1963,4 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q_{\text{рпг}}^{T_2} = 0,93 \cdot 2909,0 + 0,77 \cdot 2387,8 +$$

$$3,66 \cdot 1946,0 + (1,5 - 1)4,6 \cdot 1963,4 = 16200,8 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

8. Визначаємо температуру горіння за методом лінійної інтерполяції:

$$T_{\text{гор}} = 1600 + \frac{(1400 - 1600)(167398 - 188535)}{(162008 - 188535)} = 1440 \text{ К}.$$

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

Приклад розв'язання задачі

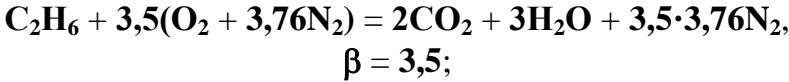
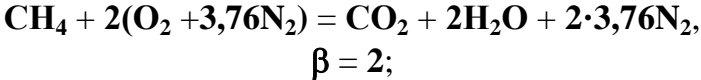
Розрахувати температуру горіння суміші такого складу: $\text{CH}_4 - 50\%$; $\text{C}_2\text{H}_6 - 30\%$; $\text{N}_2 - 17\%$; $\text{CO}_2 - 3\%$, яка згорає без тепловтрат за нормальних умов із коефіцієнтом надлишку повітря $\alpha = 1,8$.

Розв'язання

1. Визначаємо питомий об'єм продуктів згорання із урахуванням надлишку повітря.

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

Складаємо рівняння реакції горіння горючих компонентів суміші:



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

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

Компонент суміші	Об'ємна частка	Об'єм продукту згорання, $\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$		
		CO_2	H_2O	N_2
CH_4	0,5	$1 \cdot 0,5$	$2 \cdot 0,5$	$7,52 \cdot 0,5$
C_2H_6	0,3	$2 \cdot 0,3$	$3 \cdot 0,3$	$13,16 \cdot 0,3$
N_2	0,17	–	–	0,17
CO_2	0,03	0,03	–	–
Всього	1,0	1,13	1,9	7,88

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

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

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

2. Розраховуємо нижчу об'ємну теплоту згорання газової суміші за формулою (**Error! Reference source not found.**1.54). За табл. 1.8 знаходимо нижчі об'ємні теплоти

згоряння компонентів суміші:

$$Q''_{\text{нCH}_4} = 35\,880 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q''_{\text{нC}_2\text{H}_6} = 64\,360 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q''_{\text{нсум}} = 35\,880 \cdot 0,5 + 64\,360 \cdot 0,3 = 37\,248 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

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

$$Q_{\text{рсер}} = \frac{37\,248}{18,7} = 1\,992 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

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

5. Визначаємо за таблицею 2 додатків об'ємну ентальпію продуктів горіння за температури 1400 К та розраховуємо теплоту продуктів горіння за цієї температури за формулою (1.67).

$$\Delta H_{\text{CO}_2}^{T_1} = 2909,0 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}; \quad \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{T_1} = 2387,8 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

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

$$Q_{\text{ршт}}^{T_1} = 1,13 \cdot 2909,0 + 1,9 \cdot 2387,8 + 7,88 \cdot 1946,0 + (1,8 - 1)9,76 \cdot 1963,4 = 38\,488,7 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

6. Визначаємо температуру горіння у другому наближенні. Теплота продуктів горіння за температури 1400 К 38488,7 кДж·м⁻³ виявилася більшою за нижчу теплоту згорання газової суміші 37248 кДж·м⁻³, тому приймаємо значення температури у другому наближенні нижче, ніж попереднє значення: T₂ = 1200 К.

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

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

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

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

8. Розраховуємо температуру горіння за методом лінійної інтерполяції:

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

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

§ 2.2. Визначення температури горіння з використанням теплоємності продуктів горіння

Розрахунок температури горіння для речовин індивідуального і складного складу можна здійснювати з

використанням залежності теплоємності продуктів горіння від їх температури за формулою (1.62).

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

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

де $a_{\text{сум}}$, $b_{\text{сум}}$ – константи, що визначаються залежно від складу продуктів згорання;

t – температура продуктів горіння, °С.

Константи рівняння (1.69) $a_{\text{сум}}$, $b_{\text{сум}}$ розраховують як суму добутоків числа молів (або об'єму) i -го компонента продуктів горіння на відповідні константи a_i та b_i в температурній залежності теплоємності i -го продукту згорання (обирають згідно із таблицею 4 додатків):

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

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

Температуру горіння розраховують за формулою:

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

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

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

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

2. Визначити нижчу стандартну теплоту згорання речовини.

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

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

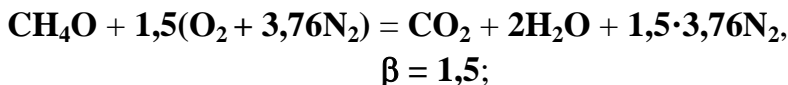
5. Розрахувати температуру горіння за формулою (1.72).

Приклад розв'язання задачі

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

Розв'язання

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



$$n_{\text{CO}_2} = 1 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad n_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1};$$

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

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

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

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

3. Визначаємо константи рівняння $c_{p_i} = a_i + b_i \cdot t$ для кожного продукту згорання за таблицею 4 додатків (використовуємо молярні теплоємності речовин) та розраховуємо значення $a' = a + \frac{b\Gamma_{CT}}{2}$ та $b' = \frac{b}{2}$:

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

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

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

5. Розраховуємо температуру горіння:

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

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

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

1. Розрахувати питомий теоретичний об'єм повітря $v_{\text{пов}}^\circ$, необхідний для згорання 1 м³ газової суміші або 1 кг горючого матеріалу, відповідно за формулою (1.32) або (1.34).

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

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

4. Визначити за довідниковими даними або розрахувати нижчу масову теплоту згорання речовини за рівнянням (1.56) або об'ємну теплоту згорання газової суміші за формулою (**Error! Reference source not found.**1.54).

5. Визначити константи a_i і b_i рівняння $c_{p_i} = a_i + b_i \cdot t$ для кожного продукту горіння за таблицею 4 додатків (використовувати об'ємні теплоємності газів).

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

7. Розрахувати температуру горіння за формулою (1.72).

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати температуру горіння дизельного палива такого складу: С – 83 %, Н – 15 %, S – 1 %, N – 1 %, якщо горіння відбувалося за нормальних умов із коефіцієнтом надлишку повітря $\alpha = 1,4$. Прийняти, що під час горіння тепловтрати у навколишнє середовище становили 25 % від теплоти згорання й утворювалися лише продукти повного згорання.

Розв'язання

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

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

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

Елемент	Масова частка	Об'єм продукту згорання, $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$			
		CO_2	H_2O	SO_2	N_2
С	0,83	0,83·1,87			0,83·7,0
Н	0,15		0,15·11,2		0,15·21,1
S	0,01			0,01·0,7	0,01·2,63
N	0,01				0,01·0,8
Всього	1,00	1,55	1,68	0,007	9,0

3. Розраховуємо питомий об'єм кожного продукту згорання з урахуванням надлишку повітря:

$$\begin{aligned} v_{\text{CO}_2} &= 1,55 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}; & v_{\text{N}_2} &= 9,0 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}; \\ v_{\text{H}_2\text{O}} &= 1,68 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}; & v_{\text{SO}_2} &= 0,007 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}; \end{aligned}$$

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

4. Розраховуємо нижчу масову теплоту згорання дизельного палива заданого складу:

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

На розігрів продуктів згорання було витрачено 75 % нижчої масової теплоти згорання:

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

5. Визначаємо константи рівняння $c^0_{p_i} = a_i + b_i \cdot t$ для кожного продукту горіння за таблицею 4 додатків (використовуємо об'ємні теплоємності речовин) та розраховуємо значення $a' = a + \frac{bT_{\text{ст}}}{2}$ та $b' = \frac{b}{2}$:

Речовина	a_i	a'_i	b_i	b'_i
повітря	1172,95	1197,86	$167,21 \cdot 10^{-3}$	$83,6 \cdot 10^{-3}$
N_2	1142,21	1168,28	$175,00 \cdot 10^{-3}$	$87,5 \cdot 10^{-3}$
CO_2	1809,02	1864,22	$370,49 \cdot 10^{-3}$	$185,25 \cdot 10^{-3}$
H_2O (газ)	1229,51	1294,91	$438,93 \cdot 10^{-3}$	$219,47 \cdot 10^{-3}$
SO_2	1743,85	1820,49	$514,34 \cdot 10^{-3}$	$257,17 \cdot 10^{-3}$

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

Речовина	$a_i \cdot v_{\text{пр}_i}$	$b_i \cdot v_{\text{пр}_i}$
повітря	$1197,86 \cdot 4,56$	$83,6 \cdot 10^{-3} \cdot 4,56$
N_2	$1168,28 \cdot 9,0$	$87,5 \cdot 10^{-3} \cdot 9,0$
CO_2	$1864,22 \cdot 1,55$	$185,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1,55$
H_2O (г)	$1294,91 \cdot 1,68$	$219,47 \cdot 10^{-3} \cdot 1,68$
SO_2	$1820,49 \cdot 0,007$	$257,17 \cdot 10^{-3} \cdot 0,007$
суміш продуктів горіння	$a_{\text{СУМ}} = 21054,5$	$b_{\text{СУМ}} = 1826,4 \cdot 10^{-3}$

7. Розраховуємо температуру горіння за формулою (1.72):

$$t_{\text{гор}} = \frac{-210545 + \sqrt{210545^2 + 4 \cdot 18264 \cdot 327253 \cdot 10^3}}{2 \cdot 18264 \cdot 10^{-3}} =$$

$$= 1388 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

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

§ 2.3. Розрахунок температури дифузійного горіння в обмеженому просторі

Дифузійне горіння речовин та матеріалів в обмеженому просторі супроводжується розбавленням повітря продуктами горіння. Відомо, що полум'яне дифузійне горіння припиняється за умови зниження концентрації кисню у газоповітряній суміші (суміші повітря та продуктів горіння) до 14÷16 %.

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

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

де φ_{O_2} – кінцева об'ємна концентрація кисню у газоповітряній суміші у приміщенні, %.

Наявність надлишку повітря під час дифузійного

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

Приклад розв'язання задачі

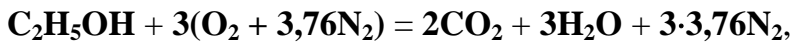
Розрахувати температуру дифузійного полум'я етанолу за умови виникнення горіння аварійного розливу горючої рідини в робочому цеху лікєро-горілчаного заводу, якщо кінцева концентрація кисню у приміщенні дорівнювала 13 %, а тепловтрати від зони горіння становили 20 % від загальної кількості тепла, що виділялося. Початкові умови вважати стандартними. Прийняти, що утворювалися лише продукти повного згорання.

Розв'язання

1. Розраховуємо коефіцієнт надлишку повітря під час дифузійного горіння у приміщенні цеху:

$$\alpha = \frac{21}{21-13} = 2,6.$$

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



$$\beta = 3;$$

$$n_{\text{CO}_2} = 2 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad n_{\text{H}_2\text{O}} = 3 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$n_{\text{N}_2} = 3 \cdot 3,76 = 11,28 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1};$$

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

3. Розраховуємо нижчу стандартну теплоту згорання етанолу за законом Гесса (1.51) з урахуванням, що теплота утворення етанолу дорівнює мінус 234,9 кДж·моль⁻¹:

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

4. Визначаємо константи рівняння $c_{p_i} = a_i + b_i \cdot t$ для кожного продукту згорання за таблицею 4 додатків (використовуємо молярні теплоємності речовин) та розраховуємо значення $a' = a + \frac{b\Gamma_{\text{ст}}}{2}$ та $b' = \frac{b}{2}$:

Речовина	a_i	a'_i	b_i	b'_i
повітря	28,62	29,23	$4,08 \cdot 10^{-3}$	$2,04 \cdot 10^{-3}$
N_2	27,87	28,54	$4,27 \cdot 10^{-3}$	$2,135 \cdot 10^{-3}$
CO_2	44,14	45,49	$9,04 \cdot 10^{-3}$	$4,52 \cdot 10^{-3}$
H_2O (газ)	30,00	31,59	$10,71 \cdot 10^{-3}$	$5,355 \cdot 10^{-3}$

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

Речовина	$a'_i n_{\text{пр}_i}$	$b'_i n_{\text{пр}_i}$
повітря	$29,23 \cdot 22,8$	$2,030 \cdot 10^{-3} \cdot 22,8$
N_2	$28,54 \cdot 11,28$	$2,135 \cdot 10^{-3} \cdot 11,28$
CO_2	$45,49 \cdot 2$	$4,520 \cdot 10^{-3} \cdot 2$
H_2O (г)	$31,59 \cdot 3$	$5,355 \cdot 10^{-3} \cdot 3$
суміш продуктів горіння	$a_{\text{сум}} = 1174,1$	$b_{\text{сум}} = 95,5 \cdot 10^{-3}$

6. Розраховуємо температуру горіння за формулою (1.72) з урахуванням тепловтрат.

За умовами задачі $Q_{\text{ТВТ}} = 0,2Q_{\text{н}}$, отже, на нагрів продуктів горіння витрачається:

$$Q_{\text{пг}} = Q_{\text{н}} - Q_{\text{ТВТ}} = Q_{\text{н}} \cdot (1 - 0,2) = 0,8Q_{\text{н}};$$

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

$$= 1007^{\circ}\text{C}.$$

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

§ 3. Розрахунок температури вибуху паро- та газоповітряних сумішей

Кінетичне горіння газоповітряної або пароповітряної суміші протікає з такою великою швидкістю, що горюча суміш встигає згоріти ще до теплового розширення продуктів реакції. Отже можна вважати, що процес горіння під час вибуху протікає за постійного об'єму. Внаслідок цього продукти горіння нагріваються у дві стадії: внаслідок тепловиділення хімічної реакції й адіабатичного стиснення.

Згідно із першим законом термодинаміки, тепло, що виділилося в системі, дорівнює:

$$dQ = dU + PdV = dH - VdP,$$

або за сталого об'єму:

$$dU = dH - VdP.$$

З урахуванням (1.44), (1.45) та рівняння стану ідеального газу перепишемо це вираження:

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

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

Вважаємо, що вся внутрішня енергія, яка виділяється під час вибуху (енергія вибуху $Q_{\text{виб}}$), витрачається на підвищення внутрішньої енергії продуктів горіння, тобто:

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

Тиск вибуху можна розрахувати за формулою:

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

де $P_{\text{виб}}$ – тиск продуктів горіння при вибуху, кПа;
 P_0 – початковий тиск горючої суміші, кПа;
 $T_{\text{виб}}$ – температура вибуху горючої суміші, К;
 T_0 – початкова температура вихідної суміші, К;
 $n_{\text{пр}}$ – число молів продуктів горіння, моль·моль⁻¹;
 $n_{\text{гс}}$ – число молів вихідної суміші, моль·моль⁻¹.

§ 3.1. Розрахунок максимальної температури та тиску вибуху індивідуальної речовини

Розрахунок максимальної температури та тиску вибуху проводять за рівнянням реакції горіння із використанням значень внутрішньої енергії системи. При цьому приймають наступні припущення:

- відбувається адіабатичне горіння суміші за постійного об'єму;
- горіння протікає за стехіометричного співвідношення горючої речовини та повітря ($\alpha = 1$);
- згорання речовини відбувається без температурної дисоціації продуктів горіння.

Методика визначення максимальної температури та тиску вибуху

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

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

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

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

7. Орієнтуючись на молярну внутрішню енергію азоту (таблиця 3 додатків), визначити температуру вибуху у першому наближенні T_1 .

8. Розрахувати енергію продуктів вибуху за температури T_1 з використанням даних внутрішньої енергії продуктів горіння (таблиця 3 додатків) за формулою:

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

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

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

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

11. Розрахувати температуру вибуху методом лінійної інтерполяції:

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

12. Розрахувати максимальний тиск вибуху за

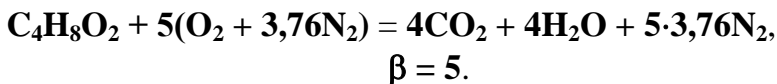
формулою (1.76).

Приклад розв'язання задачі

Визначити максимальну температуру та тиск вибуху стехіометричної пароповітряної суміші етилацетату $C_4H_8O_2$, якщо початкова температура пароповітряної суміші дорівнює $25\text{ }^\circ\text{C}$, а тиск — 110 кПа . Теплоутаплення етилацетату $\Delta H_f^\circ = -442,9\text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$.

Розв'язання

1. Складаємо рівняння реакції горіння етилацетату, визначаємо стехіометричний коефіцієнт β :



2. Розраховуємо питомих теоретичних число молей продуктів горіння:

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

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

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

4. Розраховуємо нижчу стандартну теплоту згорання етилацетату:

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

5. Розраховуємо енергію вибуху горючої суміші:

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

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

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

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

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

8. Визначаємо внутрішню енергію продуктів вибуху за температури T_1 та розраховуємо енергію продуктів вибуху за формулою (1.79):

$$U_{\text{CO}_2}^{T_1} = 137,7 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad U_{\text{N}_2}^{T_1} = 76,9 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

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

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

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

10. Визначаємо внутрішню енергію продуктів вибуху за температури T_2 та розраховуємо енергію продуктів вибуху за формулою (1.80):

$$U_{\text{CO}_2}^{T_2} = 116,2 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad U_{\text{N}_2}^{T_1} = 65,4 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

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

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

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

$$T_{\text{виб}} = 3000 + \frac{(2600 - 3000)(21045 - 2449,7)}{(2071 - 2449,7)} = 2635 \text{ К}.$$

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

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

Висновок: під час вибуху стехіометричної пароповітряної суміші етилацетату за даних умов температура вибуху буде дорівнювати 2635 К, а тиск продуктів горіння – 955 кПа.

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

За умов аварійного порушення технологічного процесу (виходу горючих газів всередину приміщення або розливу горючої рідини та подальшого її випаровування) концентрація горючої речовини у виробничому

приміщенні з часом зростає, а вміст повітря при цьому зменшується. За досягнення концентрацією горючої речовини певного критичного значення (нижньої концентраційної межі φ_n) утворюється середовище, яке може у випадку появи джерела запалювання горіти у кінетичному режимі, тобто може статися вибух газо- або пароповітряної суміші. Для кінетичного горіння існують критичні значення коефіцієнта надлишку повітря α_{\min} та α_{\max} , які відповідають сумішам із критичним вмістом кисню та горючої речовини відповідно.

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

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

де φ_n – нижня концентраційна межа поширення полум'я горючої речовини, %;

$v_{\text{пов}}^0, n_{\text{пов}}^0$ – питомий теоретичний об'єм або число молів повітря відповідно.

Дійсне число молів повітря розраховують за формулою:

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \Delta n &= n_{\text{пг}} - n_{\text{гс}} = n_{\text{пг}}^{\circ} + \Delta n_{\text{пов}} - (1 + \alpha n_{\text{пов}}^{\circ}) = \\ &= n_{\text{пг}}^{\circ} - (n_{\text{пов}}^{\circ} + 1) \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \end{aligned} \quad (1.85)$$

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

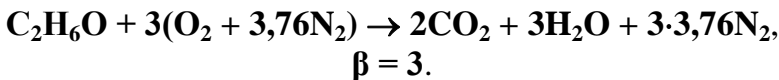
Приклад розв'язання задачі

Розрахувати температуру вибуху, що стався при загоранні пароповітряної хмари, яка утворилася в робочому цеху лікєро-горілочного заводу внаслідок розриву технологічного трубопроводу і випаровування етанолу. Вважати, що вибух стався за стандартних початкових умов при досягненні концентрації горючої речовини нижньої

концентраційної межі поширення полум'я φ_H . Під час горіння утворювалися лише продукти повного згорання, процес дисоціації продуктів горіння не враховувати.

Розв'язання

1. Складаємо рівняння реакції горіння етанолу в повітрі:



2. Визначаємо питомих теоретичне число молів повітря:

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

3. Визначаємо питомих теоретичне число молів продуктів горіння:

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

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

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

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

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

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

7. Розраховуємо число молів вихідної горючої

суміші з урахуванням надлишку повітря:

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

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

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

9. Розраховуємо енергію вибуху пароповітряної суміші етанолу за формулою (1.74).

Визначаємо за довідником [7] стандартну теплоту згорання етанолу: $Q_{\text{н}} = 1408 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$.

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

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

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

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

12. Визначаємо внутрішню енергію продуктів вибуху за температури T_1 та розраховуємо енергію продуктів вибуху за формулою (1.79) з урахуванням надлишку повітря:

$$U_{\text{CO}_2}^{T_1} = 84,5 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad U_{\text{N}_2}^{T_1} = 48,6 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

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

$$Q_{\text{впг}}^{T_1} = 2 \cdot 84,5 + 3 \cdot 66,8 + 3 \cdot 3,76 \cdot 48,6 + (1,9 - 1) \cdot 14,3 \cdot 49,2 = \\ = 1550,9 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

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

14. Визначаємо внутрішню енергію продуктів вибуху за температури T_2 та розраховуємо енергію продуктів вибуху за формулою (1.80):

$$U_{\text{CO}_2}^{T_2} = 74,1 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad U_{\text{N}_2}^{T_2} = 43,0 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

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

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

15. Розраховуємо температуру вибуху за формулою (1.81):

$$T_{\text{виб}} = 2000 + \frac{(1800 - 2000)(1410,5 - 1550,9)}{1368,1 - 1550,9} = 1846 \text{ К}.$$

16. Розраховуємо тиск вибуху за формулою (1.76):

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

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

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Для речовин, наведених у таблиці, визначити:
- а) стандартну теплоту утворення, нижчу та вищу молярну теплоту згорання речовини;
 - б) вищу масову та об'ємну теплоти згорання;
 - в) адіабатичну температуру горіння з використанням ентальпії продуктів горіння;
 - г) адіабатичну температуру горіння з використанням теплоємності продуктів горіння.

№	Речовина	α	№	Речовина	α
1.	метан CH_4	1,8	21.	дихлоретан $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$	1,1
2.	метанол CH_4O	1,2	22.	толуол C_7H_8	1,3
3.	циклопентан C_5H_{10}	1,5	23.	диметилкетон $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	1,4
4.	бензол C_6H_6	1,6	24.	фенол $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$	1,2
5.	пропілен C_3H_6	1,2	25.	етилацетат $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	1,3
6.	гептанол $\text{C}_7\text{H}_{16}\text{O}$	1,3	26.	циклогексанол $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$	1,8
7.	пентан C_5H_{12}	1,5	27.	гліцерин $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	1,3
8.	сульфід карбону CS_2	1,7	28.	бутанол $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	1,9
9.	нітробензол $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	1,1	29.	бензиловий спирт $\text{C}_7\text{H}_8\text{O}$	2,0
10.	октан C_8H_{18}	1,6	30.	пропанол $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$	1,2
11.	анілін $\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$	1,3	31.	нітротолуол $\text{C}_7\text{H}_7\text{NO}_2$	1,7
12.	діетилловий ефір $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	2,0	32.	фталева кислота $\text{C}_8\text{H}_4\text{O}_3$	1,5
13.	хлоргексан $\text{C}_6\text{H}_{13}\text{Cl}$	2,1	33.	етанол $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	1,4
14.	диметиламін $\text{C}_2\text{H}_7\text{N}$	1,8	34.	амілацетат $\text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}_2$	2,2
15.	уротропін $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$	2,2	35.	хлорбензол $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$	2,6
16.	ацетилен C_2H_2	2,5	36.	хлорбутан $\text{C}_4\text{H}_9\text{Cl}$	1,9
17.	діетилкетон $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}$	1,9	37.	бутан C_4H_{10}	2,4
18.	діетилловий ефір $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	2,7	38.	пропан C_3H_8	1,8
19.	динітрофенол $\text{C}_6\text{H}_4\text{O}_5\text{N}_2$	1,8	39.	гексан C_6H_{14}	2,7
20.	диметилфосфат (CH_3) $_2\text{HPO}_4$	1,4	40.	дихлордіетилсульфід ($\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}$) $_2\text{S}$	1,4

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

- а) нижчу об'ємну теплоту згоряння;
- б) адіабатичну температуру горіння з використанням ентальпії продуктів горіння;
- в) адіабатичну температуру горіння з використанням теплоємності продуктів горіння.

№	Суміш газів	α	Вміст газів, об. %										
			H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₄ H ₈	CO ₂	N ₂
<i>Гази</i>													
1	водяний	1,1	45	35	14	-	-	-	-	-	-	-	6
2	водяний	1,2	50	40	1	-	-	-	-	-	-	4	5
3	напівводяний	1,3	10	22	3	-	-	-	-	-	-	9	56
4	оксिवодяний	1,5	33	54	1	-	-	-	-	-	-	10	2
5	доменний	1,4	2	28	1	-	-	-	-	-	-	19	50
6	доменний	1,7	3	29	0,5	-	-	-	-	-	-	16,5	51
7	генераторний	1,6	21	39	40	-	-	-	-	-	-	-	-
8	коксівий	2,0	57	8	23	3	3	-	-	-	-	3	3
9	коксівий	1,8	53	5	30	2	4	-	-	-	-	2	4
10	побутовий	2,1	35	20	30	-	-	-	-	-	-	8	7
11	природний	2,2	-	-	65	15	-	-	13	-	-	-	7
12	підземної газифікації	1,9	13	15	2	-	-	-	-	-	-	10	60
<i>Газоподібні продукти піролізу рідин</i>													
13	газовий бензин	1,1	16	-	28	8	24	-	4	6	14	-	-
14	лігроїн	1,2	15	-	25	9	26	7	3	-	10	3	2
15	гас	1,3	18	-	32	5	26	-	5	-	3	6	5
16	газовий конденсат	1,4	25	-	24	7	16	-	8	-	7	10	3
17	сланцева смола	1,5	21	-	33	8	17	8	-	1	1	10	1
18	крекінг полімерів	1,6	18	-	31	8	23	-	3	4	3	6	4
19	сира нафта	1,7	17	-	24	9	26	3	4	6	4	6	1
20	очищена нафта	1,8	14	-	31	20	-	-	15	20	-	-	-

3. Для речовин, склад яких наведено у таблиці, визначити:

а) масу горючої речовини, яку необхідно спалити для нагрівання заданої маси води (інтервал нагріву води та частка тепла, що втрачається під час нагрівання, наведені в таблиці; теплоємність води $4,18 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$);

б) масу горючої речовини, яку необхідно спалити для випаровування заданої маси води за умови, що 100 % тепла, яке виділилося при повному згорянні горючої речовини, витратилося на випаровування заданої кількості води (теплота випаровування води $2260 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$);

в) пожежну навантагу у приміщенні площею 150 м^2 , якщо згоряє три типи горючих матеріалів (задає викладач) масою по 20 кг кожний;

г) адиабатичну температуру горіння речовини з використанням ентальпії продуктів горіння, якщо горіння протікало за відомого коефіцієнта надлишку повітря без тепловтрат;

д) температуру горіння речовини з використанням теплоємності продуктів горіння, якщо горіння протікало за відомого коефіцієнта надлишку повітря (α) з урахуванням тепловтрат.

№	Речовина	Склад речовини, % мас.						Тепловтрати, % Q_u	α	m H_2O , кг	Інтервал нагріву, °С
		С	Н	О	S (N)	W	A				
1.	нафта	84	14	–	1	1	–	10	1,8	30	5 – 80
2.	– // –	85	13	1	–	1	–	8	1,7	40	10 – 100
3.	гас	85	14	1	–	–	–	7	1,6	110	20 – 80
4.	бензин	83	12	3	2	–	–	6	1,5	90	0 – 25
5.	– // –	83	15	1		1		9	1,9	20	10 – 70
6.	диз. паливо	86	12	1	(1)	–	–	5	1,4	30	15 – 60

Продовження таблиці

№	Речовина	Склад речовини, % мас.						Тепловтраги, % $Q_{\text{п}}$	α	m H_2O , кг	Інтервал нагріву, °С
		С	Н	О	S (N)	W	A				
7.	мазут	83	11	1	(4)	1	–	24	1,3	50	15 – 90
8.	деревина	45	6	41	(2)	4	2	13	1,5	40	5 – 70
9.	–//–	42	6	38	(4)	7	3	5	1,3	30	10– 100
10.	–//–	45	7	40	–	7	1	4	1,2	60	20– 100
11.	–//–	46	6	41	–	5	2	5	1	70	15 – 95
12.	торф	46	5	40	(4)	4	1	7	1,6	30	5 – 100
13.	–//–	54	5	30	1	7	3	5	1,2	40	10 – 85
14.	–//–	56	4	36	1	1	2	16	1,3	50	5 – 95
15.	–//–	57	6	34	1	1	1	4	1,7	30	10 – 80
16.	вугілля	78	7	10	2	1	2	10	1,4	40	5 – 100
17.	–//–	80	5	10	3	1	1	7	1,8	50	10 – 95
18.	–//–	77	5	11	3	1	3	10	1,5	40	0 – 90
19.	–//–	83	5	8	1	1	2	5	1,4	30	5 – 95
20.	–//–	86	5	6	1	2	–	6	1,3	50	0 – 100
21.	кокс	93	4	2	1	–	–	17	1,2	30	10 – 95
22.	–//–	91	6	2	1	–	–	4	1,1	15	5 – 95
23.	–//–	96	1	–	1	–	2	25	2,0	60	5 – 95
24.	–//–	98	–	–	1	–	1	10	1,9	40	10 – 95
25.	–//–	92	3	1	–	–	4	9	1,6	50	5 – 95
26.	–//–	85	13	1	–	–	1	7	1,5	40	8 – 100
27.	–//–	84	14	1	–	–	1	10	1,4	50	5 – 100
28.	пластик	44	6	49	–	–	1	10	1,3	40	10 – 90
29.	–//–	45	5	49	–	–	1	10	1,2	30	10–100
30.	–//–	64	6	30	–	–	–	10	1,1	20	5 – 95
31.	картон	50	20	15	–	5	10	8	1,8	100	-20– 10
32.	бавовна	46	25	15	(6)	8	–	9	1,7	5	10 – 40
33.	каучук	85	13	1	1	–	–	7	1,5	10	10 – 70
34.	–//–	78	15	2	5	–	–	–	1,4	7	25 – 45
35.	–//–	81	16	1	1	–	1	–	1,1	15	30 – 85

4. Для речовин, наведених у таблиці, визначити:

а) кількість тепла, що виділяється під час повного згорання за стандартних умов вказаної маси горючої речовини; яка маса води може бути нагріта при цьому до температури кипіння (початкова температура води 25°C, теплоємність води $c_p = 4,18 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$);

б) температуру дифузійного горіння парів горючої рідини за умови аварійного розливу у виробничому приміщенні, якщо кінцевий вміст кисню у продуктах горіння наведено у таблиці.

№	Речовина	Сумарна формула	Маса води, кг	Вміст кисню у продуктах горіння, %
1.	акрилова кислота	$C_3H_4O_2$	7	13
2.	амілацетат	$C_7H_{14}O_2$	3	16
3.	аміловий спирт	$C_5H_{12}O$	5	11,5
4.	анілін	C_6H_7N	10	15
5.	ацетон	C_3H_6O	12	18
6.	ацетанлід	C_8H_9ON	25	15
7.	ацетальдегід	C_2H_4O	16	14
8.	бензол	C_6H_6	4	13
9.	бутилацетат	$C_6H_{12}O_2$	8	12
10.	бутиловий спирт	$C_4H_{10}O$	15	14
11.	тіодигліколь	$C_4H_{10}O_2S$	54	15
12.	циклопентан	C_5H_{10}	26	18
13.	метанол	CH_4O	47	12
14.	ксилол	C_8H_{10}	45	17
15.	бензин Б-70	$C_{7,267}H_{14,796}$	50	14
16.	бензин А-72 "З"	$C_{6,991}H_{13,108}$	40	16
17.	бензин А-93 "Л"	$C_{7,024}H_{13,706}$	30	19
18.	бензин А-93 "З"	$C_{6,911}H_{12,168}$	20	17
19.	дизельне паливо "З"	$C_{12,343}H_{23,889}$	10	15
20.	дизельне паливо "Л"	$C_{14,511}H_{29,120}$	5	16
21.	уайт-спірит	$C_{10,5}H_{21,0}$	55	18

Продовження таблиці

№	Речовина	Сумарна формула	Маса води, кг	Вміст кисню у продуктах горіння, %
22.	газ ГО – 20	$C_{13,595}H_{28,860}$	15	19
23.	газ ГО – 22	$C_{10,914}H_{21,832}$	25	13
24.	газ ГО – 25	$C_{11,054}H_{21,752}$	35	14
25.	олива трансформаторна	$C_{21,74}H_{42,28}S_{0,04}$	65	16
26.	олива АМТ–300	$C_{22,25}H_{33,48}S_{0,34}N_{0,07}$	75	17
27.	олива АМТ–300Т	$C_{19,04}H_{24,58}S_{0,196}N_{0,04}$	85	15
28.	розчинник Р–3	$C_{5,452}H_{7,606}O_{0,535}$	95	19
29.	розчинник Р–4	$C_{6,231}H_{7,798}O_{0,223}$	150	15
30.	розчинник Р–5	$C_{5,309}H_{8,655}O_{0,897}$	200	14
31.	розчинник Р–12	$C_{6,837}H_{9,217}O_{0,515}$	60	16
32.	розчинник М	$C_{2,761}H_{7,147}O_{1,187}$	70	19
33.	розчинник РМЛ	$C_{2,645}H_{6,810}O_{1,038}$	80	16
34.	розчинник РМЛ–218	$C_{4,791}H_{8,318}O_{0,974}$	90	14
35.	розчинник РМЛ–315	$C_{5,962}H_{9,779}O_{0,845}$	100	17

5. Для речовин, наведених у таблиці, визначити:

а) максимальні температуру та тиск вибуху пароповітряної горючої суміші за стандартних умов;

б) температуру та тиск вибуху бідної горючої суміші, що утворилася під час випаровування горючої рідини внаслідок аварійного розливу, якщо концентрація пари досягла нижньої концентраційної межі поширення полум'я φ_n (значення φ_n для складних речовин дивись у таблиці 12 додатків).

Розділ 1. Загальна характеристика процесу горіння

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

РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ТА ПАРАМЕТРИ ПРОЦЕСУ ВИНИКНЕННЯ ГОРІННЯ

Виникнення горіння – це швидкий перехід повільної окисно-відновної реакції до миттєвого перетворення вихідних речовин у продукти реакції за рахунок самоприскорення. Це перетворення носить вибуховий характер та супроводжується спалахом або звуковим ефектом [1] – [3], [6].

Основна особливість явищ горіння полягає у тому, що швидкість хімічної реакції збільшується за умови зменшення концентрації реагуючих речовин. Саморозгін реакції відбувається, як правило, внаслідок зміни інших параметрів (властивостей) системи, наприклад, підвищення температури або накопичення активних продуктів, що прискорюють (каталізують) реакцію.

Існує значний клас хімічних реакцій, до якого відносяться всі реакції окиснення вуглеводнів киснем, швидкість яких зростає у міру накопичення продуктів реакції [6]. Такі реакції називають *автокаталітичними*. Істотною особливістю реакцій у суміші вуглеводнів та кисню є те, що автокаталіз зумовлений у них не кінцевими продуктами реакції, а вільними радикалами, що утворюються в результаті проміжних хімічних перетворень. Автокаталітичні процеси цього типу відносяться до класу так званих *ланцюгових реакцій*. За певних умов вільні радикали чи атоми можуть стати автокаталітичними агентами реакції горіння – *активними центрами*, які вступають у взаємодію між собою або з валентнонасиченими молекулами. Швидкість ланцюгової реакції $\omega_{\text{лр}}$ відображається рівнянням:

$$\omega_{\text{лр}} = \omega_o + \omega_f - \omega_g,$$

де ω_o – швидкість утворення початкових активних центрів;

ω_f – швидкість реакції розгалуження ланцюга, внаслідок якої число активних центрів збільшується;

ω_g – швидкість реакції обриву ланцюга, внаслідок якої число активних центрів зменшується.

За умови перевищення швидкості розгалуження над швидкістю обриву ланцюгів у системі загальна швидкість хімічної реакції окиснення підвищується, і за досягнення критичного значення окиснення переходить у процес горіння, тобто виникає займання.

Умови, необхідні для швидкого протікання реакції, створені самою системою. Якщо сама реакція створює умови для свого власного швидкого протікання, то виникає так званий зворотний зв'язок. За малої зміни зовнішніх умов можливий перехід від стаціонарного режиму з малою швидкістю реакції до режиму, коли її швидкість зростає згідно експонентного закону. Явища різкої зміни режиму протікання процесу за малої зміни зовнішніх умов називаються «критичними», а умови, за яких відбувається цей перехід, носять назву «критичних умов».

Таким чином, виникнення горіння пов'язане з накопиченням у системі тепла або каталізуючих активних продуктів реакції (активних центрів). У першому випадку кажуть про *тепловий механізм виникнення горіння*, а у другому – про *ланцюговий*.

Необхідною умовою виникнення горіння є одночасна наявність трьох складових: горючої речовини та окисника в достатніх концентраціях (тобто горючого

середовища) і первинного імпульсу енергії достатньої потужності. Тепловим імпульсом можуть бути зовнішні фактори (розжарена іскра, електричний розряд, нагріті стінки посудини, адіабатичне стиснення) або внутрішні екзотермічні процеси.

Залежно від природи теплового імпульсу та початкових умов, в яких знаходиться горюча система, розрізняють три види виникнення горіння: самоспалахування, самозаймання, вимушене запалювання.

За умови *самоспалахування* вся горюча система нагрівається зовні до критичної температури, вище за яку горюча система самостійно спалахує без додаткового зовнішнього впливу.

За умови *самозаймання* відбувається накопичення тепла в певній частині горючої системи за рахунок протікання внутрішніх екзотермічних фізико-хімічних або біологічних процесів, що призводить до виникнення горіння.

За умови *вимушеного запалювання* горіння виникає в будь-якій точці холодної горючої системи внаслідок дії високотемпературного джерела запалювання.

Якщо в результаті будь-яких процесів у системі підвищується температура, то відбувається підвищення швидкості руху молекул, збільшується кількість співударів, що веде до активізації компонентів горючої суміші. Молекули починають скоріше реагувати між собою з утворенням кінцевих і проміжних продуктів реакції. Реакції окиснення є екзотермічними, тобто ідуть із виділенням тепла, отже, в системі відбудеться додатковий розігрів і зростання температури. За наявності різниці температур виникає процес віддачі

тепла від системи в навколишнє середовище за рахунок конвекційної теплопередачі.

Існує таке значення температури, за якої кількість тепла, що виділяється у процесі окиснення, стає більшою, ніж кількість тепла, що віддається від системи. При цьому виникає саморозігрів системи, що призводить до виникнення горіння.

Характеристики різних видів виникнення горіння у значній мірі є різноманітними, але **загальними рисами процесу виникнення горіння є:**

- утворення *горючої системи*, яка складається з горючої речовини та окисника, взятих у певному співвідношенні;

- тепловиділення в горючій системі за рахунок протікання хімічної реакції окиснення перевищує тепловіддачу від системи у навколишній простір, тобто $q(+) > q(-)$;

- відбувається підвищення концентрації активних центрів або температури всієї горючої системи чи певної її частини до *критичного значення*, вище за яке швидкість реакції окиснення різко підвищується;

- перехід від повільної реакції окиснення до миттєвого перетворення (горіння) відбувається за певний період часу – *період індукції*.

ГЛАВА 1. САМОСПАЛАХУВАННЯ ГОРЮЧИХ СУМІШЕЙ

§ 1. Температура самоспалахування

Самоспалахування – це процес виникнення горіння в результаті різкого підвищення швидкості екзотермічних реакцій окиснення, що виникають під дією зовнішнього нагрівання всієї горючої системи до критичної температури [1], [6], [10], [11].

Температура самоспалахування – найменша температура горючої системи, за якої в умовах спеціальних випробувань спостерігається її самоспалахування.

За температури самоспалахування в горючій системі створюються умови, що призводять до стрибкоподібного підйому температури до температури горіння через різке підвищення швидкості хімічної реакції без додаткового зовнішнього впливу.

Температура самоспалахування T_{cc} та час індукції $\tau_{інд}$ можуть використовуватися як показник ступеня пожежної небезпеки горючих речовин та матеріалів. Чим нижче температура самоспалахування речовини або менше період індукції, тим легше виникне горіння, а отже, тим більше її пожежна небезпека.

Оскільки виникнення горіння можливе внаслідок різної зміни тепловиділення й тепловіддачі (збільшення інтенсивності тепловиділення $q(+)\uparrow$ або зменшення інтенсивності тепловіддачі $q(-)\downarrow$, або одночасна їх зміна), то температура самоспалахування й величина індукційного періоду не є постійними величинами, а залежать від характеру зміни інтенсивності тепловиділення й тепловіддачі.

На температуру самоспалахування речовин, а отже й на пожежну небезпеку процесу, в якому обертається ця речовина і може утворюватися горюча суміш, впливають три групи факторів:

1) вид горючої речовини (теплотворна здатність: $Q_H \uparrow$ $t_{cc} \downarrow$, будова й просторова структура речовини (середня довжина карбонового ланцюга): $\ell_{\text{сер}} \uparrow$ $t_{cc} \downarrow$);

2) склад горючої суміші (концентрація горючої речовини в суміші: за стехіометричного співвідношення компонентів $\varphi_{\text{гр}} = \varphi_{\text{стм}}$ температура самоспалахування набуває мінімального значення; концентрація кисню в окиснювальному середовищі: $\varphi_{O_2} \uparrow$ $t_{cc} \downarrow$; наявність негорючих домішок у суміші: $\varphi_{\text{нг}} \uparrow$ $t_{cc} \uparrow$; наявність каталізаторів або інгібіторів реакції окиснення: $\varphi_{\text{кат}} \uparrow$ $t_{cc} \downarrow$, $\varphi_{\text{інг}} \uparrow$ $t_{cc} \uparrow$);

3) умови, в яких знаходиться горюча суміш (тиск у системі: $P \uparrow$ $t_{cc} \downarrow$; об'єм і діаметр посудини: $V_{\text{гс}} \uparrow$ $t_{cc} \downarrow$, $d \uparrow$ $t_{cc} \downarrow$; площа поверхні тепловіддачі: $S_{\text{тв}} \uparrow$ $t_{cc} \uparrow$; коефіцієнт конвекційної тепловіддачі: $\alpha_k \uparrow$ $t_{cc} \uparrow$; початкова температура суміші: $t_o \uparrow$ $t_{cc} \downarrow$).

Температура самоспалахування вуглеводнів та їх похідних передусім визначається будовою карбонового ланцюга, наявністю ненасичених зв'язків, а також типом функціональних груп, що входять до ланцюга.

Найбільшу температуру самоспалахування мають ароматичні вуглеводні. Наприклад, температура самоспалахування бензолу (ароматичного вуглеводню) дорівнює 864 К, циклогексану (циклічного вуглеводню) – 543 К; ще меншою є температура самоспалахування гексану (нормального алкану) – 534 К.

Сполуки з ненасиченими зв'язками (алкени й алкіни) окиснюються легше, ніж насичені вуглеводні (алкани) з

таким самим числом атомів карбону, отже й температура їх самоспалахування, зазвичай, є нижчою за температуру самоспалахування алканів.

Для вуглеводнів ізомерної будови зі збільшенням ступеня розгалуження молекули температура самоспалахування підвищується. Так, *n*-бутан має температуру самоспалахування 704 К, а ізобутан – 749 К. Експериментально встановлено, що температура самоспалахування залежить від середньої довжини карбонового ланцюга $l_{\text{сер}}$ алканів: чим довшим є карбоновий ланцюг молекули, тим меншою є температура самоспалахування. Це пояснюється послабленням зв'язків між атомами карбону в більш довгій молекулі.

Кисневмісні похідні вуглеводнів (спирти, альдегіди, прості ефіри) мають температуру самоспалахування зазвичай нижчу, ніж у вуглеводнів з таким самим числом атомів карбону в молекулі.

Швидкість хімічної реакції є максимальною за стехіометричного співвідношення горючої речовини й окисника, тому за цієї концентрації горючої речовини в суміші спостерігається мінімальне значення температури самоспалахування. При контакті деяких видів горючих речовин з чистим киснем навіть за температури навколишнього середовища може виникнути самоспалахування. За зміни концентрації горючої речовини від стехіометричної (як за нестачі, так і за надлишку горючої речовини), а також при додаванні до горючої суміші негорючих компонентів зменшується швидкість хімічної реакції, а отже, температура самоспалахування підвищується.

Через те що реакції окиснення вуглеводнів киснем

мають ланцюговий механізм, збільшення об'єму реакційної посудини призводить до зменшення швидкості реакцій обриву ланцюгів на стінках посудини, а отже, і до зростання загальної швидкості реакції окиснення та збільшення інтенсивності тепловиділення. При цьому температура самоспалахування знижується. З іншого боку, за зменшення об'єму посудини збільшується питома поверхня тепловіддачі ($S_{\text{ТВ}}/V \sim 1/d$), а отже, температура самоспалахування збільшується. За умови зменшення розміру посудини можливе досягнення такого критичного значення характерного розміру посудини $d_{\text{кр}}$, за якого самоспалахування не відбувається. Цей принцип використовується в основі технологічних апаратів – *вогнеперешкоджувачів*, що представляють собою газопроникні пристрої, принцип дії яких полягає в розбиванні горючої системи на маленькі об'єми і різкому збільшенні площі тепловіддачі. Вогнеперешкоджувачі застосовують у дихальних пристроях технологічного обладнання для запобігання поширенню полум'я по горючих системах.

Оскільки пряме вимірювання температури самоспалахування пов'язане зі значними труднощами, для практичних цілей за температуру самоспалахування приймають мінімальну температуру стінки реакційної посудини, за якої спостерігається самоспалахування горючої суміші.

Експериментально температуру самоспалахування можна визначити різними методами. Основними з них є:

- 1) метод впускання заздалегідь готової холодної суміші у вакуумовану нагріту посудину;
- 2) метод адіабатичного стиснення заздалегідь готової суміші;

3) метод «краплі», коли горюча суміш утворюється в нагрітій посудині за рахунок випаровування горючої речовини.

Оскільки температура самоспалахування не є величиною постійною і може змінюватися за зміни умов проведення випробувань, то для того щоб можна було порівнювати пожежну небезпеку декількох речовин, необхідно зіставляти їх температури самоспалахування, які визначені за однакових (стандартних) умов. Для отримання порівнянних та відтворюваних результатів під час пожежно-технічних досліджень застосовують стандартну випробувальну установку СТС і методика, що описані у стандарті [30]. Прилад СТС призначений для визначення *стандартної температури самоспалахування* пари рідин, газів і речовин, що плавляться, методом «краплі».

Стандартна температура самоспалахування – найменша температура, визначена стандартним методом, до якої повинна бути нагріта горюча суміш пари з повітрям, що найлегше займається, щоб виникло горіння без внесення стороннього джерела запалювання.

Стандартна температура самоспалахування не є мінімальною температурою, за якої відбувається самоспалахування горючої суміші. *Мінімальна температура самоспалахування* може бути меншою за стандартну температуру самоспалахування на 100÷150 °С. Числові значення мінімальної температури самоспалахування використовують під час розробки пожежно-профілактичних заходів, пов'язаних з безпечним високотемпературним нагрівом речовин та матеріалів.

Практичне значення температури самоспалахування

Температуру самоспалахування речовини використовують для:

- 1) порівняння пожежонебезпеки речовин за температурою самоспалахування (цей показник є обов'язковим для горючих речовин в усіх агрегатних станах);
- 2) класифікації пари легкозаймистих рідин по групах вибухонебезпечних сумішей з повітрям для вибору типу вибухозахисного енергоустаткування згідно [32].

Таблиця 2.1 – Визначення групи вибухонебезпечних сумішей за їх температурою самоспалахування

Група вибухонебезпечних сумішей	Температура самоспалахування, °C
T1	більше за 450
T2	300–450
T3	200–300
T4	135–200
T5	100–135
T6	85–100

Відповідно до групи вибухонебезпечних сумішей установлюють максимально припустиму температуру нагріву поверхні електричного обладнання у вибухонебезпечних приміщеннях і у зовнішніх установках, якщо можливий контакт цих поверхонь з вибухонебезпечним середовищем.

3) визначення припустимої температури нагрівання робочих поверхонь технологічного обладнання.

Для визначення безпечної температури $t_{\text{без}}$ нагрівання робочих поверхонь технологічного устаткування необхідно, щоб було дотримано вимогу стандарту [31]

щодо запобігання утворенню у горючому середовищі джерел запалювання. Відповідно до п. 2.3 стандарту цього можна досягти підтриманням температури нагрівання поверхонь машин, механізмів, устаткування, пристроїв, речовин і матеріалів, що можуть вступити у контакт із горючим середовищем, нижче гранично припустимої, що становить 80 % від мінімальної температури самоспалахування горючої речовини.

Безпечну температуру нагрівання робочих поверхонь технологічного устаткування можна визначити за формулою:

$$t_{\text{без}} \leq 0,8 \cdot t_{\text{cc}}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.1)$$

Температуру самоспалахування твердих речовин не можна використовувати для визначення припустимих температур безпечного нагрівання технологічного обладнання. У цьому випадку слід розглядати умови виникнення теплового самозаймання та використовувати інший параметр пожежної небезпеки речовин – температуру самонагрівання (див. розд. 2, гл. 2, § 2).

§ 2. Розрахунок температури самоспалахування

Стандартну температуру самоспалахування газів і парів органічних сполук можна приблизно розрахувати за формулами, запропонованими в роботі [5]:

$$t_{\text{cc}} = 300 + 116 \sqrt{5 - l_{\text{сер}}}, \text{ якщо } l_{\text{сер}} \leq 5; \quad (2.2)$$

$$t_{\text{cc}} = 300 - 38 \sqrt{l_{\text{сер}} - 5}, \text{ якщо } l_{\text{сер}} \geq 5, \quad (2.3)$$

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

Похибка розрахунку за формулами (2.2) і (2.3) для органічних сполук, що складаються з атомів С, Н, О та N, становить 25 °С.

Умовна середня довжина $\ell_{\text{сер}}$ молекули хімічної сполуки дорівнює середньому арифметичному всіх можливих довжин ℓ_i ланцюгів молекули:

$$\ell_{\text{сер}} = \frac{\sum \ell_i}{n_{\text{ланц}}}, \quad (2.4)$$

де ℓ_i – довжина i -го ланцюга молекули;

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

У даному випадку під *ланцюгом молекули* розуміють безперервний ланцюг атомів, що з'єднує дві кінцеві групи.

Число ланцюгів $n_{\text{ланц}}$ молекули дорівнює числу сполучень із числа кінцевих груп у молекулі m по 2, тобто

$$n_{\text{ланц}} = 0,5 \cdot m(m - 1), \quad (2.5)$$

де m – число кінцевих груп у молекулі.

Кінцевими групами вважають $-\text{CH}_3$, $=\text{CH}_2$, функціональні групи і цикли.

Якщо функціональна група або цикл розташовані в середині ланцюга, їх слід вважати одночасно і кінцевою, і проміжною групою.

Довжину ℓ_i ланцюга молекули розраховують як суму числа атомів карбону в даному i -тому ланцюзі m_{C_i} та еквівалентних довжин функціональних груп і циклів,

що входять в даний ланцюг, l_e :

$$l_i = m_{C_i} + \sum l_e .$$

Розрахункове число атомів карбону в аліфатичному вуглеводні дорівнює фактичному числу атомів карбону в даному ланцюзі. Подвійний зв'язок $C=C$ довжину ланцюга не змінює. Потрійний зв'язок $C\equiv C$ збільшує довжину ланцюга, в якому він міститься, на $6/(m_C!)$ атомів карбону.

Еквівалентна довжина функціональних груп $-O-C_6H_5$ та $-COO-$ дорівнює одиниці, груп $-NH-$ і $N\equiv$ дорівнює 2,5, а для $-O-$ у 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.

Еквівалентну довжину ароматичного циклу визначають за формулою:

$$l_{e_{Ar}} = n_{я} - 0,5 + \sum l_{ef} ,$$

де $n_{я}$ – число ядер у циклі;

$\sum l_{ef}$ – алгебраїчна сума еквівалентних довжин функціональних груп, що входять до складу циклу.

Еквівалентна довжина неароматичного моноядерного конденсованого циклу дорівнює числу атомів карбону в циклі, яке зменшене на 0,5.

Еквівалентна довжина неароматичного конденсованого циклу вважається рівною алгебраїчній сумі атомів карбону в ядрі циклу, еквівалентних довжин моноядерних неароматичних циклів, ароматичних циклів і

функціональних груп, що входять до складу даного ядра.

З більшою точністю, ніж за формулами (2.2) і (2.3), стандартну температуру самоспалахування окремих класів органічних сполук можна визначити за спеціальними таблицями: для парафінових вуглеводнів – таблиця 2.2, для насичених аліфатичних одноатомних спиртів – таблиця 2.3, для ароматичних вуглеводнів – таблиця 2.4.

Середню довжину молекули розраховують за формулою (2.4). При цьому розрахункове число атомів карбону в ланцюзі аліфатичного спирту дорівнює фактичному числу атомів карбону плюс одиниця. Розрахункове число атомів карбону в ланцюзі, в якому є ароматичне кільце, дорівнює фактичному числу атомів карбону мінус одиниця. Атоми карбону в ароматичному кільці в розрахунок не беруться.

Довжина ланцюга молекули ℓ_i зростає на 2, якщо до складу входять дві групи або ланцюги, що приєднані до ароматичного циклу в *орто*-положенні.

Температуру самоспалахування окремих класів органічних сполук можна визначити за методом порівняльного розрахунку за емпіричною формулою (2.6):

$$t_{cc} = at_{cc}^{\text{алк}} + b, \quad (2.6)$$

де a , b – коефіцієнти гомологічного ряду даної речовини (див. табл. 2.5);

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

Таблиця 2.2 – Залежність температури самоспалахування парафінових вуглеводнів (алканів) від ефективної довжини вуглецевого ланцюга

$l_{\text{сер}}$	$t_{\text{ссп}}, ^\circ\text{C}$	$l_{\text{сер}}$	$t_{\text{ссп}}, ^\circ\text{C}$	$l_{\text{сер}}$	$t_{\text{ссп}}, ^\circ\text{C}$	$l_{\text{сер}}$	$t_{\text{ссп}}, ^\circ\text{C}$
3,0	470	6,1	232	9,2	208	12,3	204
3,1	465	6,2	231	9,3	208	12,4	204
3,2	460	6,3	230	9,4	207	12,5	204
3,3	455	6,4	229	9,5	207	12,6	204
3,4	450	6,5	228	9,6	207	12,7	204
3,5	444	6,6	227	9,7	207	12,8	204
3,6	439	6,7	226	9,8	206	12,9	204
3,7	433	6,8	225	9,9	206	13,0	204
3,8	426	6,9	224	10,0	206	13,1	204
3,9	420	7,0	223	10,1	206	13,2	204
4,0	413	7,1	222	10,2	206	13,3	204
4,1	407	7,2	221	10,3	206	13,4	204
4,2	400	7,3	221	10,4	205	13,5	203
4,3	392	7,4	220	10,5	205	13,6	203
4,4	381	7,5	219	10,6	205	13,7	203
4,5	370	7,6	218	10,7	205	13,8	203
4,6	358	7,7	217	10,8	205	13,9	203
4,7	344	7,8	216	10,9	205	14,0	203
4,8	328	7,9	216	11,0	205	14,1	203
4,9	308	8,0	215	11,1	205	14,2	203
5,0	287	8,1	214	11,2	205	14,3	203
5,1	274	8,2	213	11,3	205	14,4	203
5,2	262	8,3	213	11,4	205	14,5	203
5,3	255	8,4	212	11,5	205	14,6	203
5,4	249	8,5	211	11,6	204	14,7	203
5,5	244	8,6	211	11,7	204	14,8	203
5,6	240	8,7	210	11,8	204	14,9	203
5,7	238	8,8	210	11,9	204	15,0	202
5,8	236	8,9	209	12,0	204		
5,9	235	9,0	234	12,1	204		
6,0	234	9,1	208	12,2	204		

Таблиця 2.3 – Залежність температури самоспалахування одноатомних спиртів від ефективної довжини вуглецевого ланцюга

$l_{\text{сер}}$	$t_{\text{сс}}, ^\circ\text{C}$	$l_{\text{сер}}$	$t_{\text{сс}}, ^\circ\text{C}$	$l_{\text{сер}}$	$t_{\text{сс}}, ^\circ\text{C}$	$l_{\text{сер}}$	$t_{\text{сс}}, ^\circ\text{C}$
2,0	464	4,4	337	6,8	272	9,2	245
2,1	463	4,5	333	6,9	270	9,3	244
2,2	461	4,6	326	7,0	269	9,4	243
2,3	459	4,7	326	7,1	267	9,5	243
2,4	457	4,8	322	7,2	266	9,6	241
2,5	455	4,9	319	7,3	264	9,7	241
2,6	452	5,0	315	7,4	263	9,8	240
2,7	448	5,1	312	7,5	262	9,9	240
2,8	443	5,2	309	7,6	261	10,0	239
2,9	438	5,3	306	7,7	260	10,5	236
3,0	433	5,4	304	7,8	258	11,0	234
3,1	423	5,5	301	7,9	257	11,5	233
3,2	420	5,6	299	8,0	256	12,0	232
3,3	413	5,7	296	8,1	255	12,5	232
3,4	405	5,8	294	8,2	254	13,0	231
3,5	396	5,9	291	8,3	253	13,5	231
3,6	385	6,0	289	8,4	252	14,0	230
3,7	376	6,1	287	8,5	251	14,5	230
3,8	369	6,2	284	8,6	250	15,0	229
3,9	361	6,3	282	8,7	249	15,5	229
4,0	355	6,4	280	8,8	248	16,0	228
4,1	350	6,5	278	8,9	247	16,5	228
4,2	346	6,6	276	9,0	246	17,0	227
4,3	341	6,7	274	9,1	246	17,5	227

Таблиця 2.4 – Залежність температури самоспалахування ароматичних сполук від ефективної довжини вуглецевого ланцюга

$l_{\text{цеп}}$	$t_{\text{ссп}}, ^\circ\text{C}$	$l_{\text{цеп}}$	$t_{\text{ссп}}, ^\circ\text{C}$	$l_{\text{цеп}}$	$t_{\text{ссп}}, ^\circ\text{C}$	$l_{\text{цеп}}$	$t_{\text{ссп}}, ^\circ\text{C}$
-2,0	570	-0,4	557	1,2	437	2,8	425
-1,9	569	-0,3	556	1,3	436	2,9	425
-1,8	568	-0,2	554	1,4	435	3,0	424
-1,7	567	-0,1	551	1,5	434	3,1	424
-1,6	567	0,0	546	1,6	433	3,2	424
-1,5	566	0,1	537	1,7	432	3,3	424
-1,4	565	0,2	521	1,8	431	3,4	423
-1,3	564	0,3	501	1,9	430	3,5	423
-1,2	564	0,4	480	2,0	430	3,6	423
-1,1	563	0,5	460	2,1	429	3,7	423
-1,0	562	0,6	450	2,2	428	3,8	423
-0,9	562	0,7	445	2,3	428	3,9	423
-0,8	561	0,8	442	2,4	427	4,0	422
-0,7	560	0,9	440	2,5	427		
-0,6	559	1,0	439	2,6	426		
-0,5	558	1,1	438	2,7	426		

Таблиця 2.5 – Коефіцієнти для визначення температури самоспалахування окремих класів органічних сполук

Сполуки	a	b	Похибка розрахунку, $^\circ\text{C}$
спирти	0,6796	121,2	28
сполуки з групою – NH_2	0,4722	170,4	19,8
ароматичні сполуки	0,6412	252,9	15
карбонові кислоти	0,7556	86,0	17
естери:			
форміати	0,7719	81,5	19,2
ацетати	0,7909	52,0	15
пропіонати	0,7158	91,3	10

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

Якщо необхідно визначити температуру самоспалахування суміші горючих рідин, то можна використовувати формулу (2.2) або (2.3). 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

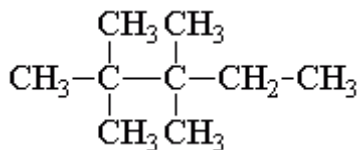
1. Скласти структурну формулу речовини.
2. Пронумерувати ланки у структурній формулі.
3. Визначити число кінцевих груп m у молекулі речовини.
4. Визначити число ланцюгів $n_{\text{ланц}}$ у молекулі горючої речовини за формулою (2.5).
5. Виходячи зі структурної формули молекули, визначити довжину кожного ланцюга ℓ_i .
6. Провести розрахунок умовної середньої довжини ланцюга $\ell_{\text{сер}}$ молекули за формулою (2.4).
7. Визначити стандартну температуру самоспалахування за формулами (2.2) чи (2.3) або за таблицями (табл. 2.2 – для алканів, табл. 2.3 – для спиртів, табл. 2.4 – для ароматичних вуглеводнів).
8. Розрахувати максимальну безпечну температуру нагрівання робочих поверхонь за формулою (2.1).
9. Визначити групу вибухонебезпечних сумішей горючих речовин з повітрям за таблицею 2.1.

Приклад розв'язання задачі

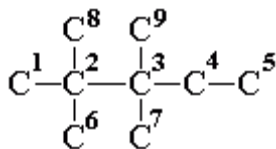
Розрахувати стандартну температуру самоспалахування 2,2,3,3-тетраметилпентану, порівняти розрахункове значення з експериментальним, рівним 430 °С. Визначити безпечну температуру нагрівання поверхонь та групу вибухонебезпечних сумішей пари 2,2,3,3-тетраметил-пентану з повітрям.

Розв'язання

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



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



3. Визначаємо число кінцевих груп m у молекулі 2,2,3,3-тетраметилпентану. Кінцевими групами в даному випадку будуть групи $\text{C}^1, \text{C}^5, \text{C}^6, \text{C}^7, \text{C}^8, \text{C}^9$. Таким чином, число кінцевих груп $m = 6$.

4. Визначаємо число ланцюгів $n_{\text{ланц}}$ у молекулі речовини за формулою (2.5):

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

5. Визначаємо довжину кожного ланцюга ℓ_i . Для зручності складаємо таблицю.

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

6. Розраховуємо умовну середню довжину $\ell_{\text{сер}}$ молекули 2,2,3,3-тетраметилпентану за формулою (2.4):

$$\ell_{\text{сер}} = \frac{3 \cdot 4 + 4 \cdot 8 + 5 \cdot 3}{15} = 3,9.$$

7. Визначаємо стандартну температуру самоспалахування:

а) за формулою (2.2), оскільки $\ell_{\text{сер}} \leq 5$:

$$t_{\text{cc}} = 300 + 116\sqrt{5 - 3,9} = 419,9 \text{ } ^\circ\text{C};$$

б) за таблицею 2.2 для парафінових вуглеводнів: середній умовній довжині карбонового ланцюга $\ell_{\text{сер}} = 3,9$ відповідає температура самоспалахування $t_{\text{cc}} = 420 \text{ }^\circ\text{C}$.

8. Розраховуємо максимальну безпечну температуру нагрівання робочих поверхонь за формулою (2.1):

$$t_{\text{без}} = 0,8 \cdot 419,9 = 335,9 \text{ }^\circ\text{C}.$$

9. Визначаємо групу вибухонебезпечних сумішей 2,2,3,3-тетраметилпентану за таблицею 2.1: оскільки $t_{\text{cc}} = 420 \text{ }^\circ\text{C}$ лежить у межах від 300 до 450 $^\circ\text{C}$, 2,2,3,3-тетраметилпентан відноситься до групи вибухонебезпечних сумішей T2.

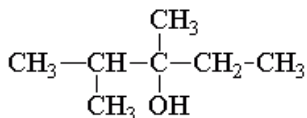
Висновок: розрахункова стандартна температура самоспалахування 2,2,3,3-тетраметилпентану дорівнює 420 $^\circ\text{C}$; відхилення розрахунку від експериментального значення становить 10 $^\circ\text{C}$ або 2,3 %. Температура нагрівання поверхонь технологічного обладнання не повинна перевищувати 260 $^\circ\text{C}$. Пароповітряна суміш 2,2,3,3-тетра-метилпентану відноситься до групи вибухонебезпечних сумішей T2.

Приклад розв'язання задачі

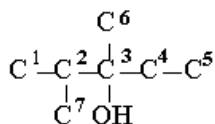
Розрахувати стандартну температуру самоспалахування 2,3-диметил-пентанолу-3 та безпечну температуру нагрівання поверхонь технологічного обладнання, в якому обертається дана речовина.

Розв'язання

1. Складаємо структурну формулу 2,3-диметил-пентанолу-3:



2. Нумеруємо атоми карбону в ланцюгах, не записуючи при цьому атоми гідрогену вуглецевого ланцюга:



3. Визначаємо число кінцевих груп m у молекулі 2,3-диметилпентанолу-3. Кінцевими групами в даному випадку будуть групи C^1 , C^5 , C^6 , C^7 , OH . Таким чином, число кінцевих груп $m = 5$.

4. Визначаємо число ланцюгів $n_{\text{ланц}}$ у молекулі речовини за формулою (2.5):

$$n_{\text{ланц}} = 0,5m(m - 1) = 0,5 \cdot 5 \cdot (5 - 1) = 10.$$

5. Визначаємо довжину кожного ланцюга ℓ_i , враховуючи, що розрахункове число атомів карбону в ланцюзі аліфатичного спирту дорівнює фактичному числу атомів карбону плюс одиниця.

№ ланцюга	Склад ланцюга	Довжина ланцюга ℓ_i
1	1 - 2 - 7	3
2	1 - 2 - 3 - 6	4
3	1 - 2 - 3 - OH	4
4	1 - 2 - 3 - 4 - 5	5
5	7 - 2 - 3 - OH	4
6	7 - 2 - 3 - 6	4
7	7 - 2 - 3 - 4 - 5	5
8	6 - 3 - 4 - 5	4
9	6 - 3 - OH	3
10	OH - 3 - 4 - 5	4

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

$$l_{\text{сер}} = \frac{3 \cdot 2 + 4 \cdot 6 + 5 \cdot 2}{10} = 4,0.$$

7. Визначаємо температуру самоспалахування за таблицею 2.3.

Оскільки умовна середня довжина карбонового ланцюга 2,3-диметилпентанолу-3 становить $l_{\text{сер}} = 4$, температура самоспалахування дорівнює $t_{\text{cc}} = 355 \text{ }^\circ\text{C}$.

8. Розраховуємо максимальну безпечну температуру нагрівання робочих поверхонь:

$$t_{\text{без}} = 0,8 \cdot 355 = 284 \text{ }^\circ\text{C}.$$

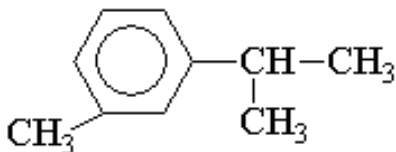
Висновок: розрахункова стандартна температура самоспалахування 2,3-диметилпентанолу-3 дорівнює $355 \text{ }^\circ\text{C}$; безпечна температура нагрівання поверхонь технологічного обладнання не повинна перевищувати $284 \text{ }^\circ\text{C}$.

Приклад розв'язання задачі

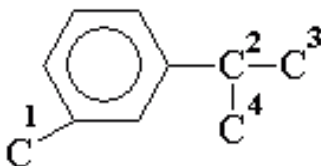
Розрахувати стандартну температуру самоспалахування 3-метил-ізопропілбензолу.

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 у середині ланцюга, вважають одночасно і кінцевою, і проміжною групою). Отже, число кінцевих груп $m = 4$.

4. Визначаємо число ланцюгів $n_{\text{ланц}}$ у молекулі речовини за формулою (2.5):

$$n_{\text{ланц}} = 0,5 \cdot 4 \cdot (4 - 1) = 6.$$

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

№ ланцюга	Склад ланцюга	Довжина ланцюга ℓ_i
1	1 – Ar	0
2	1 – Ar – 2 – 4	2
3	1 – Ar – 2 – 3	2
4	Ar – 2 – 3	1
5	Ar – 2 – 4	1
6	4 – 2 – 3	3

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

$$l_{\text{сер}} = \frac{2 + 2 + 1 + 1 + 3}{6} = 1,5.$$

7. За таблицею 2.4 визначаємо температуру самоспалахування 3-метил-ізопропілбензолу.

Оскільки умовна середня довжина карбонового ланцюга дорівнює $l_{\text{сер}} = 1,5$, температура самоспалахування дорівнює $t_{\text{cc}} = 434$ °С.

Приклад розв'язання задачі

Визначити безпечну максимальну температуру нагрівання робочої поверхні радіаційної сушарки фарбувального цеху, якщо розчинником є 2,4-диметил-3-пентанол.

Розв'язання

Температура самоспалахування 2,4-диметил-3-пентанолу за довідником [7] дорівнює 325 °С. Визначаємо безпечну максимальну температуру нагрівання робочої поверхні радіаційної сушарки за формулою (2.1):

$$t_{\text{без}} = 0,8 \cdot 325 = 260 \text{ °С}.$$

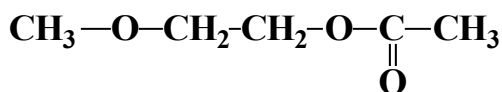
Висновок: температура нагрівання поверхонь радіаційної сушарки фарбувального цеху у разі використання розчинника 2,4-диметил-3-пентанолу не повинна перевищувати 260 °С.

Приклад розв'язання задачі

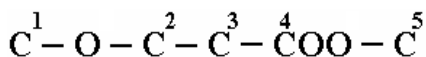
Розрахувати стандартну температуру самоспалахування метоксиетилацетату та безпечну температуру нагрівання поверхонь технологічного обладнання. Порівняти розраховане значення з експериментально визначеною температурою самоспалахування, яка дорівнює 400 °С.

Розв'язання

1. Складаємо структурну формулу метоксиетилацетату:



2. Нумеруємо атоми карбону в ланцюгах, не записуючи при цьому атоми гідрогену вуглецевого ланцюга:



3. Визначаємо число кінцевих груп у молекулі метоксиетилацетату. Як було відмічено раніше, функціональні групи, розташовані всередині ланцюга, вважають одночасно і кінцевими, і проміжними. Тому, в даному випадку, кінцевими будуть групи C^1 , —O— , $\text{—C}^4\text{OO—}$, C^5 , 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 кожного ланцюга ℓ_i , враховуючи число атомів карбону та еквівалентну довжину функціональних груп. Оскільки до складу метоксиетилацетату входять дві функціональні групи,

розрахункова довжина кожної зменшується у два рази. Тому довжина групи –О– приймається рівною 1,75, а групи –СОО– приймається рівною 0,5.

№ ланцюга	Склад ланцюга	Довжина ланцюга l_i
1	1 – 2	2,75
2	1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6	6,25
3	1 – 2 – 3 – 4 – 5	5,25
4	2 – 3 – 4 – 5 – 6	5,25
5	2 – 3 – 4 – 5	4,25
6	5 – 6	1,5

6. Розраховуємо умовну середню довжину $l_{\text{ср}}$ молекули метоксиетилацетату:

$$l_{\text{ср}} = \frac{2,75 + 6,25 + 5,25 \cdot 2 + 4,25 + 1,5}{6} = 4,2.$$

7. Оскільки $l_{\text{ср}} \leq 5$, визначаємо температуру самоспалахування метоксиетилацетату за формулою (2.2):

$$t_{\text{ср}} = 300 + 116\sqrt{5 - 4,2} = 403 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

8. Розраховуємо максимальну безпечну температуру нагрівання робочих поверхонь:

$$t_{\text{без}} = 0,8 \cdot 403 = 322,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Висновок: розрахункова стандартна температура самоспалахування метоксиетилацетату дорівнює 403 °С; відхилення розрахунку від експериментального значення становить 3 °С або 0,8 %. Температура нагрівання поверхонь технологічного обладнання не повинна перевищувати 322,5 °С.

Методика розрахунку стандартної температури самоспалахування суміші горючих речовин

1. Визначити склад горючої суміші та встановити молярні частки кожного компонента суміші за формулою:

$$r_{\mu_i} = \frac{\frac{c_i}{\mu_i}}{\sum_{i=1}^k \frac{c_i}{\mu_i}},$$

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

μ_i – молярна маса i -го компонента горючої суміші, г·моль⁻¹;

k – число компонентів горючої суміші.

2. Скласти структурну формулу кожного компонента горючої суміші та розрахувати їх середню довжину ланцюга $\ell_{\text{сер}_i}$ за формулою (2.4).

3. Розрахувати середню довжину умовної молекули газової суміші $\ell_{\text{сер}_{\text{сум}}}$ за формулою:

$$\ell_{\text{сер}_{\text{сум}}} = \sum_{i=1}^k r_{\mu_i} \ell_{\text{сер}_i}.$$

4. Визначити стандартну температуру самоспалахування горючої суміші за формулами (2.2) чи (2.3) залежно від середньої довжини ланцюга.

5. Розрахувати максимальну безпечну температуру нагрівання робочих поверхонь за формулою (2.1).

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати стандартну температуру самоспалахування розчинника РС–1 та безпечну максимальну температуру нагрівання поверхонь технологічного обладнання. Порівняти розраховане значення з експериментально визначеною температурою самоспалахування, яка дорівнює 490 °С.

Розв'язання

1. Визначаємо склад розчинника РС–1 та молярні маси компонентів суміші за довідником [7]:

№	компонент суміші	формула	c _i , мас. %	μ _i , г·моль ⁻¹
1	бутилацетат	C ₆ H ₁₂ O ₂	30	116
2	толуол	C ₇ H ₈	60	92
3	ксилол	C ₈ H ₁₀	10	106

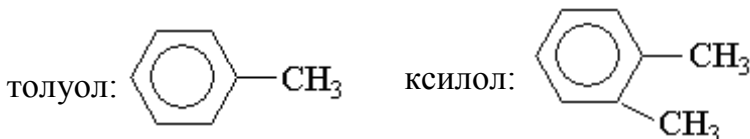
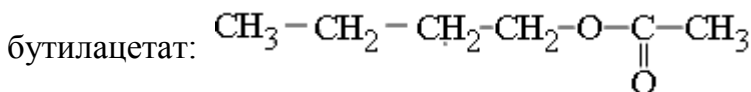
Розраховуємо мольні частки компонентів розчинника РС–1:

$$r_{\mu 1} = \frac{\frac{30}{116}}{\frac{30}{116} + \frac{60}{92} + \frac{10}{106}} = 0,26; \quad r_{\mu 2} = \frac{\frac{60}{92}}{\frac{30}{116} + \frac{60}{92} + \frac{10}{106}} = 0,65;$$

$$r_{\mu 3} = \frac{\frac{10}{106}}{\frac{30}{116} + \frac{60}{92} + \frac{10}{106}} = 0,09.$$

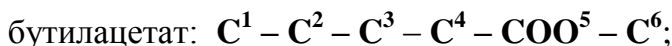
2. Визначаємо середню довжину ланцюга $\ell_{\text{сер}i}$ кожного компонента розчинника РС–1.

2.1. Складаємо структурні формули компонентів суміші:



2.2. Визначаємо число ланцюгів та їх довжину для кожного компонента розчинника РС-1.

Нумеруємо атоми карбону та функціональні групи, що входять до складу молекули:



Бутилацетат має 3 кінцеві групи, враховуючи групу $-\text{COO}-$, довжина якої приймається за 1: C^1 , COO^5 , C^6 . Отже, за формулою (2.5) число ланцюгів у молекулі бутилацетату дорівнює 3.

№ ланцюга бутилацетату	Склад ланцюга	Довжина ланцюга ℓ_i
1	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6	6
2	1 - 2 - 3 - 4 - 5	5
3	5 - 6	2

Толуол та ксилол мають ароматичне кільце, яке вважається одночасно і кінцевою, і проміжною групою і зменшує довжину вуглецевого ланцюга на 1.

Толуол має 2 кінцеві групи – C^1 , Ar , тому число ланцюгів дорівнює 1.

№ ланцюга толуолу	Склад ланцюга	Довжина ланцюга ℓ_i
1	$\text{Ar} - 1$	0

Ксилол має 3 кінцеві групи: C^1 , Ar, C^2 . Отже, число ланцюгів у молекулі ксилолу дорівнює 3. Крім того, ксилол має карбоновий ланцюг в орто - положенні, тому розрахункова довжина ланцюга збільшується на 2.

№ ланцюга ксилолу	Склад ланцюга	Довжина ланцюга ℓ_i
1	1 – Ar	0
2	1 – Ar – 2	4
3	Ar – 2	0

2.3. Розраховуємо умовну середню довжину складових розчинника РС–1:

$$\ell_{\text{сер}1} = \frac{6 + 5 + 2}{3} = 4,33; \quad \ell_{\text{сер}2} = 0;$$

$$\ell_{\text{сер}3} = \frac{0 + 4 + 0}{3} = 1,33.$$

3. Визначаємо середню довжину умовної молекули розчинника РС–1:

$$\ell_{\text{сер}} = 0,26 \cdot 4,33 + 0,65 \cdot 0 + 0,09 \cdot 1,33 = 1,2.$$

4. Оскільки $\ell_{\text{сер}} \leq 5$, визначаємо температуру самоспалахування розчинника РС–1 за формулою (2.2):

$$t_{\text{cc}} = 300 + 116\sqrt{5 - \ell_{\text{сер}}} = 300 + 116\sqrt{5 - 1,2} = 526 \text{ }^\circ\text{C}.$$

5. Розраховуємо максимальну безпечну температуру нагрівання робочих поверхонь:

$$t_{\text{без}} = 0,8 \cdot 526 = 420,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Висновок: розрахункова стандартна температура самоспалахування розчинника РС–1 дорівнює $526 \text{ } ^\circ\text{C}$; відхилення розрахунку від експериментального значення становить $36 \text{ } ^\circ\text{C}$ або $7,3 \%$. Температура нагрівання поверхонь технологічного обладнання не повинна перевищувати $420,8 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Методика розрахунку стандартної температури самоспалахування за константами гомологічного ряду

1. Записати структурну формулу речовини та визначити, до якого гомологічного класу відноситься дана хімічна сполука.

2. Розрахувати температуру самоспалахування вуглеводневого радикала, що входить до складу речовини даного гомологічного ряду.

Наприклад: пропілацетат $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_2$ (пропіловий ефір оцтової кислоти) відноситься до складних ефірів – *ацетатів*, а вуглеводним радикалом для нього буде *пропан*.

3. Визначити коефіцієнти a і b рівняння (2.6) за таблицею 2.5.

4. Розрахувати температуру самоспалахування хімічної сполуки за рівнянням (2.6).

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати стандартну температуру самоспалахування 2-метилбутилацетату та безпечну температуру нагрівання поверхонь технологічного обладнання. Порівняти розраховане значення з експериментально визначеною температурою самоспалахування, яка дорівнює $390 \text{ } ^\circ\text{C}$.

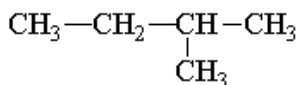
Розв'язання

1. 2-метилбутилацетат відноситься до складних ефірів оцтової кислоти, його структурну формулу можна представити у вигляді:

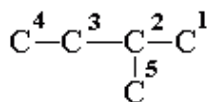


2. Проводимо розрахунок температури самоспалахування вуглеводневого радикала.

2.1. Вуглеводневим радикалом буде 2-метилбутан зі структурною формулою:



2.2. Нумеруємо атоми карбону в ланцюгах:



2.3. Визначаємо число кінцевих груп m у молекулі 2-метилбутану. Кінцевими групами будуть групи C^1 , C^4 , C^5 . Таким чином, число кінцевих груп $m = 3$.

2.4. Визначаємо число ланцюгів $n_{\text{ланц}}$ в молекулі радикала:

$$n_{\text{ланц}} = 0,5 \cdot 3 \cdot (3 - 1) = 3.$$

2.5. Визначаємо довжину кожного ланцюга l_i :

№ ланцюга	Склад ланцюга	Довжина ланцюга l_i
1	1-2-3-4	4
2	1-2-3-5	4
3	5-3-4	3

2.6. Розраховуємо умовну середню довжину $l_{\text{сер}}$ радикала:

$$l_{\text{сер}} = \frac{4 \cdot 2 + 3}{3} = 3,7.$$

2.7. Розраховуємо температуру самоспалахування алкільного радикала за формулою (2.2), оскільки $l_{\text{сер}} < 5$:

$$t_{\text{cc}} = 300 + 116\sqrt{5 - 3,7} = 432 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

3. Визначаємо константи a і b із таблиці 2.5 для гомологічного ряду ацетатів: $a = 0,7909$, $b = 52,0$.

4. Розраховуємо температуру самоспалахування 2-метилбутилацетату за формулою (2.6):

$$t_{\text{cc}} = at_{\text{cc}}^{\text{алк}} + b = 0,7909 \cdot 432 + 52,0 = 393,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

5. Розраховуємо максимальну безпечну температуру нагрівання робочих поверхонь за формулою (2.2):

$$t_{\text{роб}_{\text{без}}} \leq 0,8 \cdot 393,8 = 315 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Висновок: розрахункове значення стандартної температури самоспалахування 2-метилбутилацетату становить $393,8 \text{ } ^\circ\text{C}$, що відрізняється від експериментально визначеної температури самоспалахування на $3,8 \text{ } ^\circ\text{C}$, тобто похибка розрахунку становить менше 1 %. Температура

нагрівання поверхонь технологічного обладнання, в якому обертається ця речовина, не повинна перевищувати 315 °С.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Для наведених у таблиці речовин розрахувати:

а) стандартну температуру самоспалахування за середньою довжиною ланцюга;

б) групу вибухонебезпечних сумішей і безпечну температуру нагрівання робочої поверхні обладнання $t_{p.без}$.

№	Назва речовини	Хімічна формула
1.	2,2-диметилпропан	C_5H_{12}
2.	2-метилбутан	C_5H_{12}
3.	2,2,4-триметилпентан	C_8H_{18}
4.	2,2,3,6-тетраметилгептан	$C_{11}H_{24}$
5.	2,5-диметил-5-етил-3-пропілгептан	$C_{14}H_{30}$
6.	2-метилпропен-1	C_4H_8
7.	2,4,4,-триметилпентен-1	C_8H_{16}
8.	бутанол	$C_4H_{10}O$
9.	гексанол	$C_6H_{14}O$
10.	2-метилбутанол-3	$C_5H_{12}O$
11.	2-амінобутан	$C_4H_{11}N$
12.	етилбензол	C_8H_{10}
13.	ізопропілбензол	C_9H_{12}
14.	<i>n</i> -діетилбензол	$C_{10}H_{14}$
15.	<i>m</i> -ксилол	C_8H_{10}
16.	циклогексан	C_6H_{12}
17.	етилциклогексан	C_8H_{16}
18.	ізоамілциклогексан	$C_{11}H_{22}$
19.	1,1-дифенілбутан	$C_{16}H_{18}$
20.	2-етилгексанол	$C_8H_{18}O$

2. Для наведених у таблиці речовин розрахувати стандартну температуру самоспалахування за константами гомологічного ряду.

№	Назва речовини	Хімічна формула
1.	амілформіат	$C_6H_{12}O_2$
2.	бутилформіат	$C_5H_{10}O_2$
3.	пропілформіат	$C_4H_8O_2$
4.	бутилпропіонат	$C_7H_{14}O_2$
5.	етилпропіонат	$C_5H_{10}O_2$
6.	метилпропіонат	$C_4H_8O_2$
7.	метилацетат	$C_3H_6O_2$
8.	етилацетат	$C_4H_8O_2$
9.	2-етилбутилацетат	$C_8H_{16}O_2$
10.	додеканова кислота	$C_{12}H_{24}O_2$
11.	диметилпропіонова кислота	$C_5H_{10}O_2$
12.	гексанова кислота	$C_6H_{12}O_2$
13.	ізооктанова кислота	$C_8H_{16}O_2$
14.	бензилбензоат	$C_{14}H_{12}O_2$
15.	метилбензоат	$C_8H_8O_2$
16.	етилбензоат	$C_9H_{10}O_2$
17.	лауриновий спирт	$C_{12}H_{26}O$
18.	гексанол-3	$C_6H_{14}O$
19.	бутанол-2	$C_4H_{10}O$
20.	2-метилбутанол-3	$C_5H_{12}O$
21.	етиламін	C_2H_7N
22.	2-амінобутан	$C_4H_{11}N$
23.	діетилетаноламін	$C_6H_{15}ON$
24.	ізобутиламін	$C_4H_{11}N$
25.	2-етилгексиламін	$C_8H_{19}N$

3. Для наведених у таблиці речовин визначити:

а) яку найвищу безпечну температуру можуть мати робочі поверхні технологічного обладнання, якщо в технологічному процесі використовують зазначені рідини;

б) можливість використання у технологічному процесі вказаних рідин, якщо технологічне обладнання має задану температуру поверхні.

№	Назва речовини	Хімічна формула	Температура поверхні, °С
1.	2,2-диметилпропан	C_5H_{12}	150
2.	2-метилбутан	C_5H_{12}	175
3.	2,2,4,-триметилпентан	C_8H_{18}	200
4.	2,2,3,6-тетраметилгептан	$C_{11}H_{24}$	225
5.	2-метилпропен-1	C_4H_8	250
6.	2,4,4,-триметилпентен-1	C_8H_{16}	275
7.	2,4-диметил-3-етилпентан	C_9H_{20}	300
8.	2,4-диметил-3-пентанол	$C_7H_{16}O$	325
9.	дитолілметан	$C_{15}H_{16}$	350
10.	1,3-дифенілбензол	$C_{18}H_{14}$	375
11.	1,1-дифенілбутан	$C_{16}H_{18}$	400
12.	3,3-дифенілбутен-1	$C_{16}H_{16}$	425
13.	<i>o</i> -діетилбензол	$C_{10}H_{14}$	450
14.	2-метилпропанол-1	$C_4H_{10}O$	475
15.	ізобутилбензол	$C_{10}H_{14}$	500
16.	2-метилпентан	C_6H_{14}	525
17.	2,2,3,3-тетраметилпентан	C_9H_{20}	550
18.	2,2,3,4-тетраметилпентан	C_9H_{20}	150
19.	3-метилоктан	C_9H_{20}	175
20.	4,4-диметилгептан	C_9H_{20}	200
21.	2-метилнонан	$C_{10}H_{22}$	225
22.	бутанол	$C_4H_{10}O$	250
23.	гексанол	$C_6H_{14}O$	275
24.	2-метилбутанол-3	$C_5H_{12}O$	300
25.	пропілформіат	$C_4H_8O_2$	325

Глава 1. Самоспалахування горючих сумішей

№	Назва речовини	Хімічна формула	Температура поверхні, °С
26.	амілформиат	$C_6H_{12}O_2$	350
27.	бутилпропіонат	$C_7H_{14}O_2$	375
28.	гексанова кислота	$C_6H_{12}O_2$	400
29.	2-амінобутан	$C_4H_{11}N$	425
30.	етилбензол	C_8H_{10}	450
31.	ізопропілбензол	C_9H_{12}	475
32.	<i>n</i> -діетилбензол	$C_{10}H_{14}$	500
33.	бензилбензоат	$C_{14}H_{12}O_2$	525
34.	<i>n</i> -ксилол	C_8H_{10}	550
35.	<i>o</i> -ксилол	C_8H_{10}	225
36.	циклогексан	C_6H_{12}	250
37.	етилциклогексан	C_8H_{16}	275
38.	ізобутилциклогексан	$C_{10}H_{20}$	300
39.	ізоамілциклогексан	$C_{11}H_{22}$	325
40.	етилбензоат	$C_9H_{10}O_2$	350

4. Не виконуючи розрахунків, розташувати в ряд за ступенем зростання здатності до самоспалахування такі речовини (врахувати вплив будови речовини на температуру самоспалахування):

- а) циклогексан, гексан, бензол;
- б) пропен, пропан, метилацетилен;
- в) пентан, циклопентан, ізопентан;
- г) етан, ацетилен, етилен;
- д) бутан, етан, гексан, пропан;
- е) циклогептан, 2,2,3-триметилбутан, гептан.

5. Розрахувати безпечну температуру нагрівання робочої поверхні обладнання, в якому обертається суміш речовин заданого складу.

№	Горюча речовина	
	назва	вміст
1.	метилацетат $C_3H_6O_2$	20 % мас.
	циклогексан C_6H_{12}	80 % мас.
2.	бутанова кислота $C_4H_8O_2$	25 % об.
	октаналь $C_8H_{16}O$	75 % об.
3.	бензол C_6H_6	30 % мас.
	кумол C_9H_{12}	70 % мас.
4.	пропанол C_3H_8O	40 % об.
	толуол C_7H_8	60 % об.
5.	метилбутилкетон $C_6H_{12}O$	25 % об.
	аміловий спирт $C_5H_{12}O$	75 % об.
6.	бензиловий спирт C_7H_8O	20 % мас.
	ацетон C_3H_6O	30 % мас.
	етилбензол C_8H_{10}	50 % мас.
7.	<i>n</i> -метилфенол C_7H_9O	30 % об.
	ізопропілбензол C_9H_{12}	40 % об.
	бутилформіат $C_5H_{10}O_2$	30 % об.
8.	пропаналь C_3H_6O	40 % об.
	декан $C_{10}H_{22}$	50 % об.
	діоксан $C_4H_8O_2$	10 % об.
9.	оцтова кислота $C_2H_4O_2$	5 % мас.
	діетилкетон $C_5H_{10}O$	10 % мас.
	дібутилкетон $C_9H_{18}O$	85 % мас.
10.	метилпропілкетон $C_5H_{10}O$	15 % об.
	анілін C_6H_7N	30 % об.
	бутанон C_4H_8O	55 % об.

ГЛАВА 2. САМОЗАЙМАННЯ РЕЧОВИН І МАТЕРІАЛІВ

Всі горючі речовини при контакті з повітрям за певних температур починають окиснюватися. Цей процес супроводжується виділенням тепла і може призвести до самонагрівання системи, яке за умови досягнення критичної температури призведе до виникнення горіння [3], [8], [14], [25].

Самонагрівання – це підвищення температури системи за рахунок перевищення швидкості тепловиділення в системі внаслідок протікання екзотермічних процесів над швидкістю тепловіддачі від системи в навколишнє середовище.

Найменша температура горючої системи, за якої виникає самонагрівання речовини, називається **температурою самонагрівання**.

Температура самонагрівання деяких горючих речовин може бути нижчою, ніж кімнатна температура. Хімічні реакції з енергією активації менше $42 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ протікають за кімнатної температури дуже швидко й закінчуються виникненням горіння. Зазвичай процес самонагрівання протікає за температури навколишнього середовища не менше $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (за більш низьких температур різко зростає інтенсивність тепловіддачі). Речовини з температурою самонагрівання нижче $50 \text{ }^\circ\text{C}$ називають **пірофорними речовинами**.

Процес виникнення горіння за рахунок самонагрівання системи внаслідок накопичення тепла всередині самої системи під впливом внутрішніх екзотермічних процесів за сприятливих умов і відсутності джерела запалювання називають **самозайманням**.

Залежно від причин, що викликають процес первинного самонагрівання речовини, розрізняють чотири види самозаймання: фізичне, хімічне, мікробіологічне та теплове.

Фізичним називається самозаймання, викликане самонагріванням матеріалу внаслідок тепловиділення фізичних процесів.

Характерними фізичними процесами, що призводять до самозаймання, є процес тертя та адсорбції. Адсорбція – поглинання та утримання парів та газів на поверхні твердої речовини за рахунок міжмолекулярної взаємодії.

До фізичного самозаймання схильні лише тверді горючі матеріали з розвиненою поверхнею, серед яких найбільш характерним є вугілля.

Хімічним називається самозаймання, яке виникає внаслідок взаємодії речовин, що реагують з виділенням тепла.

Мікробіологічне самозаймання – виникнення горіння внаслідок саморозігріву рослинних продуктів під впливом тепловиділення під час життєдіяльності рослинних клітин і мікроорганізмів.

Теплове самозаймання – виникнення горіння внаслідок самонагрівання, що зумовлено тривалим впливом зовнішнього нагрівання речовини вище за температуру самонагрівання. Різка підвищення швидкості екзотермічних реакцій в об'ємі речовини пов'язане, в основному, зі зростанням температури в зоні реакцій під впливом теплового імпульсу.

Не слід вважати, що вказані види самозаймання можуть відбуватися ізольовано один від одного, тобто у «чистому» вигляді. У більшості випадків вид

самозаймання виділяється з урахуванням тільки *першопричини протікання екзотермічного процесу*, а на якомусь його етапі даний процес закінчується і «передає естафету» іншому екзотермічному процесу.

Процес самозаймання можна розділити на два основні етапи: самонагрівання та, власне, виникнення горіння. Перший етап характеризується порівняно плавною зміною параметрів системи (температури, складу газового середовища та ін.) і протікає протягом значного проміжку часу. Початку ж другого етапу властивий високий динамізм фізичних та хімічних процесів і стрімка зміна параметрів.

Оскільки підведення тепла до системи ззовні відсутнє, умови виділення й віддачі тепла при самозайманні мають визначальне значення. Зростання температури у процесі самонагрівання зумовлене накопиченням тепла в умовах, що сприяють добрій теплоізоляції матеріалу.

На швидкість протікання процесу самонагрівання, а отже, і на схильність матеріалу до самозаймання, найбільше будуть впливати такі чинники, як:

- тепловий ефект екзотермічних процесів ($Q \uparrow - t_{\text{сн}} \downarrow$);
- концентрація кисню в окиснювальному середовищі ($\varphi_{\text{O}_2} \uparrow - t_{\text{сн}} \downarrow$);
- величина поверхні окиснення, тобто ступінь подрібнення або пористість матеріалу, нерівномірність його укладання в об'ємі ($S_{\text{ок}} \uparrow - t_{\text{сн}} \downarrow$);
- швидкість надходження окисника в товщу матеріалу ($V_{\text{пов}} \uparrow$ (додатковий доступ кисню) – $t_{\text{сн}} \downarrow$; $V_{\text{пов}} \uparrow \uparrow$ (додаткове охолодження надлишком повітря) – $t_{\text{сн}} \uparrow$);

- теплофізичні характеристики матеріалу: густина, теплоємність, теплопровідність ($\rho, c_p, \lambda \uparrow - t_{сн} \uparrow$);
- коефіцієнт конвекційної тепловіддачі ($\alpha \uparrow - t_{сн} \uparrow$);
- початкова температура середовища ($t_{поч} \uparrow - t_{сн} \downarrow$);
- питома поверхня тепловіддачі, тобто відношення площі тепловіддачі до об'єму системи ($S_{пит} \uparrow - t_{сн} \uparrow$).

Період індукції при самозайманні змінюється в дуже широких межах і може тривати протягом кількох тижнів і навіть місяців.

§ 1. Хімічне самозаймання

Залежно від характеру окисника, який вступає в реакцію з горючим матеріалом, хімічне самозаймання буває трьох видів [3]:

- самозаймання при контакті з киснем повітря;
- самозаймання при контакті з водою;
- самозаймання при контакті з хімічним окисником.

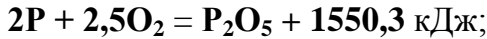
У всіх вказаних випадках тепло, що виділяється під час реакції, може нагріти горючі речовини, які виділяються внаслідок реакції або знаходяться у контакті, до критичної температури самоспалахування або тління.

До хімічного самозаймання при *контакті з киснем повітря* здатні:

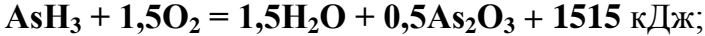
1) лужні, лужноземельні метали, алюміній (рубідій та цезій самозаймаються в кусковому вигляді, інші – лише у вигляді порошоків):



2) білий та жовтий фосфор:



3) гідриди неметалів: SiH_4 , PH_3 , AsH_3 :



4) пірофорне сірчисте залізо: сульфіди FeS , FeS_2 , Fe_2S_3 :



5) металоорганічні сполуки, наприклад, етилат натрію $\text{C}_2\text{H}_5\text{ONa}$, діетилалюмінійхлорид $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{AlCl}$, триетилалюміній $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{Al}$, діетилцинк $\text{Zn}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$;

6) деякі жири та олії рослинного походження, а також просочені ними горючі матеріали.

Жири та олії рослинного походження являють собою суміш гліцеридів – складних ефірів трьохатомного спирту гліцерину з високомолекулярними ненасиченими або насиченими (жирними) карбоновими кислотами. Молекули дигліцеридів мають загальну формулу $\text{C}_3\text{H}_5\text{OH}(\text{COOR})_2$, тригліцеридів – $\text{C}_3\text{H}_5(\text{COOR})_3$, де R – вуглеводневий радикал карбонової кислоти, який має нерозгалужений ланцюг атомів карбону. Радикал карбонової кислоти може бути насиченим або ненасиченим (найчастіше у складі олій зустрічаються подвійні зв'язки між атомами карбону).

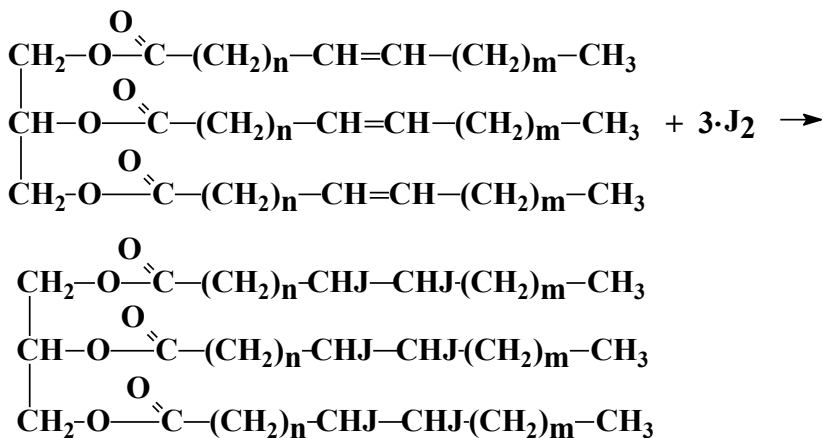
Самонагрівання з подальшим самозайманням олії та просоченого олією горючого матеріалу відбувається за рахунок тепловиділення реакцій окиснення та

полімеризації, що протікають по місцях подвійних зв'язків у ланцюзі карбонової кислоти, за наявності умов для акумуляції тепла.

Насичені карбонові кислоти із загальною формулою $C_nH_{(2n+1)}COOH$ (наприклад, пальмітинова кислота $C_{15}H_{31}COOH$) мають низьку хімічну активність і за низьких температур не полімеризуються й не окиснюються. Ненасичені карбонові кислоти олеїнового ряду містять один подвійний зв'язок і мають загальну формулу $C_nH_{(2n-1)}COOH$, наприклад, деценова кислота $C_9H_{17}COOH$. Збільшення кількості ненасичених зв'язків у гліцериді збільшує схильність олії до самозаймання.

Визначити кількість подвійних зв'язків можна за допомогою *йодометричного методу*. Даний метод ґрунтується на здатності галогенів (йоду) приєднуватись до органічних сполук у місцях подвійних зв'язків.

Реакцію приєднання йоду до подвійного зв'язку радикала карбонової кислоти у складі гліцериду можна представити наступною схемою:



За кількістю йоду, який вступив у реакцію приєднання, можна судити про наявність ненасичених зв'язків та про схильність жиру або олії, до складу яких вони входять, до самозаймання. Чим більше йоду прореагує з даною масою досліджуваної речовини, тим вище її ненасиченість, а отже, і схильність до самозаймання. Критерієм такої оцінки служить *йодне число* (J_q), яке позначає, скільки грамів йоду приєднається за умов дослідження (або за розрахунком) до 100 грамів олії. Йодне число деяких олій наведено в табл. 2.6.

Якщо $J_q < 50$, олія не схильна до самозаймання, а якщо $J_q > 50$ – схильна.

Експериментально йодне число визначається за методиками Гюбля, Вейса, Виноградова та інших дослідників. Якщо відомий якісний та кількісний склад олії, йодне число можна визначити за розрахунком.

Дуже небезпечним у практичній діяльності підрозділів цивільного захисту є хімічне самозаймання при *контакті з водою*.

Реакції деяких речовин із водою або вологою повітря протікають із виділенням значної кількості теплоти, під дією якої горючі продукти реакції і вихідні речовини займаються, а негорючі матеріали нагріваються до високої температури і можуть викликати займання горючих речовин, які знаходяться поблизу зони реакції.

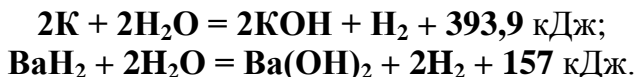
Залежно від складу вихідних речовин при реакції з водою утворюються різні газоподібні продукти реакції: водень, ацетилен, метан, етан та інші гази. Саме ці гази спочатку будуть спалахувати під впливом теплоти хімічної реакції.

Таблиця 2.6 – Йодне число деяких олій та жирів

Олія	Йодне число	Олія	Йодне число
скипидарна	300	оливкова	84÷90
перилова	190÷206	пальмова	10÷84
ляяна	170÷200	какао	32÷36
тунгова	154÷176	пальмоядрова	12÷20
конопельна	145÷167	кокосова	7÷10
ойтисикова	140÷160	Жири	
сафлорова	130÷155	сардиновий	170÷190
горіхова	131÷143	трісковий	160÷180
макова	132÷157	моржевий	160
рижійна	132÷155	дельфіній	130÷140
рапсова	128÷132	тюленьчий	122÷162
соняшникова	127÷136	оселедцевий	115÷146
соєва	114÷139	китовий	102÷144
кукурудзяна	111÷133	солемас техн.	70÷80
бавовняна	100÷120	кашалотовий	62–123
кунжутна	110	свинячий	46÷66
гірчична	96÷107	кістковий	39÷50
мигдальна	92÷105	яловичий	32÷47
арахісова	92	баранячий	31÷46
кастоорова	84÷90	вершковий	25÷47

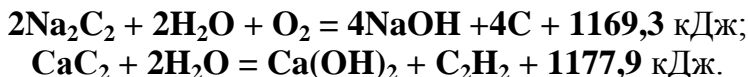
До речовин, які самозаймаються при контакті з водою, можна віднести лужні метали, гідриди металів (NaN ; KN ; CaH_2), оксиди й пероксиди металів (CaO , Na_2O_2), карбіди металів (CaC_2 , K_2C_2), фосфіди та силіциди різних металів, деякі металоорганічні сполуки.

Реакція лужних металів, гідридів лужних і лужноземельних металів із водою та з вологою повітря супроводжується виділенням водню і значної кількості тепла:



Від теплоти реакції самоспалахує водень і самозаймаються метал або гідрид металу.

Взаємодія карбідів лужних та лужноземельних металів із водою протікає дуже бурхливо й може закінчуватися вибухом. При цьому метали згоряють повністю, а карбон виділяється у вільному стані або у вигляді ацетилену:

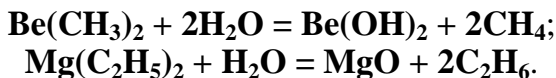


При взаємодії карбідів металів зі стехіометричною кількістю води виділяється стільки тепла, що система розігрівається до 920 °С (карбід кальцію) і ацетилен, що утворюється в ході реакції, самоспалахує.

Силіциди різних металів при дії води виділяють гідрид силіцію (силан), який самоспалахує на повітрі:

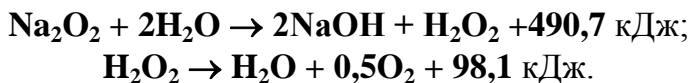


Деякі металоорганічні сполуки реагують із водою, утворюючи горючі гази. Наприклад, диметилберилій при взаємодії з водою виділяє метан, а діетилмагній – етан:



Теплота, що виділяється при цьому, призводить до займання газу, що утворюється, і вихідної речовини.

Деякі речовини при взаємодії із водою не утворюють горючих продуктів, але теплота, що виділяється під час реакції, розігріває ці речовини до високих температур, що сприяє виникненню горіння інших горючих матеріалів, які знаходяться поблизу зони реакції. До таких речовин відносяться оксиди й пероксиди металів, хлорид алюмінію, сірчана кислота, хлорсульфонова кислота та ін. Так, оксид кальцію (негашене вапно), реагуючи з невеликою кількістю води, розігрівається до світіння й може підпалити розташовані поблизу нього горючі матеріали. При взаємодії перекису натрію з водою утворюється перекис водню, здатний до самовільного розкладання з утворенням води й кисню також із виділенням теплоти:



При *контакті з хімічними окисниками* самозаймається більшість горючих матеріалів органічного походження. Можливість самозаймання при цьому більшою мірою залежить від властивостей окисника. Залежно від агрегатного стану окисника самозаймання при контакті з хімічними окисниками поділяють на три підкласи:

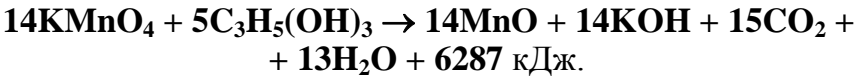
- при контакті з газоподібними окисниками;
- при контакті з рідкими окисниками;
- при контакті із твердими окисниками.

До найбільш поширених газів-окисників відносяться фтор, хлор, кисень, озон. Вони активно сполучаються з рядом речовин, причому реакція супроводжується виділенням великої кількості тепла,

внаслідок чого речовини самозаймаються.

До основних рідких окисників відносять пероксид водню, пероксиди лужних і лужноземельних металів, кисневмісні кислоти.

До твердих окисників відносяться оксиди металів із високим ступенем окиснення (оксид хрому CrO_3 , оксид марганцю Mn_2O_7), солі кисневмісних кислот із високим ступенем окиснення (хромат та дихромат калію, перманганат калію, хлорат та перхлорат калію, азотнокисле срібло, персульфат амонію $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$; аміачна та калієва селітра) та деякі інші речовини, що застосовуються як добрива й отрутохімікати в сільському господарстві. Наприклад, при контакті такого сильного окисника як перманганат калію з багатоатомними спиртами (етиленгліколь, гліцерин і т.п.) відбувається самозаймання буквально через декілька секунд після їхнього змішування:



Тверді горючі матеріали (папір, текстиль, тирса, бавовна та ін.) при контакті з подібними окисниками нагріваються до температури тління й самозаймаються.

Методика розрахункового визначення схильності до самозаймання жирів і олій

1. Установити тип гліцеридів карбонових кислот у складі олії або жиру за таблицями 5, 6 додатків.

2. Розрахувати молярну масу кожного гліцериду у складі олії μ_i .

3. Визначити ступінь ненасиченості (число подвійних зв'язків) карбонової кислоти кожного

гліцериду у складі олії або жиру.

3.1. Визначити вуглеводневий радикал карбонової кислоти у складі гліцериду $R = C_nH_m$, де n – число атомів карбону у складі вуглеводневого радикала; m – число атомів гідрогену у складі вуглеводневого радикала.

3.2. Визначити нестачу атомів гідрогену “ x ” для насиченого стану радикала карбонової кислоти кожного гліцериду, враховуючи, що число атомів гідрогену в насиченому радикалі карбонової кислоти визначається числом атомів карбону n і дорівнює $(2n + 1)$. Тоді нестачу гідрогену “ x ” можна розрахувати як:

$$m = 2n + 1 - x; \quad x = 2n + 1 - m. \quad (2.7)$$

Насичені кислоти мають $x = 0$.

3.3. Визначити число ненасичених зв'язків у радикалі карбонової кислоти кожного гліцериду z . Оскільки за місцем подвійного зв'язку можливе приєднання двох атомів гідрогену, число подвійних зв'язків буде удвічі меншим:

$$z = \frac{x}{2}. \quad (2.8)$$

4. Визначити число ненасичених зв'язків у складі кожного гліцериду:

$$Z = kz, \quad (2.9)$$

де z – число ненасичених зв'язків у радикалі карбонової кислоти даного гліцериду;

k – число радикалів карбонової кислоти даного

типу у складі гліцериду.

5. Визначити еквівалентну масу йоду в реакції приєднання до кожного гліцериду із пропорції:

$$100 \text{ г гліцериду} - J_{\text{ч}_i} \text{ г йоду}, \\ \mu_i, \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1} - Z_i \cdot 254 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1},$$

$$J_{\text{ч}_i} = \frac{254 \cdot Z_i \cdot 100}{\mu_i}, \quad (2.10)$$

де 254 – молярна маса йоду, $\text{г} \cdot \text{моль}^{-1}$.

6. Якщо олія складається з декількох гліцеридів, йодне число олії визначається як сума добутків йодних чисел кожного компонента на їх масову частку в суміші:

$$J_{\text{ч}} = \sum J_{\text{ч}_i} \frac{\varphi_i}{100}, \quad (2.11)$$

де φ_i – концентрація гліцериду у складі олії.

7. За визначеним йодним числом олії, шляхом порівняння із критичним йодним числом $J_{\text{ч(кр)}} = 50$, зробити висновок щодо схильності олії даного складу до самозаймання.

Приклад розв'язання задачі

Визначити розрахунком схильність до самозаймання рослинної олії такого складу: тригліцериди ерукової кислоти – 54 %, олеїнової кислоти – 16 %, лінольової кислоти – 16 %, ліноленової кислоти – 10 %, пальмітинової кислоти – 4 %.

Розв'язання

1. Дана рослинна олія у своєму складі має п'ять компонентів, хімічний склад яких визначаємо за таблицею 6 додатків:

№	тригліцерид	формула	вміст
1	ерукової кислоти	$C_3H_5(COOC_{21}H_{41})_3$	54 %
2	олеїнової кислоти	$C_3H_5(COOC_{17}H_{33})_3$	16 %
3	лінолевої кислоти	$C_3H_5(COOC_{17}H_{31})_3$	16 %
4	ліноленової кислоти	$C_3H_5(COOC_{17}H_{29})_3$	10 %
5	пальмітинової кислоти	$C_3H_5(COOC_{15}H_{31})_3$	4 %

2. Розраховуємо молярну масу тригліцеридів карбонових кислот за кількістю атомів даного типу:



$$\mu_1 = 12 \cdot 3 + 5 \cdot 1 + (12 + 16 \cdot 2 + 12 \cdot 21 + 41 \cdot 1) \cdot 3 = 1052 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1};$$



$$\mu_2 = 12 \cdot 3 + 5 \cdot 1 + (12 + 16 \cdot 2 + 12 \cdot 17 + 33 \cdot 1) \cdot 3 = 884 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1};$$



$$\mu_3 = 12 \cdot 3 + 5 \cdot 1 + (12 + 16 \cdot 2 + 12 \cdot 17 + 31 \cdot 1) \cdot 3 = 878 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1};$$



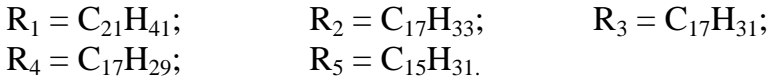
$$\mu_{4,1} = 12 \cdot 3 + 5 \cdot 1 + (12 + 16 \cdot 2 + 12 \cdot 17 + 29 \cdot 1) \cdot 3 = 872 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1};$$



$$\mu_{5,1} = 12 \cdot 3 + 5 \cdot 1 + (12 + 16 \cdot 2 + 12 \cdot 15 + 31 \cdot 1) \cdot 3 = 816 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. Визначаємо ступінь ненасиченості карбонової кислоти у складі кожного гліцериду.

3.1. Визначаємо вуглеводневий радикал карбонової кислоти $R_i = C_nH_m$ у складі кожного гліцериду:



3.2. Визначаємо нестачу атомів гідрогену до насиченого стану в радикалі карбонової кислоти за формулою (2.7):

$$\begin{array}{ll} C_{21}H_{41}: & x_1 = 2 \cdot 21 + 1 - 41 = 2; \\ C_{17}H_{33}: & x_2 = 2 \cdot 17 + 1 - 33 = 2; \\ C_{17}H_{31}: & x_3 = 2 \cdot 17 + 1 - 31 = 4; \\ C_{17}H_{29}: & x_4 = 2 \cdot 17 + 1 - 29 = 6; \\ C_{15}H_{31}: & x_5 = 2 \cdot 15 + 1 - 31 = 0. \end{array}$$

3.3. Визначаємо число ненасичених зв'язків у радикалі карбонової кислоти гліцериду за формулою (2.8):

$$z_1 = \frac{2}{2} = 1; \quad z_2 = \frac{2}{2} = 1; \quad z_3 = \frac{4}{2} = 2;$$

$$z_4 = \frac{6}{2} = 3; \quad z_5 = \frac{0}{2} = 0.$$

4. Визначаємо число ненасичених зв'язків у гліцериді за формулою (2.9).

Через те що тригліцериди містять 3 радикали карбонової кислоти, $k = 3$, отже:

$$\begin{aligned} Z_1 &= 3 \cdot 1 = 3; & Z_2 &= 3 \cdot 1 = 3; & Z_3 &= 3 \cdot 2 = 6; \\ Z_4 &= 3 \cdot 3 = 9; & Z_5 &= 3 \cdot 0 = 0. \end{aligned}$$

5. Визначаємо масу йоду в реакції приєднання до тригліцериду за формулою (2.10):

$$\begin{aligned} J_{\text{ч1}} &= \frac{254 \cdot 3 \cdot 100}{1052} = 72,4 \text{ г}; & J_{\text{ч2}} &= \frac{254 \cdot 3 \cdot 100}{884} = 86,2 \text{ г}; \\ J_{\text{ч3}} &= \frac{254 \cdot 6 \cdot 100}{878} = 173,1 \text{ г}; & J_{\text{ч4}} &= \frac{254 \cdot 9 \cdot 100}{872} = 262,2 \text{ г}. \end{aligned}$$

Через те що тригліцерид пальмітинової кислоти не містить подвійних зв'язків і не здатен до окиснення, він не вступає в реакцію приєднання йоду, отже, $J_{\text{ч5}} = 0$.

6. Розраховуємо йодне число рапсової олії за формулою (2.11):

$$J_{\text{ч}} = 72,4 \frac{54}{100} + 86,2 \frac{16}{100} + 173,1 \frac{16}{100} + 262,2 \frac{10}{100} = 106,9 \text{ г}.$$

Висновок: йодне число олії більше 50 г, отже, дана олія схильна до самозаймання.

Приклад розв'язання задачі

Визначити здатність до самозаймання жиру наступного складу: дигліцерид лінолевої кислоти – 40 %, динасичений – мононенасичений тригліцерид лінолевої і стеаринової кислоти – 60 %.

Розв'язання

1. Виходячи із загальної формули гліцеридів та хімічного складу кислот (табл. 6 додатків), визначаємо:

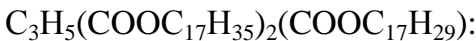
а) структуру молекули дигліцериду лінолевої кислоти: загальна формула дигліцериду – $C_3H_5OH(COOR)_2$, лінолева кислота – одноосновна карбонова кислота з двома ізольованими подвійними зв'язками $C_{17}H_{31}COOH$, отже, дигліцерид лінолевої кислоти має хімічну формулу $C_3H_5OH(COOC_{17}H_{31})_2$;

б) структуру молекули динасиченого – мононенасиченого тригліцериду лінолевої і стеаринової кислоти: загальна формула тригліцериду – $C_3H_5(COOR)_3$, лінолева кислота – одноосновна карбонова кислота із трьома ізольованими подвійними зв'язками $C_{17}H_{29}COOH$, стеаринова кислота – одноосновна насичена карбонова кислота $C_{17}H_{35}COOH$, отже, динасичений – мононенасичений тригліцерид лінолевої і стеаринової кислоти має формулу $C_3H_5(COOC_{17}H_{35})_2(COOC_{17}H_{29})$.

2. Розраховуємо молярну масу гліцеридів карбонових кислот за кількістю атомів даного типу:



$$\mu_1 = 12 \cdot 3 + 5 \cdot 1 + 16 + 1 + (16 \cdot 2 + 12 \cdot 18 + 31 \cdot 1) \cdot 2 = 616 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$$



$$\mu_2 = 12 \cdot 3 + 5 \cdot 1 + (16 \cdot 2 + 12 \cdot 18 + 35 \cdot 1) \cdot 2 +$$

$$+ (16 \cdot 2 + 12 \cdot 18 + 29 \cdot 1) = 872 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. Визначаємо ступінь ненасиченості (число подвійних зв'язків) карбонової кислоти кожного гліцериду:

3.1. Визначаємо вуглеводневий радикал карбонової кислоти:

– у складі дигліцериду: $R_1 = C_{17}H_{31}$;

– у складі тригліцериду: $R_2 = C_{17}H_{35}$, $R_3 = C_{17}H_{29}$.

3.2. Визначаємо нестачу атомів гідрогену “x” для насиченого стану радикала карбонової кислоти кожного гліцериду за формулою (2.7):

$$C_{17}H_{31}: \quad x_1 = 2 \cdot 17 + 1 - 31 = 4;$$

$$C_{17}H_{35}: \quad x_2 = 2 \cdot 17 + 1 - 35 = 0;$$

$$C_{17}H_{29}: \quad x_3 = 2 \cdot 17 + 1 - 29 = 6.$$

3.3. Визначаємо число ненасичених зв'язків у радикалі карбонової кислоти кожного гліцериду за формулою (2.8):

$$\text{– у складі лінолевої кислоти} \quad z_1 = \frac{4}{2} = 2;$$

$$\text{– у складі стеаринової кислоти} \quad z_2 = \frac{0}{2} = 0;$$

$$\text{– у складі ліноленової кислоти} \quad z_3 = \frac{6}{2} = 3.$$

4. Визначаємо число ненасичених зв'язків у

гліцериді за формулою (2.9).

Через те що дигліцерид містить 2 радикали лінолевої кислоти, $k_1 = 2$, отже, загальне число ненасичених зв'язків у складі дигліцериду лінолевої кислоти:

$$Z_1 = 2 \cdot 2 = 4.$$

До складу другого гліцериду входять два радикали стеаринової кислоти ($k_2 = 2$) та один радикал лінолевої кислоти ($k_3 = 1$), отже, загальне число ненасичених зв'язків у складі динасиченого – мононенасиченого тригліцериду становить:

$$Z_2 = 2 \cdot 0 + 1 \cdot 3 = 3.$$

5. Визначаємо масу йоду в реакції приєднання до кожного гліцериду за формулою (2.10):

$$J_{ч1} = \frac{254 \cdot 4 \cdot 100}{616} = 165 \text{ г}; \quad J_{ч2} = \frac{254 \cdot 3 \cdot 100}{872} = 87 \text{ г}.$$

6. Розраховуємо йодне число вихідної суміші гліцеридів за формулою (2.11):

$$J_{ч} = 165 \cdot \frac{40}{100} + 87 \cdot \frac{60}{100} = 118,2 \text{ г}.$$

Висновок: оскільки йодне число суміші $J_{ч} = 118,2$ г більше за критичну величину йодного числа (50 г), даний жир схильний до самозаймання.

Методика визначення можливості виникнення горіння під впливом екзотермічного ефекту хімічної реакції

1. Розрахувати маси початкових реагентів і продуктів реакції.

1.1. Скласти рівняння хімічної реакції.

1.2. Виходячи з рівняння реакції і маси реагуючої речовини, визначити масу компонентів (наприклад, води), що вступають у реакцію, і масу продуктів реакції, що утворюються внаслідок цієї реакції, із пропорцій:

$$\begin{aligned} \mu_r &\rightarrow \mu_k n_k, & \mu_r &\rightarrow \mu_{пр} n_{пр}, \\ m_r &\rightarrow m_k; & m_r &\rightarrow m_{пр}; \end{aligned} \quad (2.12)$$
$$m_k = \mu_k n_k \frac{m_r}{\mu_r}; \quad m_{пр} = \mu_{пр} n_{пр} \frac{m_r}{\mu_r},$$

де μ_r , μ_k , $\mu_{пр}$ – відповідно молярна маса реагуючої речовини, компонентів, що вступають у реакцію, та продуктів реакції, г·моль⁻¹;

m_r , m_k , $m_{пр}$ – відповідно початкова маса реагуючої речовини, компонентів, що вступають у реакцію, та продуктів реакції, г;

n_k , $n_{пр}$ – відповідно число молів компонентів, що вступають у реакцію, та продуктів реакції.

2. Розрахувати складові теплового балансу реакції.

Тепловий баланс реакції розраховують із припущення, що теплота реакції $Q_{\Sigma xp}$ витрачається на нагрівання і часткове випаровування компонентів, що вступають у реакцію (наприклад, води Q_{H_2O} за умови

самозаймання речовин при контакті з водою), нагрівання негорючих конденсованих $Q_{\text{конд. пр}}$ та газоподібних продуктів реакції $Q_{\text{газ. пр}}$, нагрівання горючих газів, що утворилися під час реакції, $Q_{\text{гг}}$, та тепловтрати в навколишнє середовище $Q_{\text{втр}}$:

$$Q_{\Sigma\text{хр}} = Q_{\text{H}_2\text{O}} + Q_{\text{конд. пр}} + Q_{\text{газ. пр}} + Q_{\text{гг}} + Q_{\text{втр}}. \quad (2.13)$$

2.1. Розрахувати кількість теплоти, що виділяється під час реакції вихідної речовини з окисником. Якщо вихідний матеріал представляє собою суміш декількох речовин, стандартні теплоти окремих реакцій для складових вихідного матеріалу розрахувати за законом Гесса (1.51):

$$Q_{\Sigma\text{хр}} = \sum_i Q_{\text{хр}i} \frac{m_{\text{р}i}}{\mu_{\text{р}i}}, \quad (2.14)$$

де $Q_{\Sigma\text{хр}}$ – сумарна кількість тепла, що виділяється під час реакції вихідного матеріалу з окисником, кДж;

$Q_{\text{хр}i}$ – стандартний тепловий ефект реакції i -го компонента вихідного матеріалу з окисником, кДж·моль⁻¹;

$m_{\text{р}i}$ – маса i -го компонента вихідного матеріалу, г;

$\mu_{\text{р}i}$ – молярна маса i -го компонента вихідного матеріалу, г·моль⁻¹.

2.2. Розрахувати кількість тепла, що витрачається на нагрівання компонентів, що вступають у реакцію, та продуктів реакції.

Приймаємо, що під час хімічного самозаймання при контакті з водою уся вода нагрівається від початкової температури $T_{\text{поч}}$ до температури кипіння $T_{\text{кип}}$, а 50 %

Розділ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння
води випаровується, тоді:

$$Q_{H_2O} = m_{H_2O} c_{pH_2O}(T_{\text{кип}} - T_{\text{поч}}) + 0,5 \cdot m_{H_2O} \Delta H_{\text{вип}}, \quad (2.15)$$

де c_{pH_2O} – питома масова теплоємність води за сталого тиску, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$;

$\Delta H_{\text{вип}}$ – масова теплота випаровування води, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$.

При утворенні горючих газів виходимо з імовірності їх самоспалахування, тобто припускаємо, що горючі гази нагріваються від початкової температури до температури їх самоспалахування $T_{\text{сс}}$:

$$Q_{\text{ГГ}} = m_{\text{ГГ}} \cdot c_{p \text{ ГГ}} (T_{\text{сс}} - T_{\text{поч}}), \quad (2.16)$$

де $c_{p \text{ ГГ}}$ – питома масова теплоємність горючих газів, що утворюються, за сталого тиску, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$.

Негорючі продукти реакції (конденсовані чи газоподібні) нагріваються від початкової температури до температури зони реакції $T_{\text{зр}}$, тоді:

$$Q_{\text{конд. пр}} = m_{\text{конд. пр}} c_{p \text{ конд пр}} (T_{\text{зр}} - T_{\text{поч}}); \quad (2.17)$$

$$Q_{\text{газ. пр}} = m_{\text{газ. пр}} c_{p \text{ газ. пр}} (T_{\text{зр}} - T_{\text{поч}}), \quad (2.18)$$

де $c_{p \text{ конд пр}}$ – питома масова теплоємність конденсованого продукту реакції за сталого тиску, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$;

$c_{p \text{ газ. пр}}$ – питома масова теплоємність негорючого газоподібного продукту реакції за сталого тиску, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$.

2.3. Розрахувати тепловтрати від зони реакції у навколишнє середовище.

Приймаємо, що тепловтрати в навколишнє

середовище відбуваються за рахунок конвекційного теплообміну, на який витрачається 10 % від сумарної теплоти реакції:

$$Q_{\text{втр}} = 0,1 \cdot Q_{\Sigma\text{хр}}. \quad (2.19)$$

3. Розрахувати температуру зони реакції.

Оскільки температура зони реакції не відома, спочатку з теплового балансу (2.13) знаходимо кількість тепла, що витрачається на нагрівання негорючих продуктів реакції:

- за умови утворення тільки конденсованих негорючих продуктів реакції $Q_{\text{конд. пр}}$:

$$Q_{\text{конд. пр}} = Q_{\Sigma\text{хр}} - (Q_{\text{H}_2\text{O}} + Q_{\text{ГГ}} + Q_{\text{втр}}); \quad (2.20)$$

- за умови утворення конденсованих негорючих продуктів і негорючих газів:

$$Q_{\text{конд. пр}} + Q_{\text{газ. пр}} = Q_{\Sigma\text{хр}} - (Q_{\text{H}_2\text{O}} + Q_{\text{ГГ}} + Q_{\text{втр}}). \quad (2.21)$$

Температуру зони реакції знаходимо за теплою, до якої нагріваються продукти реакції, за формулами (2.17), (2.18) та (2.22):

- за умови утворення тільки конденсованих негорючих продуктів реакції:

$$T_{\text{зр}} = T_{\text{поч}} + \frac{Q_{\Sigma\text{хр}} - (Q_{\text{H}_2\text{O}} + Q_{\text{ГГ}} + Q_{\text{втр}})}{m_{\text{конд. пр}} c_{\text{р конд. пр}}}; \quad (2.22)$$

• за умови утворення конденсованих негорючих продуктів і негорючих газів:

$$T_{зр} = T_{поч} + \frac{Q_{\Sigma xp} - (Q_{H_2O} + Q_{гг} + Q_{вгг})}{m_{конд.пр} c_{р конд.пр} + m_{газ.пр} c_{р газ.пр}}. \quad (2.23)$$

4. Порівняти температуру зони реакції $T_{зр}$ із критичною температурою горючого компонента (температурою самоспалахування для горючих газів або температурою тління для твердих горючих речовин).

Якщо температура зони реакції є більшою, ніж критична температура горючого компонента, то самозаймання може виникнути за рахунок екзотермічного ефекту хімічної реакції.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати можливість виникнення хімічного самозаймання при контакті з водою 1 кг технічного карбїду кальцію, який містить 75 % CaC_2 та 20 % CaO . Початкова температура системи дорівнює $20^\circ C$, надлишок води, який потрапив до зони реакції, становить 30 %.

Розв'язання

1. Розраховуємо маси початкових реагентів і продуктів реакції на підставі матеріального балансу реакції.

1.1. Складаємо рівняння реакції складових компонентів технічного карбїду з водою:



II. CaO + H₂O → Ca(OH)₂.

1.2. Розраховуємо за формулою (2.12) масу води, що вступає в реакції **I** і **II** зі складовими технічного карбїду, та масу продуктів, що утворюються в результаті цих реакцій.

За технічними характеристиками 1 кг технічного карбїду кальцію містить $m_{\text{CaC}_2} = 750$ г та $m_{\text{CaO}} = 200$ г. Молярні маси реагуючих речовин та продуктів реакції визначаємо за довідником [9]:

$$\mu_{\text{CaC}_2} = 64 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad \mu_{\text{CaO}} = 56 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad \mu_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}; \\ \mu_{\text{Ca(OH)}_2} = 74 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad \mu_{\text{C}_2\text{H}_2} = 26 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

Для протікання реакцій **I** і **II** у стехіометричному співвідношенні необхідно води:

$$m_{\text{H}_2\text{O}}(\text{ст}) = 18 \cdot 2 \cdot \frac{750}{64} + 18 \cdot \frac{200}{56} = 486 \text{ г}.$$

З урахуванням надлишку води, що потрапляє до зони реакції:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 486 \cdot 1,3 = 632 \text{ г}.$$

Маса гашеного вапна Ca(OH)₂, що утворюється у процесі реакцій **I** і **II**:

$$m_{\text{Ca(OH)}_2} = 74 \cdot \frac{750}{64} + 74 \cdot \frac{200}{56} = 1132 \text{ г}.$$

Маса ацетилену, що утворюється у процесі реакції I:

$$m_{\text{C}_2\text{H}_2} = 26 \cdot \frac{750}{64} = 304 \text{ г.}$$

2. Розраховуємо тепловий баланс реакції.

2.1. Розраховуємо сумарну кількість теплоти, що виділяється внаслідок реакції технічного карбіду з водою, за формулою (2.14). Стандартні теплові ефекти реакцій I і II розраховуємо за законом Гесса (1.51). Теплоти утворення реагуючих речовин та продуктів реакції визначаємо за довідником [9].

$$\begin{aligned} Q_{\text{xp I}} &= \left| \begin{array}{c} n_{\text{C}_2\text{H}_2} \Delta H_{\text{f C}_2\text{H}_2}^{\circ} + n_{\text{Ca(OH)}_2} \Delta H_{\text{f Ca(OH)}_2}^{\circ} - \\ - (n_{\text{H}_2\text{O}} \Delta H_{\text{f H}_2\text{O(p)}}^{\circ} + n_{\text{CaC}_2} \Delta H_{\text{f CaC}_2}^{\circ}) \end{array} \right| = \\ &= |226,8 + (-986,6) - 2 \cdot (-285,8) - (-62,7)| = \\ &= 125,5 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{xp II}} &= \left| \begin{array}{c} n_{\text{Ca(OH)}_2} \Delta H_{\text{f Ca(OH)}_2}^{\circ} - \\ - (n_{\text{H}_2\text{O}} \Delta H_{\text{f H}_2\text{O(p)}}^{\circ} + n_{\text{CaO}} \Delta H_{\text{f CaO}}^{\circ}) \end{array} \right| = \\ &= |(-986,6) - (-285,8) - (-635,5)| = 65,3 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \end{aligned}$$

$$Q_{\Sigma \text{xp}} = 125,5 \frac{750}{64} + 65,3 \frac{200}{56} = 1704 \text{ кДж.}$$

2.2. Розраховуємо кількість тепла, що витрачається на нагрівання води та продуктів реакції, за формулами (2.15) – (2.17).

Із довідника [9] виписуємо теплофізичні характеристики вихідних речовин та продуктів реакції:

$$c_p \text{H}_2\text{O} = 4,18 \cdot \text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}; \quad \Delta H_{\text{вип.}} \text{H}_2\text{O} = 2258,4 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1};$$

$$c_p \text{Ca}(\text{OH})_2 = 1,18 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}; \quad c_p \text{C}_2\text{H}_2 = 1,69 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1};$$

$$t_{\text{cc}} \text{C}_2\text{H}_2 = 335 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (608 K)}.$$

$$Q_{\text{H}_2\text{O}} = 0,632 \cdot 4,18 \cdot (100 - 20) + 0,5 \cdot 0,632 \cdot 2258,4 = 925,0 \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{C}_2\text{H}_2} = 0,304 \cdot 1,69 \cdot (335 - 20) = 161,8 \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{Ca}(\text{OH})_2} = 1,132 \cdot 1,18 \cdot (t_{\text{зр}} - 20).$$

2.3. Розраховуємо тепловтрати від зони реакції у навколишнє середовище за формулою (2.19):

$$Q_{\text{втр.}} = 0,1 \cdot 1704 = 170,4 \text{ кДж}.$$

3. Розраховуємо температуру зони реакції за формулою (2.22):

$$T_{\text{зр}} = 293 + \frac{1704 - (925,0 + 161,8 + 170,4)}{1,132 \cdot 1,18} = 627,5 \text{ К}.$$

4. Висновок: температура зони реакції $T_{\text{зр}} = 627,5 \text{ К}$ є більшою, ніж температура самоспалахування ацетилену $T_{\text{cc}} = 608 \text{ К}$, отже, під час реакції технічного карбіду з водою (за умови наявності надлишку води не більше 30 %) відбудеться самоспалахування горючого

Розділ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння газу – ацетилену.

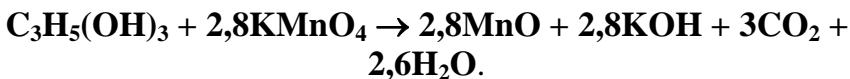
Приклад розв'язання задачі

При сумісному транспортуванні реактивів сталася розгерметизація ємності з гліцерином. Визначити можливість самозаймання тирси, яку було використано для ущільнення ємності з гліцерином при транспортуванні у контейнері, просоченої 1 л гліцерину, за умови її контакту з 10 кг перманганату калію. Початкова температура системи дорівнює 0 °С.

Розв'язання

1. Розраховуємо маси початкових реагентів і продуктів реакції на підставі матеріального балансу реакції.

1.1. Складаємо рівняння реакції 1 моля гліцерину з перманганатом калію:



1.2. Розраховуємо за формулою (2.12) масу перманганату калію, що вступає в реакцію з гліцерином, та масу продуктів, що утворюються в результаті цієї реакції.

Молярні маси реагуючих речовин та продуктів реакції, а також густину гліцерину визначаємо за довідником [9]:

$$\begin{aligned} \mu_{\text{KMnO}_4} &= 158 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}; & \mu_{\text{KOH}} &= 46,1 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}; \\ \mu_{\text{MnO}} &= 70,9 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}; & \mu_{\text{CO}_2} &= 44 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}; \\ \mu_{\text{H}_2\text{O}} &= 18 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}; & \mu_{\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3} &= 92 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}; \\ \rho_{\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3} &= 1260,4 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}. \end{aligned}$$

Визначаємо масу 1 л гліцерину:

$$m_{\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3} = 1260,4 \cdot 10^{-3} = 1,26 \text{ кг (1260,4 г)} .$$

Для протікання реакції у стехіометричному співвідношенні необхідно перманганату калію:

$$m_{\text{KMnO}_4} (\text{ст.}) = 158 \cdot 2,8 \cdot \frac{1260,4}{92} = 6058 \text{ г} .$$

За умовою загальна кількість перманганату калію становить 10 кг, тобто надлишкова маса реагенту, що не вступає в реакцію, але забирає на власне нагрівання частку теплоти хімічної реакції, дорівнює:

$$m_{\text{KMnO}_4} (\text{надл.}) = 10000 - 6058 = 3942 \text{ г} .$$

За умови повного протікання реакції утворюються продукти реакції у кількості:

$$m_{\text{KOH}} = 46,1 \cdot 2,8 \cdot \frac{1260,4}{92} = 1768 \text{ г};$$

$$m_{\text{MnO}} = 70,9 \cdot 2,8 \cdot \frac{1260,4}{92} = 2719 \text{ г};$$

$$m_{\text{CO}_2} = 44 \cdot 3 \cdot \frac{1260,4}{92} = 1808 \text{ г};$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \cdot 2,6 \cdot \frac{1260,4}{92} = 640,9 \text{ г} .$$

2. Розраховуємо тепловий баланс реакції.

2.1. Розраховуємо сумарну кількість теплоти, що виділяється внаслідок реакції гліцерину з перманганатом

калію, за формулою (2.14).

Стандартний тепловий ефект реакції розраховуємо за законом Гесса (1.51). Теплоти утворення реагуючих речовин та продуктів реакції визначаємо за довідником [9].

$$\begin{aligned}
 Q_{xp} &= \left[n_{\text{KOH}} \Delta H_{f_{\text{KOH}}}^{\circ} + n_{\text{MnO}} \Delta H_{f_{\text{MnO}}}^{\circ} + n_{\text{CO}_2} \Delta H_{f_{\text{CO}_2}}^{\circ} + \right. \\
 &+ n_{\text{H}_2\text{O}} \Delta H_{f_{\text{H}_2\text{O}}}^{\circ} - n_{\text{KMnO}_4} \Delta H_{f_{\text{KMnO}_4}}^{\circ} - \\
 &\left. - n_{\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3} \Delta H_{f_{\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3}}^{\circ} \right] = \\
 &= \left[2,8 \cdot (-425,9) + 2,8 \cdot (-384,9) + 3 \cdot (-393,8) + \right. \\
 &\left. + 2,6 \cdot (-285,8) - 2,8 \cdot (-813,4) - (-659,9) \right] = \\
 &= 1257,3 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.
 \end{aligned}$$

Загальний тепловий ефект реакції з урахуванням повної маси гліцерину, що бере участь у реакції, становить:

$$Q_{\Sigma xp} = 1257,3 \frac{1260,4}{92} = 17225 \text{ кДж.}$$

2.2. Розраховуємо кількість тепла, що витрачається на нагрівання продуктів реакції, за формулами (2.15), (2.17).

Із довідника [9] виписуємо теплофізичні характеристики вихідних речовин та продуктів реакції:

$$\begin{aligned}
 c_p \text{ KOH} &= 1,3 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}; & c_p \text{ MnO} &= 0,63 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}; \\
 c_p \text{ CO}_2 &= 0,84 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}; & c_p \text{ KMnO}_4 &= 0,75 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}; \\
 c_p \text{ H}_2\text{O}(\text{рід}) &= 4,19 \cdot \text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}; & c_p \text{ H}_2\text{O}(\text{пар}) &= 2,2 \cdot \text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}; \\
 \Delta H_{\text{вип. H}_2\text{O}} &= 2258,4 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.
 \end{aligned}$$

Вода, яка утворюється внаслідок реакції, нагріється

від початкової температури до температури кипіння, після чого почне випаровуватися. Пара води, як і інші негорючі продукти реакції, нагріється до температури зони горіння, отже:

$$Q_{\text{H}_2\text{O (рід)}} = 0,64 \cdot (4,18 \cdot (100 - 0) + 2258,4) = 1713,5 \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{H}_2\text{O (пар)}} = 0,64 \cdot 2,2(t_{\text{зр}} - 100) = 1,41(t_{\text{зр}} - 100) \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{KOH}} = 1,77 \cdot 1,3(t_{\text{зр}} - 0) = 2,3(t_{\text{зр}} - 0) \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{MnO}} = 2,72 \cdot 0,63(t_{\text{зр}} - 0) = 1,7(t_{\text{зр}} - 0) \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{CO}_2} = 1,81 \cdot 0,84(t_{\text{зр}} - 0) = 1,5(t_{\text{зр}} - 0) \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{KMnO}_4} = 3,94 \cdot 0,75(t_{\text{зр}} - 0) = 2,95(t_{\text{зр}} - 0) \text{ кДж}.$$

2.3. Розраховуємо тепловтрати від зони реакції у навколишнє середовище за формулою (2.19):

$$Q_{\text{втр}} = 0,1 \cdot 17225 = 1722,5 \text{ кДж}.$$

3. Розраховуємо температуру зони реакції за формулою (2.22):

$$T_{\text{зр}} = 273 + \frac{17225 - (1713,5 + 1722,5)}{1,41 + 2,3 + 1,7 + 1,5 + 2,95} = 1671 \text{ К}.$$

Висновок: температура зони реакції $T_{\text{зр}} = 1671 \text{ К}$ є більшою, ніж температура самоспалахування гліцерину $T_{\text{сц}} = 673 \text{ К}$ та температура тління тирси $420 \div 430 \text{ К}$ [7], отже, під час реакції гліцерину з перманганатом калію можливе самоспалахування пари гліцерину та самозаймання тирси, просоченої гліцеином, за рахунок тепла хімічної реакції.

§ 2. Теплове самозаймання

При тепловому самозайманні тверда горюча речовина нагрівається до такої температури, за якої відбувається її термічне розкладання на газоподібні продукти і твердий вуглецевий залишок. Газоподібні продукти термічного розкладання вступають в екзотермічну реакцію окиснення з киснем повітря. Тепло, що при цьому виділяється, не встигає розсіятися, оскільки температура навколишнього середовища є підвищеною за рахунок зовнішнього підведення тепла. Внаслідок накопичення тепла виникає самонагрівання, яке, у свою чергу, зумовлює підвищення температури матеріалу та прискорення процесів розкладання й окиснення. Поступове підвищення температури матеріалу призводить до окиснення твердого вуглецевого залишку, яке, за сприятливих умов акумуляції тепла, може перейти у самозаймання спочатку у вигляді тління твердого вуглецевого залишку, а потім і з появою полум'яного горіння.

Необхідними умовами виникнення теплового самозаймання є:

- підвищена температура навколишнього середовища;
- знаходження матеріалу у вигляді скупчення, що зумовлює малу площу тепловтрат;
- легкість термічного розкладання матеріалу з утворенням достатньої кількості газоподібних продуктів, які активно вступають у реакцію окиснення;
- горючий матеріал є пористим або роздрібненим, нещільно утрамбованим, внаслідок чого є достатній

доступ кисню углиб речовини.

Для розробки й організації комплексу профілактичних заходів, що виключають можливість виникнення теплового самозаймання, передусім потрібно знати характеристики (параметри) матеріалів, що застосовуються в технологічних процесах, та умови, в яких знаходяться ці матеріали [5], [8], [25].

Як перший показник можна виділити **температуру самонагрівання** речовини $t_{сн}$ – мінімальну температуру середовища, за якої можливе теплове самозаймання певного об'єму (маси) матеріалу. Це та умовна температурна межа, вище за яку за сприятливих умов можливий розвиток екзотермічного процесу самонагрівання, пов'язаний із термічним розкладанням речовин та окисненням продуктів розкладання.

Другим показником є **період індукції** $\tau_{інд}$ – час з моменту, коли температура матеріалу стане рівною температурі самонагрівання, до моменту виникнення горіння у найбільш “гарячій” точці скупчення матеріалу.

Третій показник, що визначає схильність речовин до теплового самозаймання, – це **питома поверхня тепловіддачі** $S_{пит}$, яка, у свою чергу, визначається розмірами й формою скупчення матеріалу. Знаючи цей показник, можна у кожному конкретному випадку визначити безпечні розміри об'ємів матеріалу та їх геометричну форму для даної температури середовища.

Температуру самонагрівання можна вважати мінімальною температурою, за якої можливе самозаймання даного матеріалу *за найбільш сприятливих умов*. Температура тління або температура самоспалахування є температурами, вище за які

самозаймання можливе навіть за несприятливих умов – малі розміри зразка, короткочасність нагрівання тощо. В інтервалі між цими критичними температурами можливість самозаймання залежить від умов акумуляції тепла та накопичення проміжних продуктів, які впливають на швидкість процесу окиснення. У роботі [13] було показано, що в цьому інтервалі температур залежність температури середовища, за якої виникає самозаймання, від питомої поверхні тепловіддачі та часу нагрівання матеріалу із прийнятною для практики точністю можна виразити емпіричними формулами:

$$\lg t_c = A_p + n_p \lg S_{\text{пит}}, \quad (2.24)$$

$$\lg t_c = A_b - n_b \lg \tau_{\text{інд}}, \quad (2.25)$$

де t_c – температура середовища, за якої виникає теплове самозаймання, °C;

$S_{\text{пит}}$ – питома поверхня матеріалу, м^{-1} ;

$\tau_{\text{інд}}$ – час теплового впливу до моменту виникнення самозаймання, години;

A_p , n_p , A_b , n_b – емпіричні коефіцієнти, які визначають експериментально для даної горючої речовини; для значної кількості практично важливих матеріалів зведені у довідниках [7], [33] (для деяких матеріалів коефіцієнти наведені у таблиці 7 додатків).

Питома поверхня зразка визначається як відношення повної поверхні тепловіддачі до об'єму матеріалу, в якому відбуваються екзотермічні процеси:

$$S_{\text{пит}} = \frac{S_{\text{повн}}}{V}, \text{ м}^{-1}, \quad (2.26)$$

де $S_{\text{повн}}$ – повна зовнішня поверхня зразка, м^2 ;
 V – об’єм зразка, м^3 .

Питому поверхню паралелепіпеда можна визначити за формулою:

$$S_{\text{пит}} = 2 \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{h} \right), \text{м}^{-1}, \quad (2.27)$$

де a, b, h – розміри зразка, м .

Якщо основа паралелепіпеда ($a \cdot b$) є теплоізолюваною, то питома поверхня тепловіддачі дорівнює:

$$S_{\text{пит}} = 2 \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) + \frac{1}{h}, \text{м}^{-1}. \quad (2.28)$$

Для тіла циліндричної форми питома поверхня може бути визначена як:

$$S_{\text{пит}} = 2 \left(\frac{1}{H} + \frac{1}{R} \right), \text{м}^{-1}, \quad (2.29)$$

де H – висота циліндра, м ;

R – радіус циліндра, м .

Якщо основа циліндра (πR^2) є теплоізолюваною, то питома поверхня тепловіддачі дорівнює:

$$S_{\text{пит}} = \frac{1}{H} + \frac{2}{R}, \text{м}^{-1}. \quad (2.30)$$

Для тіла конічної форми питома поверхня визначається за формулою:

$$S_{\text{пит}} = 3 \frac{R + \sqrt{H^2 + R^2}}{HR}, \text{ м}^{-1}, \quad (2.31)$$

де H – висота конуса, м;

R – радіус основи конуса, м.

Якщо основа конуса (πR^2) є теплоізолюваною, то питома поверхня тепловіддачі дорівнює:

$$S_{\text{пит}} = 3 \frac{\sqrt{H^2 + R^2}}{HR}, \text{ м}^{-1}. \quad (2.32)$$

Безпечною температурою нагрівання зразка заданого розміру у виробничому процесі вважають температуру, яка не перевищує 80 % від критичної температури середовища, за якої виникає теплове самозаймання:

$$t_{\text{без}} = 0,8t_c, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.33)$$

Для визначення температури самонагрівання проводяться експериментальні дослідження, в яких зразок означених розмірів витримують у термостаті за заданих температур. При цьому проводиться контроль температури всередині зразка. За температуру самонагрівання приймають мінімальну температуру термостата, за якої спостерігається різке підвищення температури матеріалу, що закінчується тлінням або полум'яним горінням.

Якщо відомі коефіцієнти формули (2.24), то

приблизне значення температури самонагрівання $t_{сн}$ можна розрахувати, припускаючи величину питомої поверхні зразка $S_{пит} = 1 \text{ м}^{-1}$:

$$\lg t_{сн} = A_p \cdot \quad (2.34)$$

Аналогічно можна розрахувати і температуру тління матеріалу $t_{тл}$, припускаючи величину питомої поверхні зразка $S_{пит} = 150 \text{ м}^{-1}$ (саме таку питому поверхню має зразок, що використовується для експериментального визначення температури тління речовин та матеріалів згідно [30]):

$$\lg t_{тл} = A_p + 2,18n_p \cdot \quad (2.35)$$

Якщо відсутні експериментальні дані, за якими можна визначити емпіричні константи залежності (2.24), але відомі температури самонагрівання та тління, то за рівняннями (2.34) та (2.35) можливо вирішити зворотню задачу – розрахувати константи $A_p = \lg t_{сн}$,

$n_p = 0,457 \lg \frac{t_{тл}}{t_{сн}}$ та визначити критичну температуру середовища, за якої може виникнути самозаймання скупчення матеріалу заданих розмірів, за формулою (2.24).

Знаючи температуру самонагрівання речовин та матеріалів, можна визначити умови безпечного тривалого (постійного) нагрівання речовин. *Безпечною вважають температуру постійного нагрівання речовини або матеріалу незалежно від розміру зразка,*

Розділ 2. Загальні закономірності та параметри процесу виникнення горіння
яка не перевищує 90 % температури самонагрівання:

$$t_{без} = 0,9t_{сн}. \quad (2.36)$$

Використовуючи дані рівняння, можна визначити параметри теплового самозаймання, такі як температура самонагрівання, температура тління, період індукції теплового самозаймання, критичні температури середовища та час нагрівання скупчення матеріалу заданих розмірів.

Методика визначення параметрів теплового самозаймання

1. Визначити для даної горючої речовини емпіричні коефіцієнти A_p , n_p , A_b , n_b за довідником [7] або за таблицею 7 додатків.

2. Розрахувати температуру самонагрівання горючого матеріалу за формулою (2.34).

3. Розрахувати температуру тління горючого матеріалу за формулою (2.35).

4. Розрахувати питому поверхню тепловіддачі залежно від форми скупчення горючого матеріалу за формулою (2.26).

5. Розрахувати за формулами (2.24) та (2.25) критичні температуру середовища та час нагрівання скупчення горючого матеріалу заданих розмірів, за яких може виникнути теплове самозаймання.

6. Розрахувати безпечну температуру нагріву горючого матеріалу під час його експлуатації за формулами (2.33) або (2.34).

Приклад розв'язання задачі

Визначити критичні температуру середовища та час нагрівання, за яких може виникнути теплове самозаймання тирси соснової у контейнері з розмірами $1 \text{ м} \times 1,5 \text{ м} \times 2 \text{ м}$, а також безпечну температуру зберігання цього матеріалу. Вважати, що всі стінки контейнера нетеплоізовані.

Розв'язання

1. Визначаємо константи теплового самозаймання для соснової тирси за таблицею 7 додатків:

$$A_p = 1,855; n_p = 0,219; A_b = 2,296; n_b = 0,096.$$

2. Розраховуємо питому поверхню контейнера даних розмірів за формулою (2.27):

$$S_{\text{пит}} = 2 \left(\frac{1}{1} + \frac{1}{1,5} + \frac{1}{2} \right) = 4,3 \text{ м}^{-1}.$$

3. Розраховуємо критичні температуру середовища та час нагріву контейнера, за яких може виникнути теплове самозаймання, за формулами (2.24) та (2.25):

$$\lg t_c = 1,855 + 0,219 \lg 4,3 = 1,99,$$

$$t_c = 10^{1,99} = 98,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$\lg t_c = 2,296 - 0,096 \lg \tau_{\text{інд}},$$

$$\lg \tau_{\text{інд}} = \frac{2,296 - 1,99}{0,096} = 3,19;$$

$$\tau_{\text{інд}} = 10^{3,19} = 1540 \text{ годин}.$$

4. Визначаємо температуру безпечного зберігання

тирси соснової у контейнері означеного розміру за формулою (2.33):

$$t_{\text{без}} = 0,8 \cdot 98,6 = 79 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Висновок: при зберіганні тирси соснової у контейнері з питомою поверхнею $4,3 \text{ м}^{-1}$ самонагрівання виникне за температури $98,6 \text{ }^\circ\text{C}$, яке закінчиться самозайманням через 1540 годин. Максимальна безпечна температура при зберіганні тирси соснової в означених умовах дорівнює $79 \text{ }^\circ\text{C}$.

Приклад розв'язання задачі

Визначити критичну температуру середовища та час, за який може виникнути самозаймання тюка бавовни циліндричної форми розмірами $H = 1,8 \text{ м}$, $R = 0,8 \text{ м}$, якщо відомо, що температура самонагрівання бавовни $t_{\text{сн}} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$, а температура тління $t_{\text{тл}} = 205 \text{ }^\circ\text{C}$. Вважати, що основа тюка бавовни нетеплоізолювана.

Розв'язання

1. Визначаємо за формулами (2.34) та (2.35) параметри A_p , n_p :

$$A_p = \lg t_{\text{сн}} = \lg 120 = 2,079,$$

$$n_p = 0,457 \lg \frac{t_{\text{тл}}}{t_{\text{сн}}} = 0,457 \lg \frac{205}{120} = 0,106.$$

2. Визначаємо питому поверхню тюка бавовни, якщо його основа нетеплоізолювана, за формулою (2.29):

$$S_{\text{пит}} = 2 \left(\frac{1}{1,8} + \frac{1}{0,8} \right) = 3,6 \text{ м}^{-1}.$$

3. Визначаємо критичну температуру середовища, за якої можливе виникнення самозаймання тюка бавовни заданих розмірів, за формулою (2.24):

$$\begin{aligned} \lg t_c &= 2,079 + 0,106 \lg 3,6 = 2,138 ; \\ t_c &= 10^{2,138} = 137^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

4. Визначаємо час до виникнення теплового самозаймання за температури 137°C відповідно до формули (2.25), якщо константи процесу самозаймання для бавовни за таблицею 7 додатків становлять $A_b = 2,332$; $n_b = 0,057$.

$$\begin{aligned} \lg \tau_{\text{инд}} &= \frac{A_b - \lg t_c}{n_b} = \frac{2,332 - 2,138}{0,096} = 2,02 ; \\ \tau_{\text{инд}} &= 10^{2,02} = 105 \text{ годин}. \end{aligned}$$

5. Визначаємо максимальну безпечну температуру середовища для тривалого зберігання кипи бавовни означеного розміру:

$$t_{\text{без}} = 08 t_c = 0,8 \cdot 137 = 109,6^\circ\text{C}.$$

Висновок: при зберіганні тюка бавовни з питомою поверхнею $3,6 \text{ м}^{-1}$ за температури середовища 137°C через 105 годин виникне самозаймання. Максимальна безпечна температура при зберіганні тюка бавовни за означених умов дорівнює $109,6^\circ\text{C}$.

Приклад розв'язання задачі

У технологічному процесі борошно кормове збирається у бункері-накопичувачі й утворює купу конічної форми розмірами $H = 1,5$ м, $R = 1,9$ м. Днище апарата має теплоізоляцію. Визначити показники пожежної небезпеки горючого матеріалу та безпечні умови його зберігання. Визначити, чи може виникнути горіння, якщо борошно кормове зберігається у бункері-накопичувачі за температури 40°C протягом 10 годин.

Розв'язання

1. Визначаємо константи теплового самозаймання для борошна кормового за таблицею 7 додатків: $A_p = 1,507$, $n_p = 0,322$, $A_b = 2,103$, $n_b = 0,244$.

2. Розраховуємо температуру самонагрівання борошна кормового за формулою (2.34):

$$\lg t_{\text{CH}} = 1,507 ; \quad t_{\text{CH}} = 10^{1,507} = 32^\circ\text{C}.$$

3. Розраховуємо температуру тління борошна кормового за формулою (2.35):

$$\begin{aligned} \lg t_{\text{TL}} &= 1,507 + 2,18 \cdot 0,322 = 2,209 ; \\ t_{\text{TL}} &= 10^{2,209} = 162^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

4. Розраховуємо питому поверхню тепловіддачі за формулою (2.32) з урахуванням, що основа конуса теплоізольована:

$$S_{\text{пит}} = 3 \frac{\sqrt{1,5^2 + 1,9^2}}{1,5 \cdot 1,9} = 2,55 \text{ м}^{-1}.$$

5. Розраховуємо за формулами (2.24) та (2.25) критичні температуру середовища та час нагрівання скупчення борошна кормового заданих розмірів, за яких може виникнути теплове самозаймання:

$$\lg t_c = 1,507 + 0,322 \lg 2,55 = 1,638 ;$$

$$t_c = 10^{1,638} = 43,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$\lg t_c = 2,103 - 0,244 \lg \tau_{\text{інд}} ;$$

$$\lg \tau_{\text{інд}} = \frac{2,103 - 1,638}{0,244} = 1,906 ;$$

$$\tau_{\text{інд}} = 10^{1,906} = 80,5 \text{ годин}.$$

6. Розраховуємо безпечну температуру нагрівання скупчення борошна кормового заданих розмірів під час його експлуатації за формулою (2.33):

$$t_{\text{без}} = 0,8 \cdot 43,5 = 34,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Безпечна температура тривалого зберігання борошна кормового незалежно від розміру зразка визначається за формулою (2.36):

$$t_{\text{без}} = 0,9 \cdot 32 = 28,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Висновок: через те що критична температура середовища та час нагрівання, за яких може виникнути теплове самозаймання скупчення борошна кормового заданих розмірів, є більшими, ніж температура та час зберігання матеріалу, горіння у бункері-накопичувачі за даних умов не виникне.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Визначити схильність до самозаймання:

а) оливи, що складається із суміші тригліцеридів карбонових кислот, представлених у таблиці;

б) оливи, що складається із суміші дигліцеридів карбонових кислот, представлених у таблиці.

№	Олива (суміш гліцеридів карбонових кислот)	лауринова	лінолева	тетрадеценава	нізойна	міристинова	пальмітинова	каприлова	стеаринова	ліноленова	олейнова	гадолейнова	маргарінова	ерукова
1	олія какао	50				20	23			4	3			
2	пальмоядрова	50	3			20	16			4	5			
3	перилова		65				5			16	14			
4	соняшникова		55						10		35			
5	бавовняна		33				17		6		44			
6	конопляна		40							26	16			
7	вершкова	27					17		5		41		10	
8	гірчична		20				4				28			48
9	китовий жир			15	17		25				36	32		
10	свинячий жир		7				30		18	3	42			
11	яловичий жир		2	3			31		23		41			
12	баранячий жир		5			3	24		32		36			
13	кунжутна		40				8		6		45			
14	кукурудзяна		50			6					40		4	
15	кокосова	47		1		17		20		1	8			
16	пальмова			2			40			8	50			
17	тунгова		2							10	6			
18	ойтисикова		1				11				6	80		
19	льняна		33				10			45	12			
20	соєва		52			5	10			8	25			

2. Розрахувати можливість виникнення хімічного самозаймання при контакті з водою технічного продукту заданого складу за умов, наведених у таблиці (маса вихідного продукту, надлишок води, початкова температура та тепловий ефект реакції взаємодії вихідних компонентів із водою).

Теплоємності газоподібних горючих та твердих негорючих продуктів реакції надані в додатковій таблиці.

№ варіанта	технічна назва продукту	маса, кг	склад продукту		надлишок води, %	тепловий ефект реакції, кДж·моль ⁻¹	початкова температура, °С
			речовина	вміст, мас. %			
1	карбід кальцію	3,0	CaC ₂ CaO	80 15	15	125,5 65,3	20
2	карбід кальцію	4,0	CaC ₂ CaO	75 23	40	125,5 65,3	25
3	карбід кальцію	5,0	CaC ₂ CaO	78 20	25	125,5 65,3	30
4	карбід стронцію	2,5	SrC ₂ SrO	85 13	50	145,8 79,76	35
5	карбід барію	3,0	BaC ₂ BaO	90 8	45	171,30 104,1	40
6	карбід барію	1,0	BaC ₂ BaO	87 10	20	171,3 104,1	45
7	карбід барію	3,5	BaC ₂ BaO	92 5	35	171,3 104,1	50
8	нітрид кальцію	1,5	Ca ₃ N ₂ CaO	98 2	10	902 65,3	30
9	нітрид кальцію	2,0	Ca ₃ N ₂ CaO	97 2	45	902 65,3	35
10	нітрид кальцію	5,0	Ca ₃ N ₂ CaO	95 3	50	902 64,2	25
11	нітрид стронцію	1,0	Sr ₃ N ₂ SrO	90 5	45	891 79,8	20

Продовження таблиці

№ варіанта	технічна назва продукту	маса, кг	склад продукту		надлишок води, %	тепловий ефект реакції, кДж·моль ⁻¹	початкова температура, °С
			речовина	вміст, мас. %			
12	нітрид барію	4,5	Ba ₃ N ₂ BaO	89 7	60	891 104,1	30
13	нітрид барію	3,0	Ba ₃ N ₂ BaO	91 5	55	891 104,1	25
14	нітрид магнію	2,0	Mg ₃ N ₂ MgO	90 7	20	689,2 36,9	15
15	гідрид кальцію	1,5	CaH ₂ CaO	98 1	35	218,55 65,3	35
16	гідрид кальцію	2,0	CaH ₂ CaO	95 3	20	218,55 65,3	20
17	гідрид стронцію	1,0	SrH ₂ SrO	97 2	25	209,47 79,8	10
18	гідрид стронцію	3,5	SrH ₂ SrO	95 4	35	209,47 79,8	15
19	гідрид барію	5,0	BaH ₂ BaO	87 7	30	200,45 104,1	25
20	гідрид барію	4,0	BaH ₂ BaO	79 11	20	200,45 104,1	30

Ізобарна питома масова теплоємність деяких речовин за стандартних умов

№	Речовина	Теплоємність c_p , Дж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹
1	Mg(OH) ₂	1,33
2	Ca(OH) ₂	1,18
3	Sr(OH) ₂	0,78
4	Ba(OH) ₂	0,57
5	C ₂ H ₂	1,69
6	NH ₃	2,09
7	H ₂	14,4

3. Для речовин, наведених у таблиці, розрахувати:

- температуру самонагрівання;
- температуру тління;
- безпечну температуру тривалого нагрівання;
- критичну температуру середовища і період індукції

до виникнення теплового самозаймання при зберіганні речовини в контейнері з наведеними розмірами:

а) контейнер у вигляді паралелепіпеда:

№	Найменування речовини або матеріалу	a, м	b, м	h, м
1	бавовна	0,5	1,2	1,5
2	бавовна об'ємна 2-й сорт	1,5	0,8	1,1
3.	барвник 4,8-діаміно 1,5-діоксиатрахінон	0,7	1,4	0,4
4	картон покрівельний	1,3	1,7	1,0
5	барвник азопігмент яскраво-червоний	0,7	0,4	0,8
6	плита деревоволокниста ізоляційна	1,1	0,9	0,8
7	барвник дисперсний бордо 2С	2,0	1,0	1,8
8	барвник дисперсний фіолетовий 4К	1,2	1,5	1,4
9	плита деревоволокниста напівтверда	2,5	3,0	1,2
10	барвник дисперсний червоно-коричневий	2,1	2,8	2,0

б) контейнер у вигляді паралелепіпеда з теплоізолюваною основою:

№	Найменування речовини або матеріалу	a, м	b, м	h, м
1	барвник диспергатор НФ	3,2	2,5	3,5
2	барвник зелений пігмент	2,0	0,2	1,0
3	плита мінераловатна	1,6	2,6	2,0
4	плита торф'яна	1,4	2,3	1,9
5	барвник кубазол „Сірий С„	3,0	4,0	3,5
6	тирса соснова	1,3	3,2	2,1
7	барвник цианол блакитний 4 „3„	0,6	1,2	0,9
8	бітум нафтовий окиснений	4,0	6,0	2,0
9	брикетоване трав'яне різання	5,0	4,5	4,0
10	вітамін В ₂	1,2	1,3	1,4

в) контейнер циліндричної форми:

№	Найменування речовини або матеріалу	d, м	h, м
1	гіпсотермін у вигляді крихти	1,5	1,1
2	гудрон нафтовий	1,9	2,6
3	дерматин	2,1	2,5
4	дріжджі кормові	1,5	1,8
5	добриво для теплиць	2,0	1,2
6	ізіп (бактеріальний препарат)	4,3	3,1
7	іонообмінна смола СТ № 30 (порошок)	3,8	3,0
8	барвник азопігмент бордо ЖВ	3,3	2,6
9	нітроамофоска з кубовими залишками амінів в індустріальній олії НАФК КОА (1:1:1)	3,6	1,5
10	барвник дисперсний червоний Ж (основної речовини 6 %)	4,0	2,2

г) контейнер циліндричної форми з теплоізолюваною основою циліндра:

№	Найменування речовини або матеріалу	d, м	h, м
1	ледерин (шкірозамінник)	4,1	2,5
2	тютюн неферментований красnodарський	2,6	3,6
3	борошно вітамінне з листя	0,5	2,4
4	борошно вітамінне хвойне	0,8	1,5
5	борошно житнє	1,5	2,2
6	борошно шламове фосфорне	2,4	3,9
7	нітроамофос НАФ, марка А (1:1)	1,5	1,5
8	нітроамофоска НАФК, марка А (1:1:1)	1,4	2,5
9	нітроамофоска із сечовиною	2,5	1,5
10	барвник бутиловий ксантогенат калію	2,5	2,0

д) контейнер конічної форми:

№	Найменування речовини або матеріалу	d, м	h, м
1	кордний пил	4,5	2,2
2	силос	7,4	4,6
3	сіно	5,6	3,4
4	сланцевий пил	1,5	1,1
5	солома пшениці	3,8	2,8
6	тирса соснова	1,7	2,6
7	тізолін	2,9	1,0
8	товарні дріжджі, вологість 8 %	4,2	3,1
9	торф	2,3	2,5
10	торф фрезерний	1,5	1,6

е) контейнер конічної форми з теплоізолюваною основою конуса:

№	Найменування речовини або матеріалу	d, м	h, м
1	цинеб 80 %	2,5	1,3
2	полілак	3,4	1,2
3	шевелін	1,2	0,5
4	кормарин	2,5	1,5
5	барвник кислотний зелений (основної речовини 30 %)	3,5	0,5
6	миючий засіб „Лотос-7„	3,0	1,5
7	борошно кормове	2,6	1,0
8	каталізатор К-14	0,8	0,5
9	барвник азопігмент червоний 4ЖВ (основної речовини 40 %)	1,5	0,8
10	тютюн ферментований краснодарський (2-й сорт)	2,3	1,8

4. Для матеріалів, представлених у таблиці, визначити, чи може виникнути горіння, якщо матеріал у вигляді скупчення певної форми зберігається у технологічному обладнанні за

фактичної температури $t_{\text{факт}}, ^\circ\text{C}$ протягом часу $\tau_{\text{нагр}}$, указанного в таблиці. Визначити безпечну температуру зберігання скучення матеріалу заданих розмірів.

а) контейнер у вигляді паралелепіпеда:

№	Найменування матеріалу	a, м	b, м	h, м	$t_{\text{факт}}, ^\circ\text{C}$	$\tau_{\text{нагр}}, \text{ГОД.}$
1	вугілля активоване марки АП-14	4,0	5,0	3,0	120	5
2	вугілля активоване марки Б	3,5	7,0	4,0	80	12
3	повсть будівельна	1,7	3,0	2,0	75	100
4	повсть мінеральна по бітумній основі	2,7	3,3	4,1	100	50
5	граніть	1,4	0,9	1,9	150	24

б) контейнер циліндричної форми:

№	Найменування матеріалу	d, м	h, м	$t_{\text{факт}}, ^\circ\text{C}$	$\tau_{\text{нагр}}, \text{ГОД.}$
1	полінак (смола поліакрилонітрильна)	3	2,5	100	25
2	шевелін	1,7	2,3	120	7
3	кормогрезин 10	0,5	3	90	30
4	поліміцин	2,2	1,9	60	48
5	препарат № 30"М", нанесений на бавовну (1:1)	1,8	1,2	95	10

в) контейнер конічної форми:

№	Найменування матеріалу	d, м	h, м	$t_{\text{факт}}, ^\circ\text{C}$	$\tau_{\text{нагр}}, \text{ГОД.}$
1	барвник нігрозин спирторозчинний	3,4	2,5	60	12
2	фітобактеріоміцин	3,7	1,7	95	100
3	целолігнін карбонізований ЦБК	4,0	2,3	120	8
4	цинеб 80 % у суміші із ТНТД-80 (17:3)	2,5	4,7	80	5
5	тютюн ферментований краснодарський 2-й сорт	3,0	2,8	85	50

5. Для матеріалів, представлених у таблиці, розрахувати мінімальну температуру середовища, за якої вони можуть самозайматися при зберіганні у контейнері з наведеними у таблиці розмірами, якщо відомі температура самонагрівання t_{CH} та температура тління t_{TL} матеріалу. Визначити безпечні температури тривалого зберігання матеріалу та зберігання скупчення матеріалу даних розмірів.

№	Матеріал	$t_{CH}, ^\circ C$	$t_{TL}, ^\circ C$	Розміри контейнера		
				a, м	b, м	h, м
1.	бавовна	120	205	0,6	1,6	0,8
2.	бавовна	120	205	1,2	1,8	2,0
3.	бавовна сирець	60	190	0,8	1,8	0,9
4.	бавовна сирець	60	190	0,6	2,2	2,5
5.	борошно вітамінне листяне	95	170	0,5	0,8	1,5
6.	борошно вітамінне листяне	95	170	1,8	0,9	0,4
7.	борошно вітамінне хвойне	60	190	0,8	0,6	0,7
8.	борошно вітамінне хвойне	60	190	1,1	1,2	1,3
9.	борошно кормове	35	170	1,0	1,2	1,4
10.	борошно кормове	35	170	1,5	2,0	2,5
11.	вугілля буре	50	150	0,5	1,0	1,5
12.	вугілля буре	65	250	1,5	2,0	2,5
13.	папір фотографічний	120	324	1,0	2,0	3,0
14.	тирса дубова	100	229	1,0	0,8	0,6
15.	тирса соснова	80	230	1,5	1,3	1,1
16.	тирса соснова	80	230	0,9	2,0	1,5
17.	тирса ялинова	100	220	1,5	1,2	0,9
18.	тирса ялинова	100	220	1,5	1,8	2,1
19.	тютюн ферментований	70	210	2,1	2,0	0,5
20.	тютюн ферментований	70	210	0,8	1,2	1,9

ГЛАВА 3. ВИМУШЕНЕ ЗАПАЛЮВАННЯ

Вимушене запалювання – це виникнення горіння внаслідок дії джерела запалювання на малу частку холодної горючої суміші [1] – [3], [5], [10].

На виробництві, в якому обертаються горючі речовини в атмосфері окисника (повітря), горюче середовище наявне постійно, отже, для попередження виникнення горіння необхідно виключити можливість виникнення саме джерела запалювання.

Джерело запалювання – це тіло, що горить, або розжарене тіло, а також електричний розряд, які мають енергію і температуру, достатні для запалювання (виникнення горіння) інших речовин.

Залежно від походження джерела запалювання класифікують на групи:

- теплові прояви електричної енергії;
- теплові прояви механічної енергії;
- відкрите полум'я, розжарені продукти горіння й нагріті ними поверхні;
- теплові прояви ядерної енергії, енергія сонячних променів;
- теплові прояви хімічних реакцій (із цієї групи в самостійну групу виділені полум'я і продукти горіння).

Безумовними джерелами запалювання є прямі удари блискавки, потужні електричні дуги, полум'я газових пальників.

При проведенні експертизи пожежі, особливо при визначенні ймовірних джерел запалювання, необхідно знати причини й умови запалювання певних речовин тими або іншими тепловими проявами [25].

§ 1. Визначення спроможності електричних розрядів до підпалювання

Майже 25 % всіх пожеж виникають внаслідок теплових проявів електричної енергії, серед яких основними є короткі замикання (43 %), перегрів горючих матеріалів, які знаходяться біля залишених без нагляду електронагрівальних приладів (33 %), струмові перевантаження (12 %), іскріння й електричні дуги (3 %), створення великих перехідних опорів (5 %) та інші причини (4 %).

За умови запалювання горючої системи електричним розрядом, як параметр, що характеризує пожежонебезпечні властивості системи, приймають граничне найменше значення енергії розряду E_{min} , починаючи з якого суміш здатна запалюватися з подальшим поширенням полум'я на весь об'єм [5], [8], [10].

Мінімальною енергією запалювання E_{min} газу, пари або аерозолу даної речовини в повітрі називають найменшу енергію конденсатора, при розряді якого через повітряний проміжок виникає іскра, що запалює стехіометричну суміш даної речовини з повітрям із імовірністю 0,01.

Горіння виникне, якщо енергія електричного розряду $E_{ел.р}$ прогріє певний об'єм горючої суміші, розташований у холодному горючому середовищі, від T_0 до $T_{гор}$. Розрахунки показують, що такий об'єм набуває властивостей незгасаючого елемента полум'я у випадку, коли його розміри мають порядок ширини фронту полум'я $\delta_{фп}$ ($r_{min} = 3,7\delta_{фп}$).

Співвідношення між критичною кількістю тепла, що необхідно для підпалювання сферичного об'єму горючої суміші з критичним розміром r_{min} , і мінімальною

енергією електричної іскри можна виразити у вигляді:

$$E_{\min} \sim \frac{\lambda^3 (T_{\text{гор}} - T_o)}{u_n^3 \rho^2 c_p^2},$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності горючої суміші;
 c_p – теплоємність горючої суміші за сталого тиску;
 ρ – густина горючої суміші;
 u_n – нормальна швидкість поширення полум'я;
 T_o – початкова температура горючої суміші;
 $T_{\text{гор}}$ – температура горіння суміші.

Якщо енергія електричного розряду є меншою, ніж E_{\min} , необхідний об'єм газового середовища, нагрітий до критичної температури, не утворюється через те, що тепловиділення хімічної реакції у такому об'ємі менше тепловіддачі у холодну суміш. Горюче середовище при цьому буде прогресивно охолоджуватися, і реакція, яка почалася в місці дії електричного розряду, припиниться.

Розрахунок мінімальної енергії запалювання горючої речовини можливий на основі порівняльного методу з використанням такого параметра як нормальна швидкість поширення горіння за співвідношенням:

$$\frac{E_{\min 1}}{E_{\min 2}} = \frac{u_{n2}^2}{u_{n1}^2},$$

де $E_{\min 1}$, $E_{\min 2}$ – мінімальна енергія запалювання відповідно речовин 1 і 2;

u_{n1} , u_{n2} – нормальна швидкість поширення горіння відповідно речовин 1 і 2.

Ця формула є тим точнішою, чим ближчими за будовою є

речовини, які порівнюються. Прийнято як стандартну речовину використовувати нормальний бутан, у якого $E_{\min} = 0,25$ мДж, а $u_n = 0,379$ м·с⁻¹, тоді мінімальну енергію запалювання інших газів і парів у повітрі за стандартних умов можна розрахувати за формулою:

$$E_{\min} = \frac{0,036}{u_n^2}, \text{ мДж}, \quad (2.37)$$

де u_n – нормальна швидкість поширення горіння, м·с⁻¹.

Якщо швидкість поширення горіння u_n є невідомою, то мінімальну енергію запалювання визначають експериментально за допомогою достатньо складного обладнання [30]. Значення мінімальної енергії запалювання деяких речовин наведені в таблицях 9, 11 додатків.

Для орієнтовного розрахунку E_{\min} парів та газів у повітрі можна використовувати значення критичного діаметра трубки $d_{\text{кр}}$ (критичного зазору), за якого не можливе поширення полум'я в горючій суміші, за формулою:

$$E_{\min} = \frac{\pi}{6} d_{\text{кр}}^3 q_{\text{гс}}, \text{ Дж}, \quad (2.38)$$

де $d_{\text{кр}}$ – величина критичного зазору, м;

$q_{\text{гс}}$ – питома кількість тепла, необхідна для нагрівання горючої суміші від початкової температури до температури самоспалахування, Дж·м⁻³.

Через незначний вміст горючої речовини у стехіометричній суміші з повітрям (таку суміш найлегше підпалити), питому кількість тепла, що необхідне для

нагрівання горючої суміші від початкової температури до температури самоспалахування, розраховують як тепло, що витрачається на таке саме нагрівання повітря:

$$Q_{гс} = Q_{пов}.$$

Значення $q_{пов}$ можна розрахувати за формулою:

$$q_{пов} = \int_{t_{пoch}}^{t_{cc}} c_{р_{пов}}'' dt, \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (2.39)$$

де $c_{р_{пов}}''$ – ізобарна питома об'ємна теплоємність повітря, $\text{Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}$.

Для того щоб розрахувати тепло $q_{пов}$, яке витрачається на нагрівання повітря, необхідно урахувати залежність ізобарної питомої об'ємної теплоємності від температури та вологості повітря або скористатися даними, наведеними у табл. 2.7. Математична обробка даних, представлених у табл. 2.7, дозволяє отримати апроксимаційну залежність об'ємної теплоємності вологого повітря від температури (див. рис. 2.1) у вигляді формули:

$$c_{р_{пов}}'' = 173,8T^{-0,88}, \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}. \quad (2.40)$$

Тоді рівняння (2.39) з урахуванням (2.40) можна представити у вигляді:

$$q_{пов} = \int_{T_{пoch}}^{T_{cc}} c_{р_{пов}}'' dT = 1,45 \cdot 10^6 \left(T_{cc}^{0,12} - T_{пoch}^{0,12} \right), \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3}. \quad (2.41)$$

Таблиця 2.7 – Залежність об'ємної теплоємності вологого повітря та тепла, що витрачається на нагрівання 1 м^3 повітря від $20\text{ }^\circ\text{C}$, від температури

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$c_{\text{рпов}}''$, $\text{Дж}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{К}^{-1}$	$Q_{\text{пов}}'$, $\text{кДж}\cdot\text{м}^{-3}$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$c_{\text{рпов}}''$, $\text{Дж}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{К}^{-1}$	$Q_{\text{пов}}'$, $\text{кДж}\cdot\text{м}^{-3}$
20	1211		200	765	169,1
30	1171	11,9	250	700	204
40	1134	23,4	300	644	236,3
50	1098	34,6	350	600	266,3
60	1055	45,4	400	560	294,3
70	1034	55,8	500	501	344,4
80	1009	66,2	600	450	384,4
90	977	75,9	700	411	430,5
100	955	85,56	800	380	468,5
120	906	103,6	900	353	503,8
140	865	121,3	1000	328	536,6
160	829	137,9	1100	308	567,4
180	796	153,8	1200	290	596,4

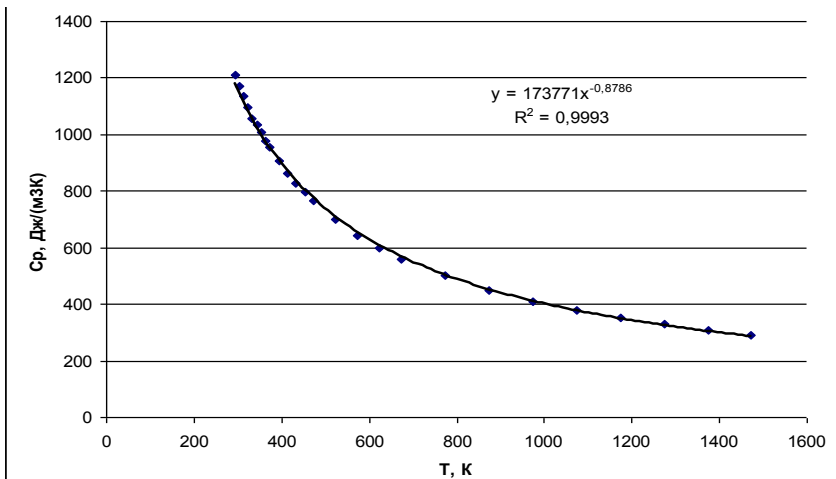


Рис. 2.1 – Залежність об'ємної теплоємності вологого повітря від температури

Значення мінімальної енергії запалювання використовують при розробці заходів для забезпечення вибухобезпечних умов переробки горючих речовин та електростатичної безпеки технологічних процесів відповідно до вимог [31]. Безпечним вважають розряд електрики, який має енергію, меншу, ніж 40 % E_{\min} :

$$E_{\text{без}} = 0,4E_{\min}. \quad (2.42)$$

Методика розрахунку мінімальної енергії запалювання

1. Для горючої речовини за довідником [7] або таблицею 11 додатків визначити нормальну швидкість поширення горіння u_n та розрахувати мінімальну енергію запалювання горючої речовини у повітрі за формулою (2.37).

За відсутності значення нормальної швидкості поширення горіння u_n , за довідником [7] для даної горючої речовини визначити величину критичного зазору $d_{\text{кр}}$ ($d_{\text{кр}} = 2 \cdot \text{БЕМЗ}$, де БЕМЗ – безпечний експериментальний максимальний зазор) та температуру самоспалахування $t_{\text{сс}}$.

2. Розрахувати тепло, що витрачається на нагрівання повітря від початкової температури до температури самоспалахування, за формулою (2.41).

3. Розрахувати мінімальну енергію запалювання горючої речовини у повітрі за формулою (2.38).

4. Розрахувати безпечну енергію розряду електрики за формулою (2.42).

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати безпечну енергію розряду статичної електрики у технологічному процесі, в якому обертається пароповітряна суміш метилового спирту. Порівняти розраховане значення енергії запалювання з експериментально визначеною величиною $E_{\min} = 0,14$ мДж.

Розв'язання

1. Визначаємо за довідником [7] нормальну швидкість поширення горіння метилового спирту: $u_n = 0,572$ м·с⁻¹.

2. Розраховуємо мінімальну енергію запалювання метилового спирту в повітрі за формулою (2.37):

$$E_{\min} = \frac{0,036}{0,572^2} = 0,11 \text{ мДж.}$$

3. Розраховуємо безпечну енергію розряду статичної електрики у технологічному процесі, в якому обертається повітряна суміш метилового спирту, за формулою (2.42):

$$E_{\text{без}} = 0,4 \cdot 0,11 = 0,044 \text{ мДж.}$$

4. Визначаємо похибку розрахунку:

$$\Delta = \frac{0,14 - 0,11}{0,14} 100\% = 21,4 \%$$

Висновок: безпечна енергія розряду статичної електрики у технологічному процесі, в якому обертається пароповітряна суміш метилового спирту становить 0,044 мДж.. Розраховане значення енергії запалювання відносно експериментально визначеної величини має похибку 21,4 %.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати мінімальні енергії запалювання повітряних сумішей тетрагідрофурану та бутилхлориду за стандартних умов (початкова температура 25 °С) і за початкової температури вихідної суміші 70 °С. Визначити безпечні енергії розряду електрики для даних сумішей.

Розв'язання

1. Визначаємо за довідником [7] для тетрагідрофурану та бутилхлориду безпечний експериментальний максимальний зазор та температуру самоспалахування:

1) тетрагідрофуран C_4H_8O :

$$\text{БЕМЗ} = 0,87 \text{ мм} = 0,87 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad t_{\text{cc}} = 250 \text{ °С} = 523 \text{ К};$$

2) бутилхлорид C_4H_9Cl :

$$\text{БЕМЗ} = 1,06 \text{ мм} = 1,06 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad t_{\text{cc}} = 460 \text{ °С} = 733 \text{ К}.$$

2. Розраховуємо тепло, що витрачається на нагрівання повітря від початкової температури до температури самоспалахування, за формулою (2.41):

$$Q_{\text{пов}C_4H_8O}^{25} = 1,45 \cdot 10^6 \left(523^{0,12} - 298^{0,12} \right) = 0,20 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q_{\text{пов}C_4H_8O}^{70} = 1,45 \cdot 10^6 \left(523^{0,12} - 343^{0,12} \right) = 0,15 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q_{\text{пов}C_4H_9Cl}^{25} = 1,45 \cdot 10^6 \left(733^{0,12} - 298^{0,12} \right) = 0,33 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q_{\text{пов}C_4H_9Cl}^{70} = 1,45 \cdot 10^6 \left(733^{0,12} - 343^{0,12} \right) = 0,28 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

3. Розраховуємо мінімальну енергію запалювання сумішей горючих речовин у повітрі за формулою (2.38) з урахуванням, що $d_{\text{кр}} = 2 \cdot \text{БЕМЗ}$:

$$E_{\min C_4H_8O}^{25} = 0,5 \cdot 0,20 \cdot 10^6 \cdot (0,87 \cdot 2 \cdot 10^{-3})^3 = 0,53 \cdot 10^{-3} \text{ Дж};$$

$$E_{\min C_4H_8O}^{70} = 0,5 \cdot 0,15 \cdot 10^6 \cdot (0,87 \cdot 2 \cdot 10^{-3})^3 = 0,39 \cdot 10^{-3} \text{ Дж};$$

$$E_{\min C_4H_9Cl}^{25} = 0,5 \cdot 0,33 \cdot 10^6 \cdot (1,06 \cdot 2 \cdot 10^{-3})^3 = 1,57 \cdot 10^{-3} \text{ Дж};$$

$$E_{\min C_4H_9Cl}^{70} = 0,5 \cdot 0,28 \cdot 10^6 \cdot (1,06 \cdot 2 \cdot 10^{-3})^3 = 1,33 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}.$$

4. Розраховуємо безпечну енергію розряду електрики за формулою (2.42):

$$E_{\text{без} C_4H_8O}^{25} = 0,4 \cdot 0,53 \cdot 10^{-3} = 0,21 \cdot 10^{-3} \text{ Дж};$$

$$E_{\text{без} C_4H_8O}^{70} = 0,4 \cdot 0,39 \cdot 10^{-3} = 0,16 \cdot 10^{-3} \text{ Дж};$$

$$E_{\text{без} C_4H_9Cl}^{25} = 0,4 \cdot 1,57 \cdot 10^{-3} = 0,63 \cdot 10^{-3} \text{ Дж};$$

$$E_{\text{без} C_4H_9Cl}^{70} = 0,4 \cdot 1,33 \cdot 10^{-3} = 0,53 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}.$$

Висновок: розраховані мінімальні енергії запалювання повітряних сумішей тетрагідрофурану та бутилхлориду за стандартних умов дорівнюють відповідно 0,53 мДж та 1,57 мДж, що відрізняється від експериментальних значень відповідно на 1,8 % ($E_{\min} C_4H_8O = 0,54 \text{ мДж}$) та на 26,6 % ($E_{\min} C_4H_9Cl = 1,24 \text{ мДж}$). За умови підвищення початкової температури горючих сумішей їх мінімальна енергія запалювання зменшується.

§ 2. Визначення спроможності розжарених тіл до підпалювання

Дуже часто в технологічних процесах виробництва джерелом запалювання виступають розжарені тіла, нагріті до температури, достатньої для підпалювання інших горючих речовин та матеріалів [1], [3], [11], [25].

Температура запалювання – це критична температура нагрітого тіла, за якої досягається рівновага між тепловиділенням при окисненні горючої речовини у пристінному шарі горючої суміші і тепловіддачею в навколишню холодну суміш [26].

Розжарені тіла можуть виникати внаслідок нагрівання певних частин технологічного обладнання чи конструкцій відкритим полум'ям, внаслідок теплових проявів механічної енергії (поява всередині горючого середовища фрикційних іскор, що представляють собою шматочки металу, відірвані, нагріті і частково окиснені при механічному ударі, поверхонь, нагрітих внаслідок тертя), теплових проявів електричної енергії (нагріті поверхні ламп накаливання, розжарені краплі металу, що утворюються під час електрозварювальних робіт, короткого замикання тощо). Джерелом запалювання можуть виступати також розжарені продукти горіння – іскри топок та двигунів.

Запалювання газоповітряної суміші розжареним тілом у вигляді металеві кулі радіусом r можливе, якщо:

$$r_{\text{дз}} \geq \sqrt{\frac{E_{\text{акт}} \lambda (T_{\text{зап}} - T_0)^2}{2Q_{\text{н}} \omega_{\text{хр}} R T_{\text{зап}}^2}},$$

де $E_{\text{акт}}$ – енергія активації реакції горіння;
 λ – коефіцієнт теплопровідності газової суміші;
 $T_{\text{зап}}$ – температура запалювання;
 T_0 – початкова температура газової суміші;
 Q_n – нижча теплота згоряння горючої речовини;
 R – універсальна газова стала;
 $\omega_{\text{хр}}$ – швидкість хімічної реакції окиснення.

Температура запалювання (температура розжареного тіла) повинна забезпечити необхідний початковий запас тепла у прогрітому шарі горючого газу [26]. На $T_{\text{зап}}$ впливають фактори, які характеризують:

1) вид горючої речовини:

- теплотворна здатність ($Q_n \uparrow T_{\text{зап}} \downarrow$);
- агрегатний стан (найменша $T_{\text{зап}}$ у горючих газів, найбільша – у твердих горючих матеріалів);

2) склад горючої суміші:

- концентрація O_2 в окиснювальному середовищі ($\phi_{O_2} \uparrow T_{\text{зап}} \downarrow$);
- домішки негорючих газів ($\phi_{\text{нг}} \uparrow T_{\text{зап}} \uparrow$);
- концентрація горючої речовини ($\phi_{\text{гр}} = \phi_{\text{стм}}, T_{\text{зап, min}}$);

3) умови, в яких знаходиться горюча суміш:

- початкова температура суміші ($T_0 \uparrow T_{\text{зап}} \downarrow$);
- тиск, під яким знаходиться горюча суміш ($P \uparrow T_{\text{зап}} \downarrow$);
- швидкість руху газової суміші ($v_{\text{руху}} \uparrow T_{\text{зап}} \uparrow$);

4) властивості самого джерела запалювання:

- теплоємність матеріалу ($c_p \downarrow T_{\text{зап}} \uparrow$);
- розміри нагрітого тіла ($d_{\text{дз}} \uparrow T_{\text{зап}} \downarrow$);
- загальна площа поверхні нагрітих тіл ($S \downarrow T_{\text{зап}} \uparrow$).

За збільшення часу контакту джерела запалювання з горючою системою температура запалювання знижується аж до температури самоспалахування.

Іскри різного походження мають різні початкові температури та характерні розміри (табл. 2.8).

Таблиця 2.8 – Характерні температура та діаметр іскор різного походження

Походження іскри	Температура іскри, °С	Діаметр іскри, мм
іскри електрозварювальних робіт	4000	5
іскри короткого замкнення електропроводки	2500	3
іскри механічного походження	$t_{пл.}$ найбільш легкоплавкого металу	0,5÷1

Теплофізичні характеристики металів, що є найбільш поширеними у техніці, наведені у таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Фізичні константи деяких металів

Метал	$t_{пл.}$, °С	$\Delta H_{кр.}$, кДж·кг ⁻¹	λ , Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	c_p , Дж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹	ρ , кг·м ⁻³
чавун	1200	225	52	420	7270
сталь	1375	318	58	678	7860
залізо	1539	277	67,5	577	7600
алюміній	660	397	210	1140	2550
мідь	1083	205	396	456	8700

Виходячи з достатньо великих початкових температур *фрикційних іскор* або *крапель розплавленого металу*, що утворюються під час електрозварювальних робіт чи короткого замикання електропроводки, можна було б припустити, що вони можуть запалити будь-які горючі системи, але на практиці це відбувається не завжди, а тільки у тих випадках, коли іскра, що утворилася, має достатній запас енергії.

Запалювальна здатність фрикційних іскор залежить від хімічного складу матеріалів, що беруть участь у терті, від режиму їх механічної взаємодії, а також від властивостей горючої системи, в якій можуть виникати такі іскри.

Спроможність іскор різного походження до підпалювання визначають за стандартом [31]. Визначення імовірності запалювання розжареними тілами зводиться до порівняння кількості тепла, що віддається іскрою для нагрівання горючої суміші від початкової температури до температури самоспалахування, з мінімальною енергією запалювання даної горючої системи.

Запас енергії іскри E_i залежить від її маси (визначається розміром d_i та густиною металу), а також від температури, з якою іскра потрапляє в горюче середовище. Кількість тепла, що віддається розжареною іскрою горючій системі, визначають із рівняння:

$$E_i = m_i c_p (T_i - T_{cc}), \quad (2.43)$$

де m_i – маса іскри;

c_p – теплоємність металу, з якого утворилася іскра;

T_i – температура іскри, з якою вона потрапляє в горюче середовище;

T_{cc} – температура самоспалахування горючої речовини.

На практиці геометричні розміри розжарених крапель визначаються дослідним шляхом. За неможливості практичного визначення розмірів крапель допускається приймати їх відповідно до табл. 2.8.

Для визначення температури, з якою іскра потрапляє в горюче середовище, необхідно враховувати, що перш ніж потрапити у горючу суміш, іскра при

проходженні через холодне навколишнє середовище буде остигати за рахунок конвекційної тепловіддачі. Ступінь охолодження іскри визначається загальним часом її польоту, теплофізичними характеристиками металу та умовами теплообміну.

Час польоту іскри залежить від її швидкості і траєкторії польоту. Якщо розглядати вільне падіння іскри, то час польоту іскри дорівнює:

$$\tau_{\text{пол}} = \frac{H}{v_i} = \frac{H}{0,5\sqrt{2gH}}, \quad (2.44)$$

де H – відстань, яку пролітає іскра до моменту потрапляння у горючу суміш;

$v_i = 0,5\sqrt{2gH}$ – середня швидкість польоту іскри;

g – прискорення вільного падіння.

Коефіцієнт конвекційної тепловіддачі під час руху сферичного тіла у повітрі визначають за формулою:

$$\alpha_k = \text{Nu} \frac{\lambda_{\text{пов}}}{d_i} = 0,62\sqrt{\text{Re}} \frac{\lambda_{\text{пов}}}{d_i},$$

де Nu – критерій Нуссельта;

$\lambda_{\text{пов}} = 22 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ – коефіцієнт теплопровідності повітря;

d_i – діаметр іскри, м;

$\text{Re} = \frac{v_i d_i}{\nu_{\text{пов}}}$ – число Рейнольдса;

$\nu_{\text{пов}} = 15,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря за температури 20°C .

Після підстановки чисельних значень коефіцієнт

конвекційної тепловіддачі можна визначити за формулою:

$$\alpha_K = 3,52 \sqrt{\frac{v_i}{d_i}}, \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}. \quad (2.45)$$

Якщо прийняти, що в момент утворення іскри метал знаходиться в розплавленому стані, то під час польоту будуть проходити процеси охолодження іскри від початкової температури до температури кристалізації (плавлення), а потім ще деякий час буде відбуватися процес фазового переходу – кристалізації, після чого відбувається остигання вже твердої іскри.

Час, який іскра знаходиться в розплавленому стані, можна визначити за формулою:

$$\tau_{\text{розпл}} = \frac{c_p^{\text{розпл}} m_i}{\alpha_K S_i} \ln \frac{T_{\text{поч}} - T_0}{T_{\text{пл}} - T_0}, \text{ с}, \quad (2.46)$$

де S_i – площа поверхні іскри, м^2 ; для іскри сферичної форми $S_i = \pi d^2$;

$c_p^{\text{розпл}}$ – питома теплоємність іскри у розплавленому стані, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$;

$T_{\text{поч}}$ – початкова температура іскри, К ;

$T_{\text{пл}}$ – температура плавлення іскри, К ;

T_0 – температура повітря, К .

Час, за який відбудеться кристалізація, дорівнює:

$$\tau_{\text{кр}} = \frac{m_i \Delta H_{\text{пл}}}{\alpha_K S_i (T_{\text{пл}} - T_0)}, \text{ с}, \quad (2.47)$$

де $\Delta H_{\text{пл}}$ – питома теплота плавлення, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Зміну температури іскри у часі представлено на графіку (рис. 2.2).

Залежно від часу польоту іскри можна визначити її кінцеву температуру, з якою іскра потрапить в горючу суміш. Для цього необхідно порівняти час польоту іскри з часом її перебування у розплавленому стані та періодом кристалізації.

Якщо іскра досягла горючої речовини в розплавленому стані ($\tau_{\text{пол}} < \tau_{\text{розпл}}$), її температуру визначають за формулою:

$$T_i = T_0 + (T_{\text{поч}} - T_0) \exp\left(-\frac{\tau_{\text{пол}} \alpha_k S_i}{c_p^{\text{розпл}} m_i}\right). \quad (2.48)$$

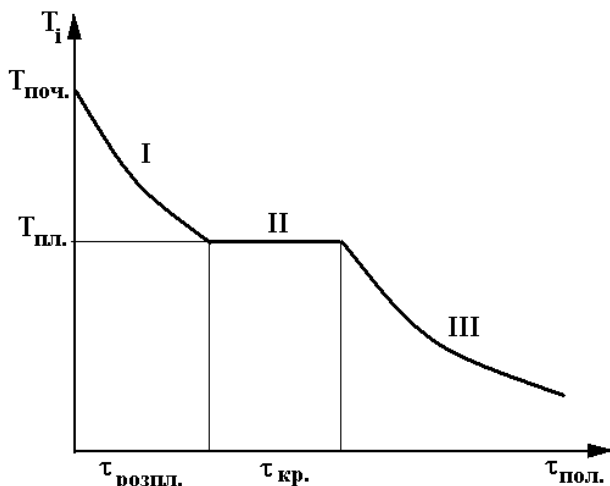


Рис. 2.2 – Зміна температури іскри T_i (краплі розплавленого металу) з часом польоту $\tau_{\text{пол}}$:

- I – іскра знаходиться у розплавленому стані;
- II – перехід іскри із розплавленого стану у твердий (кристалізація);
- III – іскра знаходиться у твердому стані.

Під час кристалізації ($\tau_{кр} > \tau_{пол} > \tau_{розпл}$) температура іскри залишається незмінною і дорівнює температурі плавлення металу, з якого отримано іскру:

$$T_i = T_{пл}. \quad (2.49)$$

Після кристалізації ($\tau_{пол} > \tau_{кр} + \tau_{розпл}$) відбувається охолодження іскри у твердому стані; при цьому температуру іскри в кінці польоту можна визначити за формулою:

$$T_i = T_0 + (T_{пл} - T_0) \exp \left(- \frac{(\tau_{пол} - (\tau_{кр} + \tau_{розпл})) \alpha_k S_i}{c_p^{ТВ} m_i} \right), \quad (2.50)$$

де $c_p^{ТВ}$ – питома теплоємність іскри у твердому стані, Дж·кг⁻¹·К⁻¹.

Якщо енергія іскри, визначена за формулою (2.43), буде перевищувати мінімальну енергію запалювання для даної горючої речовини, вважають, що горюча система може бути запалена й іскра є джерелом запалювання.

При визначенні пожежонебезпеки іскор топок та вихлопних труб двигунів слід враховувати, що джерелом запалювання можуть бути іскри, які за діаметра 2 мм мають температуру 1000 °С, 3 мм – 800 °С, 5 мм – 600 °С.

Для визначення спроможності *нагрітих поверхонь технологічного обладнання* до запалювання необхідно порівняти температуру поверхні обладнання з температурою самоспалахування речовини, що використовується, відповідно до стандарту [31].

Температуру нагрівання електричного дроту при виникненні перевантаження розраховують за формулою:

$$t_{\text{ел}} = t_{\text{сн}} + \left(\frac{I_{\Phi}}{I_{\text{доп}}} \right) (t_{\text{елн}} - t_{\text{сн}}), \quad (2.51)$$

де $t_{\text{ел}}$ – фактична температура електричного дроту, °С;
 $t_{\text{сн}}$ – нормативна температура середовища для прокладки електричного дроту, °С [32];
 $t_{\text{елн}}$ – нормативна температура електричного дроту, °С;
 I_{Φ} – фактичний струм в електричному дроті, А;
 $I_{\text{доп}}$ – допустимий електричний струм в електричному дроті, А.

Температуру нагрівання підшипника ковзання за відсутності мастила та примусового охолодження, температуру нагрівання стрічки транспортера при пробуксовуванні, температуру нагрівання електричних контактів розраховують за формулою:

$$t_{\text{нагр}} = t_{\text{с}} + \frac{P}{\alpha_{\text{заг}} S} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_{\text{ст.нагр}}}} \right), \quad (2.52)$$

де $t_{\text{нагр}}$ – температура нагрівання поверхні, °С;
 $t_{\text{с}}$ – температура середовища, °С;
 P – потужність нагрівання, Вт:
 • при нагріванні електричних контактів:

$$P = I_{\Phi} \sum U_i; \quad (2.53)$$

• при нагріванні підшипника ковзання:

$$P = \pi d f N n ; \quad (2.54)$$

$I_{\text{ф}}$ – фактичний електричний струм через контакт, А;
 U_i – падіння напруги на кожному електричному контакті, В;

f – коефіцієнт тертя ковзання;

N – радіальна сила, що діє на підшипник, або сила натягу стрічки, Н;

d – діаметр вала або діаметр барабана транспортера, м;

n – частота обертання вала, с^{-1} ;

$\alpha_{\text{заг}}$ – загальний коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт м}^{-2} \text{К}^{-1}$, який визначають за формулою:

$$\text{якщо } t_{\text{нагр}} \leq 60 \text{ } ^\circ\text{C}: \quad \alpha_{\text{заг}} = 4,07 \cdot \sqrt[3]{t_{\text{нагр}} - t_{\text{с}}}, \quad (2.55)$$

$$\text{якщо } t_{\text{нагр}} > 60 \text{ } ^\circ\text{C}: \quad \alpha_{\text{заг}} = 11,63 e^{0,023 t_{\text{нагр}}}. \quad (2.56)$$

Температура $t_{\text{нагр}}$ береться у першому наближенні для циклічного розрахунку методом послідовних наближень, поки різниця між прийнятою і розрахованою величинами не перевищуватиме 5 %.

S – площа поверхні теплообміну, м^2 ;

τ – фактичний час роботи, с;

$$\tau_{\text{ст.нагр}} = \frac{c_p m}{\alpha_{\text{заг}} S} - \text{стала часу нагрівання, с;}$$

c_p – питома масова теплоємність металу, $\text{Дж кг}^{-1} \text{К}^{-1}$;

m – маса металу, кг.

Практично, при $\tau = 5\tau_{\text{ст.нагр}}$ температура нагрівання поверхні досягає максимального значення, яке

розраховують за формулою:

$$t_{\max} \approx t_c + \frac{P}{\alpha_{\text{зар}} S}. \quad (2.57).$$

У деяких випадках джерелом запалювання при контакті з горючими матеріалами можуть виступати тіла, нагріті відкритим полум'ям чи продуктами горіння. Особливо небезпечними є електрогазозварювальні ремонтні роботи металевих конструкцій. У цьому випадку температура тіла буде зростати не тільки в місці, на яке впливає тепловий імпульс, але і на певній відстані за рахунок високої теплопровідності металу (див. рис. 2.3).

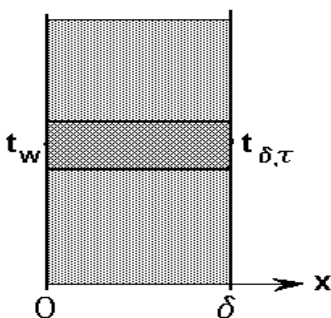


Рис. 2.3 – Зміна температури тіла, що проходить через шар теплоізоляції

Як відомо [11], температуру тіла на відстані δ від місця впливу теплового імпульсу через час τ можна розрахувати за формулою:

$$\frac{t_w - t_{\delta, \tau}}{t_w - t_0} = \text{erf}(A),$$

або
$$t_{\delta, \tau} = t_w - (t_w - t_0) \text{erf}(A), \quad (2.58)$$

де $t_{\delta, \tau}$ – температура тіла на відстані δ через час τ ;
 t_w – стала температура поверхні тіла, на яку діє тепловий імпульс;

t_0 – початкова температура тіла;

$\text{erf}(A)$ – функція Крампа, що визначають за таблицею 8 додатків.

Аргумент функції Крампа A визначається співвідношенням:

$$A = \frac{\delta}{2\sqrt{a_t \tau}}, \quad (2.59)$$

де $a_t = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ – коефіцієнт теплопровідності.

Виходячи з рівнянь (2.58) та (2.59), можна визначити критичний час $\tau_{кр}$, через який температура тіла на заданій відстані досягне критичного значення. Для цього спочатку необхідно розрахувати функцію Крампа, що відповідає критичній температурі, визначити критичне значення аргументу $A_{кр}$ за таблицею 8 додатків і розрахувати критичний час:

$$\frac{t_w - t_{кр}}{t_w - t_0} = \text{erf}(A_{кр}), \quad A_{кр} = \frac{\delta}{2\sqrt{a_t \tau_{кр}}};$$

$$\tau_{кр} = \frac{\delta^2}{4a_t A_{кр}^2}. \quad (2.60)$$

Методика визначення спроможності електричних і фрикційних іскор до підпалювання

1. Визначити критичну температуру виникнення горіння (температуру самоспалахування t_{cc} газо- чи пароповітряної суміші або температуру тління $t_{гд}$ твердих горючих матеріалів) та мінімальну енергію запалювання E_{min} горючого матеріалу за довідником [7] або за таблицями 9, 12, 13 додатків.

2. За видом іскри визначити її максимальну температуру, діаметр, теплофізичні параметри (таблиці 2.8, 2.9).

3. Розрахувати масу іскри за формулою:

$$m_i = \frac{\pi}{6} d_i^3 \rho_i.$$

4. Розрахувати час польоту іскри за формулою (2.44).

5. Розрахувати коефіцієнт конвекційної тепловіддачі за формулою (2.45).

6. Розрахувати площу поверхні іскри та час, який іскра знаходиться у розплавленому стані, та час, за який відбудеться кристалізація, за формулами (2.46), (2.47).

7. Залежно від співвідношення між часом польоту іскри $\tau_{пол}$ та часом її перебування у розплавленому стані $\tau_{розпл}$ і періодом кристалізації $\tau_{кр}$ розрахувати температуру іскри за однією із формул (2.48), (2.49) або (2.50).

8. Розрахувати кількість тепла, що виділяється при охолодженні іскри, за формулою (2.43).

9. Порівняти енергію іскри з мінімальною енергією запалювання горючої речовини та зробити висновок щодо можливості запалювання матеріалу.

Приклад розв'язання задачі

Визначити можливість запалювання сіна при короткому замиканні алюмінієвих дротів, що проходять на висоті 2 м.

Розв'язання

1. Визначаємо параметри запалювання сіна за довідником [7]: $t_{пл} = 204 \text{ }^\circ\text{C}$, $E_{мин} = 260 \text{ мДж}$.

2. Визначаємо максимальну температуру і діаметр іскри короткого замикання та теплофізичні характеристики алюмінію:

$$t_{поч} = 2500 \text{ }^\circ\text{C} = 2773 \text{ К}; d_i = 3 \text{ мм} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}; t_{пл} = 660 \text{ }^\circ\text{C}; \\ \rho_i = 2550 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}; c_p^{розпл} = 1140 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}.$$

3. Розраховуємо масу іскри:

$$m_i = \frac{3,14}{6} (3 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 2550 = 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ кг}.$$

4. Розраховуємо час польоту іскри:

$$v_i = 0,5 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 2} = 3,16 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$\tau_{пол} = \frac{2}{3,16} = 0,6 \text{ с}.$$

5. Розраховуємо коефіцієнт конвекційної тепловіддачі:

$$\alpha = 3,52 \sqrt{\frac{3,16}{3 \cdot 10^{-3}}} = 114,2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}.$$

6. Розраховуємо площу поверхні іскри та час, який

іскра знаходиться у розплавленому стані:

$$S_i = 3,14 \cdot 9 \cdot 10^{-6} = 28 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$
$$\tau_{\text{розпл}} = \frac{1140 \cdot 3,6 \cdot 10^{-5}}{114,2 \cdot 28 \cdot 10^{-6}} \ln \frac{2500 - 20}{660 - 20} = 17,3 \text{ с.}$$

7. Оскільки $\tau_{\text{пол}} < \tau_{\text{розпл}}$, кристалізація металу під час польоту не відбудеться. Розраховуємо температуру іскри за формулою (2.48):

$$T_i = 293 + (2773 - 293) \exp\left(-\frac{0,6 \cdot 114,2 \cdot 28 \cdot 10^{-6}}{1140 \cdot 3,6 \cdot 10^{-5}}\right) = 2744 \text{ К};$$

$$t_i = 2744 - 273 = 2471 \text{ }^\circ\text{С.}$$

8. Розраховуємо кількість тепла, що виділяється під час охолодження іскри, за формулою (2.43):

$$E_i = 3,6 \cdot 10^{-5} \cdot 1140 (2471 - 204) = 93 \text{ Дж.}$$

9. Оскільки $E_i = 93 \text{ Дж} > E_{\text{min}} = 0,26 \text{ Дж}$, запалювання сіна іскрою короткого замикання дротів з алюмінію можливе.

Методика визначення спроможності розжарених поверхонь технологічного обладнання до підпалювання

1. Визначити критичну температуру виникнення горіння горючого матеріалу (температура самоспалахування t_{cc} або температура тління $t_{тл}$) за довідником [7] або за таблицями 9, 12, 13 додатків.

2. Розрахувати потужність нагрівання за формулою (2.53) або (2.54).

3. Прийняти температуру нагрівання поверхні у першому наближенні та розрахувати коефіцієнт тепловіддачі за формулою (2.55) або (2.56).

4. Розрахувати сталу часу нагрівання за формулою:

$$\tau_{ст.нагр} = \frac{c_p m}{\alpha_{заг} S}, \text{ с.}$$

5. Порівняти сталу часу нагрівання з фактичним часом роботи та розрахувати максимальну температуру нагрівання поверхні за формулою (2.52) або (2.57).

6. Порівняти отримане значення температури нагрівання поверхні з величиною, прийнятою у першому наближенні. Якщо розрахована температура нагрівання відрізняється більше, ніж на 5 % від узятій у першому наближенні, повторити розрахунок, узявши отриману температуру у другому наближенні.

7. Порівняти розраховану температуру нагрівання поверхні з температурою самоспалахування матеріалу, що використовується, та зробити висновок щодо можливості запалювання горючої речовини.

Приклад розв'язання задачі

Розрахувати температуру сталевого підшипника ковзання масою 100 г при аварійній роботі насоса у випадку порушення процедури змащення поверхонь протягом 300 с. Зробити висновок, чи може даний підшипник стати джерелом запалювання для пароповітряної суміші бензину АІ-93 за температури повітря $t_c = 20^\circ\text{C}$, якщо частота обертання вала $n = 20\text{ с}^{-1}$, діаметр вала $d = 0,04\text{ м}$, коефіцієнт тертя сталь-сталь без оливи $f = 0,15$, поверхня теплообміну підшипника з повітрям $S = 0,1\text{ м}^2$, радіальна сила, що діє на підшипник, $N = 3600\text{ Н}$.

Розв'язання

1. Визначаємо температуру самоспалахування бензину за довідником [7]: $t_{cc\text{AI-93}} = 380^\circ\text{C}$.

2. Розраховуємо потужність нагрівання підшипника за рахунок тертя за формулою (2.54):

$$P = 3,14 \cdot 0,04 \cdot 0,15 \cdot 3600 \cdot 20 = 1356,5\text{ Вт.}$$

3. Визначаємо загальний коефіцієнт тепловіддачі у першому наближенні.

Приймемо $t_{\text{нагр}} = 440^\circ\text{C}$, отже, оскільки $t_{\text{нагр}} > 60^\circ\text{C}$, коефіцієнт тепловіддачі розраховуємо за формулою (2.56):

$$\alpha_{\text{заг}} = 11,63e^{0,023 \cdot 440} = 32\text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}.$$

4. Розраховуємо сталу часу нагрівання підшипника, враховуючи, що питома масова теплоємність сталі

$$c_p = 678 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}:$$

$$\tau_{\text{ст.нагр}} = \frac{678 \cdot 0,1}{32 \cdot 0,1} = 21 \text{ с.}$$

5. Оскільки час аварійної роботи насоса дорівнює 300 с, це більше, ніж $5 \cdot 21 = 105$ с, отже розраховуємо максимальну температуру підшипника за формулою (2.57):

$$t_{\text{max}} \approx 20 + \frac{1356,5}{32 \cdot 0,1} = 443,9 \text{ }^\circ\text{C.}$$

6. Розрахована температура нагрівання підшипника не відрізняється більше, ніж на 5 % від узятого у першому наближенні значення, отже похибка розрахунку лежить у допустимих межах.

7. Визначаємо спроможність підшипника до запалювання пари бензину у суміші з повітрям:

$$t_{\text{ссAI-93}} = 380 \text{ }^\circ\text{C} < t_{\text{нагр}} = 443,9 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Отже за даних умов перегрів підшипника може викликати запалювання пари бензину.

Методика визначення спроможності до підпалювання тіл, нагрітих продуктами згорання

1. Визначити критичну температуру виникнення горіння горючого матеріалу (тління $t_{\text{тл}}$ або самоспалахування $t_{\text{сc}}$) за довідником [7] або за таблицями 9, 12, 13 додатків.

2. Визначити за табл. 2.9 або довідником [9] теплофізичні характеристики металу, який нагрівають: густину ρ , питому масову теплоємність c_p , коефіцієнт теплопровідності λ , температуру плавлення $t_{\text{пл}}$.

3. Розрахувати коефіцієнт температуропровідності металу за формулою:

$$a_t = \frac{\lambda}{\rho c_p}. \quad (2.61)$$

4. Розрахувати аргумент функції Крампа за формулою (2.59).

5. Визначити функцію Крампа $\text{erf}(A)$ за таблицею 8 додатків.

6. Розрахувати температуру тіла, що нагрівається, на відстані δ через час τ за формулою (2.58).

7. Порівняти розраховану температуру нагріву поверхні з критичною температурою виникнення горіння матеріалу, що знаходиться в контакт з нагрітим тілом, та зробити висновок щодо можливості запалювання горючої речовини.

8. Розрахувати функцію Крампа, що відповідає критичній температурі виникнення горіння горючого матеріалу, визначити критичне значення аргументу $A_{\text{кр}}$ за таблицею 8 додатків і розрахувати критичний час, через який температура тіла на заданій відстані досягне критичного значення, за формулою (2.60).

Приклад розв'язання задачі

У приміщенні проводяться вогневі роботи з різання каналізаційної труби із сірого чавуну, яка проходить через стінку товщиною 0,2 м в суміжне приміщення і стикається з дерев'яними конструкціями. Визначити температуру металеві труби на виході зі стіни у суміжне приміщення через 20 хвилин теплового впливу, якщо початкова температура труби становила 20 °С. З'ясувати, чи може нагрівання труби призвести до виникнення горіння дерев'яного перекриття. Визначити час, через який у сусідньому приміщенні за даної товщини стінки стає можливим виникнення горіння.

Розв'язання

1. Визначаємо за довідником [7] температуру тління деревини: $t_{\text{пл}} = 265 \text{ }^\circ\text{C}$.

2. Визначаємо за табл. 2.9 теплофізичні характеристики сірого чавуну: $c_p = 420 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; $\rho = 7200 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$; $t_{\text{пл}} = 1200 \text{ C}$; $\lambda = 52 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

3. Розраховуємо коефіцієнт температуропровідності сірого чавуну за формулою (2.61):

$$a_t = \frac{52}{7200 \cdot 420} = 1,72 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}.$$

4. Розраховуємо аргумент функції Крампа за формулою (2.59):

$$A = \frac{0,2}{2\sqrt{1,72 \cdot 10^{-5} \cdot 1200}} = 0,696.$$

5. Визначаємо функцію Крампа $\text{erf}(A)$ за

таблицею 8 додатків: $\text{erf}(0,696) = 0,6778$.

6. Розраховуємо за формулою (2.58) температуру труби на відстані 0,2 м через 20 хвилин проведення вогневих робіт, враховуючи, що температура нагрівання труби в місці дії газового різача дорівнює температурі плавлення сірого чавуну $t_w = 1200$ °С:

$$t_{\delta, \tau} = 1200 - 0,6778(1200 - 20) = 400 \text{ °С.}$$

7. Оскільки розрахована температура нагріву труби 400 °С є вищою за температуру тління деревини 265 °С, запалювання дерев'яного перекриття, через яке проходить труба, після 20 хв. проведення вогневих робіт можливе.

8. Розраховуємо критичний час, через який температура труби із сірого чавуну на відстані 0,2 м досягне критичного значення 265 °С, за формулою (2.60):

$$\frac{t_w - t_{\text{кр}}}{t_w - t_0} = \frac{1200 - 265}{1200 - 20} = 0,792;$$

$$\text{erf}(A_{\text{кр}}) = 0,792, \quad A_{\text{кр}} = 0,89;$$

$$\tau_{\text{кр}} = \frac{0,20^2}{4 \cdot 1,72 \cdot 10^{-5} \cdot 0,89^2} = 734 \text{ с.}$$

Висновок: під час проведення вогневих робіт із різання каналізаційної труби, яка стикається з дерев'яними конструкціями в суміжному приміщенні, нагрівання труби може призвести до виникнення горіння вже через 734 с.

§ 3. Визначення можливості підпалювання горючих речовин променистим потоком тепла від полум'я

У самостійну групу джерел запалювання виділяють відкрите полум'я та розжарені продукти горіння, які є небезпечними не тільки під час безпосереднього контакту з горючою системою, через те що температура полум'я завжди є вищою за температуру самоспалахування більшості горючих речовин, але і внаслідок випромінювання тепла, що може нагріти горючу систему до критичної температури (температури самоспалахування або тління) [11], [22], [25].

Пожежна небезпека полум'я зумовлена інтенсивністю теплового впливу (густиною теплового потоку), який визначається температурою зони горіння, площею теплосприйняття горючої речовини (взаємним розташуванням) та часом впливу на горючу систему.

Густину теплового потоку визначають за формулою:

$$q = \varepsilon \sigma (T_{\text{пол}}^4 - T_{\text{гр}}^4) \Psi, \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}, \quad (2.62)$$

де ε – приведений ступінь чорноти системи «полум'я – поверхня горючої речовини» (відносний коефіцієнт теплового випромінювання);

σ – стала випромінювання Больцмана;

$T_{\text{пол}}$ – температура полум'я;

$T_{\text{гр}}$ – температура поверхні горючої речовини;

Ψ – кутовий коефіцієнт опромінювання.

У загальному випадку приведений ступінь чорноти системи ε залежить від ступеня чорноти поверхонь факела (ε_1) і тіла, що опромінюється, (ε_2), а також від

взаємного розташування цих тіл. У більшості ситуацій (за умови просторового рознесення тіл) приведений ступінь чорноти такої системи дорівнює:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \varepsilon_2. \quad (2.63)$$

Типові значення ступеня чорноти деяких матеріалів та полум'я при горінні різних речовин наведені у табл. 2.10.

Таблиця 2.10 – Ступінь чорноти деяких матеріалів та полум'я при горінні різних речовин

Матеріали	Ступінь чорноти
сталь (за температури 200–600 °С)	0,8
сталь (за температури 900–1100 °С)	0,56
чавун (за температури 200–600 °С)	0,7
бетон (за температури 1000 °С)	0,63
цегла (за температури 11000 °С)	0,8
деревина (за температури 20 °С)	0,85
папір (за температури 20 °С)	0,85
гума (за температури 20 °С)	0,9
Вид полум'я	
безбарвне полум'я газів	0,3
полум'я газових фонтанів	0,4
полум'я вугілля	0,5
полум'я деревини, торфу	0,7
полум'я мазуту	0,85
полум'я бензину	0,95 – 0,99

У табл. 2.11 наведені типові середні температури дифузійного полум'я деяких матеріалів.

Таблиця 2.11 – Температури полум'я деяких матеріалів або пожежонебезпечних операцій

Матеріал, що горить, пожежонебезпечна операція	Температура полум'я (*гління), °С
горючі рідини	880 – 1000
деревина, пиломатеріали	1000 – 1100
природні та зріджені гази	1200 – 1500
газова зварка	3150
газова різка металу	1350
цигарка, сигарета	320 – 460*
сірник	620 – 640

Кутовий коефіцієнт опромінювання Ψ визначають з припущення, що поверхня випромінювача (полум'я) є прямокутною, площа якого є паралельною площині опромінювання. Розрахунок коефіцієнта опромінювання виконують, розбиваючи площину випромінювача на базові прямокутники, і представляють шуканий коефіцієнт опромінювання як суму базових коефіцієнтів опромінювання ψ' (рис. 2.4).

Базовий коефіцієнт ψ' розраховують за формулою:

$$\psi' = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{a}{\sqrt{a^2 + r^2}} \arctg \frac{b}{\sqrt{a^2 + r^2}} + \frac{b}{\sqrt{b^2 + r^2}} \arctg \frac{a}{\sqrt{b^2 + r^2}} \right], \quad (2.64)$$

де a, b – розміри базового прямокутника, на які розбивають площину випромінювача (рис. 2.4);

r – відстань між площинами 1 та 2.

Арктангенс у формулі (2.64) вимірюють у радіанах.

За великих відстаней між поверхнями 1 та 2, тобто за умов $r \gg a$ та $r \gg b$, з відносною точністю функцію ψ' можна розрахувати за формулою:

$$\psi' = \frac{ab}{\pi r^2}. \quad (2.65)$$

Розрахувавши величину теплового потоку за формулою (2.62), можна знайти температуру на поверхні тіла, що опромінюється, через заданий проміжок часу:

$$t(\tau) = t_0 + 2 \frac{q}{\lambda} \sqrt{\frac{a_t \tau}{\pi}}. \quad (2.66)$$

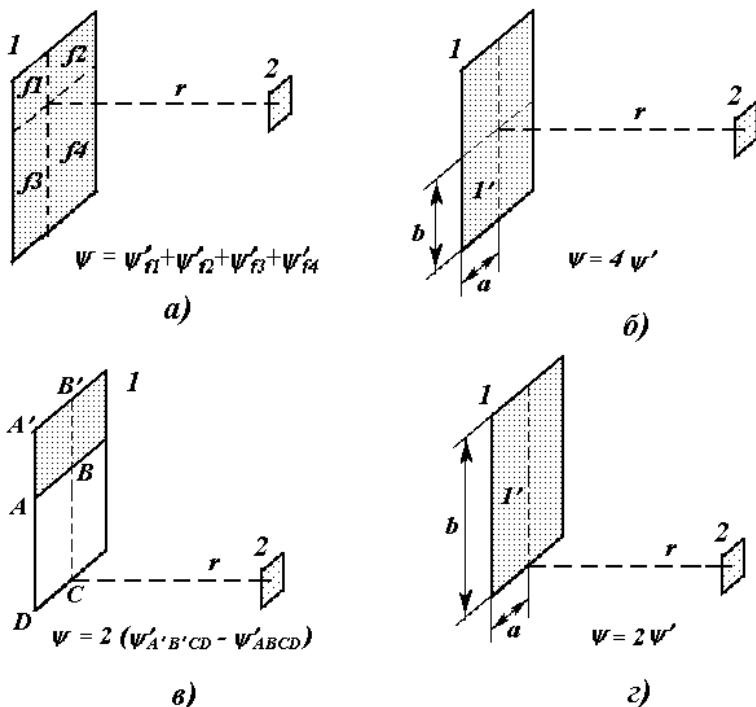


Рис. 2.4 – Схема базової задачі променистого теплообміну
 а) – г) – варіанти взаємного розташування випромінювача та об'єкта, що опромінюється; 1 – базова площина випромінювача; 2 – об'єкт, що опромінюється

Існує взаємозв'язок між значенням густини теплового потоку і часом, через який може виникнути горіння речовин (температура поверхні тіла досягне критичного значення):

$$\tau_{\text{кр}} = \frac{\pi \lambda^2 (t_{\text{кр}} - t_0)^2}{4a_t q^2}. \quad (2.67)$$

Експериментальні значення критичної густини теплового потоку $q_{\text{кр}}$ за певного часу опромінювання для деяких горючих матеріалів наведені у таблиці 2.12.

Таблиця 2.12 – Критична густина теплового потоку $q_{\text{кр}}$ залежно від часу опромінювання для різних речовин

Речовина	$q_{\text{кр}}$ за тривалості опромінювання, кВт·м ⁻²		
	3 хв.	5 хв.	15 хв.
деревина	18,8	16,9	13,9
торф	16,6	14,3	9,8
бавовна	11,0	9,7	7,5
пластик	21,6	19,1	15,4
гума	22,6	19,2	14,8
вугілля	–	35,0	35,0

Методика визначення спроможності теплового потоку полум'я до підпалювання горючих речовин

1. Визначити критичну температуру виникнення горіння матеріалу (температуру самоспалахування $t_{\text{сс}}$ або температуру тління) за довідником [7] або за таблицями 9, 12, 13 додатків.

2. Визначити температуру факела полум'я за табл. 2.11 або за розрахунком (див. розділ I, глава 2, §3).

3. Розрахувати приведений ступінь чорноти за формулою (2.63) з урахуванням даних табл. 2.10.

4. Розрахувати базовий коефіцієнт опромінювання елементарної частини факела полум'я ψ' за формулами (2.64) або (2.65).

5. Залежно від схеми взаємного розташування випромінювача та об'єкта, що опромінюється, розрахувати коефіцієнт опромінення всього факела.

6. Розрахувати густину теплового потоку за формулою (2.62).

7. Розрахувати коефіцієнт теплопровідності матеріалу, що опромінюється, за формулою (2.61).

8. Розрахувати температуру на поверхні тіла, що опромінюється, через заданий проміжок часу за формулою (2.66). Порівняти розраховану температуру тіла з критичною температурою виникнення горіння матеріалу та зробити висновок щодо можливості запалювання.

9. Розрахувати час, через який температура поверхні тіла досягне критичного значення за даних умов, за формулою (2.67).

Приклад розв'язання задачі

На відстані 30 м від факела газового фонтана знаходиться дерев'яна будівля. Визначити, чи може виникнути горіння будівлі через 30 хвилин, якщо поверхня факела має форму прямокутника розмірами 4х40 м, ступінь чорноти газового фонтана дорівнює 0,4, ступінь чорноти деревини – 0,85. Температура навколишнього середовища дорівнює 20 °С.

Розв'язання

1. Визначаємо за довідником [7] температуру тління

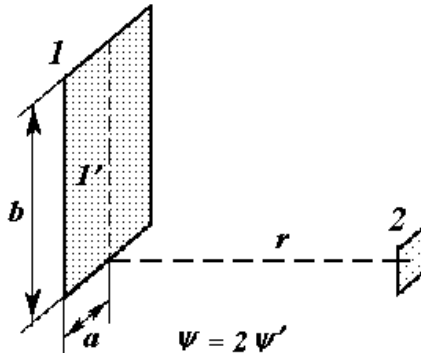
деревини: $t_{\text{пл}} = 250 \text{ }^\circ\text{C} = 523 \text{ K}$.

2. Визначаємо за табл. 2.10 температуру факела полум'я газового фонтана: $t_{\text{пол}} = 1400 \text{ }^\circ\text{C} = 1673 \text{ K}$.

3. Розраховуємо приведеній ступінь чорноти системи «газовий фонтан – деревина» за формулою (2.63) з урахуванням значень ступеня чорноти деревини та полум'я фонтана (табл. 2.10):

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \varepsilon_2 = 0,4 \cdot 0,85 = 0,34.$$

4. Складаємо схему взаємного розташування факела газового фонтана та будівлі, що опромінюється, та розраховуємо базовий коефіцієнт опромінювання елементарної частини факела полум'я ψ' за формулою (2.64).



Розміри базового прямокутника: $a = 2 \text{ м}$; $b = 40 \text{ м}$.

$$\psi' = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \left[\frac{2}{\sqrt{2^2 + 30^2}} \arctg \frac{40}{\sqrt{2^2 + 30^2}} + \frac{40}{\sqrt{40^2 + 30^2}} \arctg \frac{2}{\sqrt{40^2 + 30^2}} \right] = 0,015.$$

5. Розраховуємо коефіцієнт опромінювання всього факела:

$$\psi = 2\psi' = 2 \cdot 0,015 = 0,03.$$

6. Розраховуємо густину теплового потоку на дерев'яну будівлю за формулою (2.62):

$$q = 0,34 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (1673^4 - 523^4) \cdot 0,03 = 4733 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}.$$

7. Розраховуємо коефіцієнт температуропровідності деревини за формулою (2.61) з урахуванням теплофізичних характеристик деревини:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{дерев}} &= 0,17 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}; \quad \rho_{\text{дерев}} = 500 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}; \\ c_{\text{р дерев}} &= 2,8 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}; \\ a_t &= \frac{0,17}{500 \cdot 2,8 \cdot 10^3} = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}.. \end{aligned}$$

8. Розраховуємо температуру на поверхні будівлі через 30 хвилин теплового впливу факела за формулою (2.66):

$$t(30) = 20 + 2 \frac{4733}{0,17} \sqrt{\frac{1,2 \cdot 10^{-7} \cdot 30 \cdot 60}{3,14}} = 482 \text{ }^\circ\text{С}.$$

Таким чином, через 30 хвилин теплового впливу полум'я газового фонтана температура поверхні дерев'яної будівлі досягне 482 °С, що перевищує критичну температуру тління деревини, отже займання будівлі є можливим.

9. Розраховуємо час, через який температура поверхні будівлі досягне температури тління, за формулою (2.67):

$$\tau_{кр} = \frac{3,14 \cdot 0,17^2 (250 - 20)^2}{4 \cdot 1,2 \cdot 10^{-7} \cdot 4733^2} = 446 \text{ с.}$$

Висновок: температура на поверхні дерев'яної будівлі досягне критичного значення виникнення горіння через 446 с теплового впливу факела газового фонтана.

Приклад розв'язання задачі

Металеву піч встановлено на відстані 0,5 м від дощатої дерев'яної стіни. Бокова поверхня печі має розміри 0,8 мх0,6 м. Температура на зовнішній поверхні печі дорівнює 400 °С. Визначити, чи можливе виникнення горіння деревини, що піддається тепловому впливу протягом 2 годин. Температура навколишнього середовища дорівнює 25 °С.

Розв'язання

1. Визначаємо за довідником [7] температуру тління деревини: $t_{тл} = 250 \text{ °С} = 523 \text{ К}$.

2. Розраховуємо приведенний ступінь чорноти системи з урахуванням даних табл. 2.7 за формулою (2.63):

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \varepsilon_2 = 0,8 \cdot 0,85 = 0,68.$$

3. Розраховуємо коефіцієнт опромінювання.

Схема взаємного розташування розжареної поверхні печі та дощатої дерев'яної стіни відповідає

зображеній на рис. 2.4, б.

Розраховуємо базовий коефіцієнт опромінювання ψ' за формулою (2.64). Розміри базового прямокутника: $a = 0,6/2 = 0,3$ м; $b = 0,8/2 = 0,4$ м.

$$\psi' = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \left[\frac{0,3}{\sqrt{0,3^2 + 0,5^2}} \operatorname{arctg} \frac{0,4}{\sqrt{0,3^2 + 0,5^2}} + \frac{0,4}{\sqrt{0,4^2 + 0,5^2}} \operatorname{arctg} \frac{0,3}{\sqrt{0,4^2 + 0,5^2}} \right] = 0,09;$$

$$\psi = 4 \cdot \psi' = 4 \cdot 0,09 = 0,36.$$

4. Розраховуємо густину теплового потоку на дощату стіну за формулою (2.62):

$$q = 0,68 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (673^4 - 523^4) \cdot 0,36 = 1809 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}.$$

5. Розраховуємо температуру на поверхні дощатої стіни через 2 години (7200 с) за формулою (2.66), враховуючи, що коефіцієнт температуропровідності деревини дорівнює $1,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ (див. попередню задачу):

$$t = 25 + 2 \frac{1809}{0,17} \sqrt{\frac{1,2 \cdot 10^{-7} \cdot 7200}{3,14}} = 378 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Таким чином, через 2 години теплового впливу розжареної поверхні печі на дощату дерев'яну стіну температура поверхні стіни досягне $378 \text{ }^\circ\text{C}$, що перевищує критичну температуру тління, отже займання стіни є можливим.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Для речовин, представлених у таблиці, розрахувати мінімальну енергію запалювання та безпечну енергію розряду електрики:

- а) за нормальною швидкістю поширення горіння;
- б) за величиною критичного діаметра зазору.

№	Речовина	$u_{нн}, \text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	БЕМЗ, мм	$t_{сс},$ °C	$t_0,$ °C
1	пропанол	0,49	0,99	371	0
2	хлорбутан	0,34	1,06	460	-5
3	етилен	0,73	0,59	435	20
4	бензин	0,45	0,96	269	-15
5	діетиленоксид	0,52	0,87	250	-10
6	моноетиловий ефір етиленгліколю	0,47	0,64	235	25
7	пентан	0,385	0,93	286	-25
8	пропан	0,39	0,92	470	10
9	пропілен	0,51	0,7	455	5
10	пропіленоксид	0,67	0,7	430	10
11	сірководень	0,41	0,89	246	15
12	сірковуглець	0,59	0,23	102	-30
13	тетрагідрофуран	0,52	0,87	250	0
14	фуран	0,63	0,68	510	-5
15	фуранальдегід	0,87	0,41	298	20
16	фурфурол	0,41	0,87	298	10
17	циклогексан	0,44	0,94	260	25
18	етан	0,48	0,91	515	-15
19	етилацетат	0,39	0,99	446	15
20	етиленоксид	0,9	0,59	430	20

2. Для речовин, що представлені у таблиці, визначити можливість запалювання під час короткого замикання електричних дровів. Початкові умови, параметри дровів і горючого матеріалу вказані у таблиці.

№	Метал дровів	Висота дровів, м	Горючий матеріал	E_{\min} , мДж	t_0 , °C
1	алюміній	9,0	сіно	260,0	20
2	- / -	4,5	казеїн	60	25
3	- / -	2,0	какао	100,0	35
4	- / -	1,0	крохмаль картопляний	45,0	40
5	- / -	3,0	крохмаль пшеничний	25,0	30
6	- / -	1,5	лігнін	20,0	28
7	- / -	2,5	лікоподій	40,0	18
8	- / -	7,0	келлін	4,6	20
9	- / -	6,0	ванадій (порошок)	8,0	23
10	- / -	2,5	гума	50,0	32
11	- / -	3,0	метилцелюлоза	20,0	25
12	- / -	5,0	пшеничне борошно	29,0	35
13	мідь	7,0	поліуретан	15,0	30
14	- / -	9,0	сірка	15,0	20
15	- / -	4,5	бавовна	25,0	23
16	- / -	3,0	целюлоза	25,0	38
17	- / -	3,8	шеллак	10,0	40
18	- / -	4,0	етилцелюлоза	10,0	25
19	- / -	2,0	щрот соняшниковий	13,8	28
20	- / -	1,0	борошно ячне	85,0	30
21	- / -	1,0	карбамід	80,0	20
22	- / -	2,0	кава	30,0	25
23	- / -	1,0	кукурудзяне борошно	80,0	20
24	- / -	2,5	поліпропілен (порошок)	3,4	35
25	- / -	3,0	полістирол	3,4	15

3. Визначити можливість виникнення горіння газо- або пароповітряної горючої суміші при контакті з підшипником ковзання, що працював без оливи та примусового охолодження протягом заданого часу. Площа поверхні підшипника, що омивається повітрям, $S = 0,07 \text{ м}^2$; маса підшипника 100 г, діаметр шийки вала $d = 0,02 \text{ м}$. Умови, за яких відбувається перегрів підшипника, наведені в таблиці.

№	Горюча речовина	Метали, що труться у підшипнику	Час аварійної роботи, с	Радіальна сила, кН	Частота обертання, с^{-1}	Коефіцієнт тертя f	$t_c, ^\circ\text{C}$
1	метан	сталь–сталь	100	2,5	24	0,15	20
2	водень	– // –	120	3,0	27	0,16	25
3	сірководень	– // –	200	3,5	30	0,17	35
4	етилен	– // –	360	4,0	22	0,18	40
5	бензин	сталь–чавун	250	2,8	24	0,19	30
6	стирол	– // –	90	3,8	28	0,20	28
7	толуол	– // –	180	3,1	31	0,15	18
8	сірковуглець	– // –	240	4,2	23	0,16	20
9	ізооктан	сталь–бронза	300	2,2	23	0,17	23
10	н-гексан	– // –	120	2,7	26	0,18	32
11	н-гептан	– // –	60	3,4	29	0,19	25
12	н-бутан	– // –	200	3,6	21	0,20	35
13	ацетон	чавун–бронза	350	4,1	25	0,15	30
14	п-ксилол	– // –	150	3,2	27	0,16	20
15	діетиловий ефір	– // –	100	2,8	32	0,17	23
16	етилцеллозол БВ	– // –	140	3,3	22	0,18	38
17	етилацетат	чавун–чавун	250	2,1	25	0,19	40
18	уайт-спірит	– // –	120	4,3	34	0,20	25
19	циклогексан	– // –	340	2,9	24	0,15	28
20	пропан	– // –	200	3,7	26	0,16	30

4. Для пароповітряної суміші або горючого матеріалу, що під час газозварювальних робіт знаходиться в суміжному приміщенні в контакті з трубою, яка проходить через стінку заданої товщини, визначити:

а) можливість виникнення горіння через заданий час, протягом якого проводилися вогневі роботи (початкова температура задана у таблиці);

б) критичний час, через який у сусідньому приміщенні за даних умов стає можливим виникнення горіння.

№	Горючий матеріал	Матеріал труби	Час теплового впливу, хв	Товщи на стінки, м	t_0 , °C
1	бавовна	чавун	20	0,20	10
2	пентан	- / -	5	0,05	15
3	повсть будівельна	- / -	12	0,10	20
4	фуран	- / -	10	0,15	25
5	плита деревоволокниста	- / -	15	0,25	0
6	етилнітрат	- / -	7	0,07	5
7	тирса соснова	- / -	3	0,20	10
8	циклогексан	сталь	14	0,05	15
9	етилкарбінол	- / -	25	0,10	20
10	сіно	- / -	20	0,15	25
11	уайт-спірит	- / -	15	0,25	0
12	дріжджі кормові	- / -	10	0,07	5
13	сірковуглець	- / -	7	0,20	10
14	сланцевий пил	- / -	12	0,05	15
15	пропанол	мідь	22	0,10	20
16	плита мінераловатна	- / -	8	0,15	25
17	мука деревна	- / -	15	0,25	0
18	добриво для теплиць	- / -	17	0,07	5
19	ундекан	- / -	20	0,12	10
20	картон покрівельний	- / -	15	0,30	30

5. Для наведених у таблиці горючих матеріалів, що піддаються заданому тепловому впливу розжарених тіл, визначити:

а) можливість виникнення горіння через заданий час (початкова температура задана у таблиці);

б) критичний час, через який за даних умов стає можливим виникнення горіння.

№ варіанта	Горючий матеріал	Густина потоку тепла, Вт·м ⁻²	Час теплового впливу, хв	t ₀ , °С	t _{глі} , °С	ρ, кг·м ⁻³	λ, Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	c _p , кДж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹
1	деревостружкова вогнетривка плита	2500	50	20	375	750	0,14	3,2
2	повсть будівельна	1850	20	0	285	300	0,05	1,9
3	деревина соснова	1300	35	10	280	500	0,5	2,7
4	суміш полістиролу з каучуком	3200	15	15	325	1050	0,16	2,0
5	текстиль	7500	7	30	455	250	0,05	1,7
6	фанера березова	4200	25	25	300	450	0,3	2,8
7	тирса дубова	2800	40	17	229	200	0,08	2,7
8	пінопласт	1500	55	5	265	125	0,06	1,5
9	пробкова плита	5500	10	22	250	175	0,04	1,7 5
10	гума пориста	8900	15	15	312	250	0,05	1,5
11	гума технічна	12000	30	35	325	1550	0,15	1,6
12	шкіра	2700	5	7	250	700	0,14	2,5
13	текстоліт	9200	20	12	355	1350	0,24	1,4 5
14	плита торф'яна	1300	45	25	225	425	0,07	1,9
15	бавовна	2500	25	20	205	50	0,06	1,4

ДОДАТКИ

Таблиця 1 – Молярна ентальпія продуктів горіння за постійного тиску

Температура, К	Ентальпія, кДж·моль ⁻¹							
	Повітря	CO ₂	H ₂ O	N ₂	HF	HCl	HBr	SO ₂
298,15	8,66	9,35	9,91	8,67	8,60	35,99	76,50	44,61
400	11,64	13,36	13,36	11,64	11,56	38,96	79,50	78,86
600	17,62	22,25	20,41	17,56	17,40	44,83	85,40	88,15
800	23,86	32,14	27,93	23,71	23,28	50,82	91,50	98,33
1000	30,36	42,72	35,94	30,13	29,25	57,04	97,80	109,04
1200	37,09	53,77	44,48	36,78	35,36	63,48	104,40	120,08
1400	44,00	65,19	53,51	43,61	41,63	70,12	111,20	131,35
1600	51,05	76,87	62,97	50,58	48,08	76,94	118,10	142,77
1800	58,20	88,70	72,82	57,65	54,70	83,90	125,20	154,31
2000	65,44	100,71	83,02	64,81	61,45	90,99	132,40	165,95
2200	72,76	112,82	93,41	71,97	68,27	98,08	139,60	177,55
2400	80,14	125,04	104,14	79,26	75,26	105,34	147,00	189,27
2600	86,58	137,32	115,08	86,57	82,32	112,67	154,40	201,21
2800	95,06	149,69	126,22	93,91	89,48	120,09	161,70	213,16
3000	102,60	162,10	137,56	101,30	96,74	127,64	169,40	225,15
3200	110,17	174,55	149,05	108,71	104,04	135,06	177,00	237,24
3400	117,77	187,06	160,69	116,14	111,40	142,62	184,70	249,36
3600	125,41	199,61	172,47	123,61	118,84	150,24	192,40	261,59
3800	133,08	212,19	184,37	131,08	126,33	157,90	200,00	273,89
4000	140,77	224,81	196,42	138,58	133,85	165,60	207,90	286,20

Таблиця 2 — Об'ємна ентальпія продуктів горіння за постійного тиску

Температура, К	Ентальпія, кДж·м ⁻³							
	Повітря	CO ₂	H ₂ O	N ₂	HF	HCl	HBr	SO ₂
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1220,44	3029,89	2858,55
298,15	386,44	417,23	442,22	386,88	383,76	1605,98	3415,89	1990,63
400	519,41	596,16	596,16	519,41	515,84	1738,51	3548,87	3518,97
600	786,26	992,86	910,75	783,58	776,44	2000,45	3811,69	3933,51
800	1064,70	1434,18	1246,32	1058,01	1038,82	2267,74	4083,89	4865,68
1000	1354,75	1906,29	1603,75	1344,49	1305,22	2545,29	4366,8	5109,04
1200	1655,07	2399,38	1984,83	1641,23	1577,8	2832,66	4660,87	5358,32
1400	1963,41	2908,97	2387,77	1946,01	1857,65	3128,96	4963,41	5861,22
1600	2278,00	3450,17	2809,91	2257,03	2145,47	3433,29	5273,99	6370,82
1800	2597,06	3958,06	3249,44	2572,51	2440,88	3743,86	5589,92	6885,77
2000	2920,13	4493,98	3704,60	2892,01	2742,08	4060,24	5911,65	7405,18
2200	3246,77	5034,36	4168,23	3211,51	3046,43	4376,62	6231,15	7922,80
2400	3576,08	5579,65	4647,03	3536,81	3358,32	4700,58	6559,57	8445,78
2600	3863,45	6127,62	5135,21	3863,01	3673,36	5027,67	6892,01	8978,58
2800	4241,86	6679,61	5632,31	4190,54	3992,86	5358,77	7217,32	9511,83
3000	4578,31	7233,38	6138,33	4520,30	4316,82	5695,67	7563,14	10046,85
3200	4916,11	7788,93	6651,05	4850,96	4642,57	6026,77	7901,83	10586,35
3400	5255,24	8347,17	7170,46	5182,51	4970,99	6364,12	8244,09	11127,18
3600	5596,16	8907,18	7696,12	5515,84	5302,99	6704,15	8587,24	11672,91
3800	5938,42	9468,54	8227,13	5849,17	5637,22	7045,96	8933,51	12221,78
4000	6281,57	10031,68	8764,84	6183,85	5972,78	7389,56	9281,12	12771,08

Таблиця 3 — Молярна внутрішня енергія продуктів горіння за постійного об'єму

Температура, К	Внутрішня енергія продуктів горіння, кДж·моль ⁻¹							
	Повітря	CO ₂	H ₂ O	N ₂	HF	HCl	HBr	SO ₂
298,15	6,24	6,93	7,49	6,25	6,18	33,57	74,10	42,19
400	8,39	10,11	10,11	8,39	8,31	35,71	76,20	75,61
600	12,74	17,37	15,53	12,68	12,52	39,96	80,50	83,28
800	17,36	25,64	21,43	17,21	16,78	44,32	85,00	91,83
1000	22,23	34,59	27,81	22,00	21,12	48,91	89,70	100,92
1200	27,34	44,02	34,73	27,03	25,61	53,73	94,70	110,33
1400	32,62	53,81	42,13	32,23	30,25	58,74	99,80	119,98
1600	38,05	63,87	49,97	37,58	35,08	63,94	105,10	129,77
1800	43,57	74,07	58,19	43,02	40,07	69,27	110,60	139,69
-000	49,18	84,46	66,77	48,55	45,19	74,74	116,20	149,70
2200	54,88	94,94	75,53	54,09	50,39	80,20	121,70	159,68
2400	60,63	105,54	84,64	59,75	55,75	85,84	127,50	169,77
2600	65,45	116,19	93,95	65,44	61,19	91,54	133,30	180,09
2800	72,30	126,94	103,46	71,15	66,72	97,33	138,90	190,41
3000	78,22	137,72	113,18	76,92	72,36	103,26	145,10	200,78
3200	84,16	148,55	123,04	82,70	78,03	109,05	151,00	211,24
3400	90,14	159,43	133,06	88,51	83,77	114,99	157,10	221,74
3600	96,15	170,36	143,21	94,35	89,58	120,98	163,10	232,34
3800	102,20	181,31	153,49	100,20	95,44	127,02	169,30	243,02
4000	108,26	192,31	163,91	106,07	101,34	133,09	175,40	253,70

Таблиця 4 — Теплоємність та теплота утворення простих речовин і продуктів горіння

Речовина	Теплоємність молярна c_p , Дж·моль ⁻¹ ·К ⁻¹	Коефіцієнти рівняння $c_p = a + bT$, Дж·моль ⁻¹ ·К ⁻¹		Коефіцієнти рівняння $c_p = a + bT$, Дж·м ⁻³ ·К ⁻¹		Теплота утворення, ΔH_f° , кДж·моль ⁻¹
		a	b·10 ³	a	b·10 ³	
повітря	29,16	28,62	4,08	1172,95	167,21	0,00
O ₂	29,36	31,46	3,39	1289,34	138,93	0,00
N ₂	29,10	27,87	4,27	1142,21	175,00	0,00
NO	29,83	29,58	3,85	1212,30	157,79	90,37
NO ₂	37,11	42,93	8,54	1759,43	350,00	33,89
CO	29,15	28,41	4,10	1164,34	168,03	-110,5
CO ₂	37,13	44,14	9,04	1809,02	370,49	-393,51
C (графіт)	8,53	17,15	4,27	–	–	0
H ₂	28,83	27,28	3,26	1118,03	133,61	0
H ₂ O (газ)	33,56	30,00	10,71	1229,51	438,93	-241,84
H ₂ O (рідина)	75,31	–	–	–	–	-285,84
HF	29,16	27,70	2,93	1135,25	120,08	-268,61
HCl	29,16	26,53	4,60	1087,30	188,52	-92,30
HBr	29,16	26,15	5,86	1071,72	240,16	-35,98
HJ	29,16	26,32	5,94	1078,69	243,44	25,94
SO ₂	39,87	42,55	12,55	1743,85	514,34	-296,90
SO ₃	50,63	57,32	26,86	2349,18	1100,82	-395,20
H ₂ S	33,93	29,37	15,40	1203,69	631,15	-20,15
NH ₃	36,65	29,80	26,48	1221,31	1085,25	-46,19

Жир, масло	Вміст кислот у складі гліцеридів жиру, %																		
	олеїнова	пальмітолеїнова	лінолева	олеостеаринова	ліноленова	ерукова (C ₂₀ -C ₂₄)	рицинолева	петрозелінова	вакценова	ліканова	масляна	капронова	каприлова	капринова	лауринова	міристинова	пальмітинова	стеаринова	загальний вміст насичених кислот
кунжутне	<49	0,5	<48												0,1	7-8	4-6	12-16	
кукурудзяне	44		46													6-7		10	
бавовняне	<44	<1	<50													<25	1-2	19-31	
гірчичне	28		20		2	50												4	
коріандрове	32		7					53										8	
рапсове	16		15		7-9	47										2		3	
арахісове	<26																	13-22	
оливкове	<85	<1	<20														+	+	9-12
касторове	3-9		3				85											3	
вершкове	33	<5	4							3,7	<2	1	<3	<3	8-9	25	11	45	
яловичий	<44	2,5	2-5		0,4										2-3	28	<29		

* – кислоти з трьома ненасиченими зв'язками; + – кислота наявна у складі гліцеридів жиру.

Таблиця 6 — Хімічні формули деяких карбонових кислот

№	Найменування кислоти		Формула кислоти
	систематичне	тривіальне	
Насичені кислоти			
1	метанова	мурашина	HCOOH
2	етанова	оцтова	CH_3COOH
3	пропанова	пропіонова	$\text{C}_2\text{H}_5\text{COOH}$
4	бутанова	масляна	$\text{C}_3\text{H}_7\text{COOH}$
5	пентанова	валеріанова	$\text{C}_4\text{H}_9\text{COOH}$
6	гексанова	капронова	$\text{C}_5\text{H}_{11}\text{COOH}$
7	гептанова	енантова	$\text{C}_6\text{H}_{13}\text{COOH}$
8	октанова	каприлова	$\text{C}_7\text{H}_{15}\text{COOH}$
9	нонанова	пеларгонова	$\text{C}_8\text{H}_{17}\text{COOH}$
10	деканова	капринова	$\text{C}_9\text{H}_{19}\text{COOH}$
11	гендеканова	ундеканова	$\text{C}_{10}\text{H}_{21}\text{COOH}$
12	додеканова	лаурінова	$\text{C}_{11}\text{H}_{23}\text{COOH}$
13	тридеканова		$\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{COOH}$
14	тетрадеканова	міристинова	$\text{C}_{13}\text{H}_{27}\text{COOH}$
15	пентадеканова		$\text{C}_{14}\text{H}_{29}\text{COOH}$
16	гексадеканова	пальмітинова	$\text{C}_{15}\text{H}_{31}\text{COOH}$
17	гептадеканова	маргарінова	$\text{C}_{16}\text{H}_{33}\text{COOH}$
18	октадеканова	стеаринова	$\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$
19	нонадеканова		$\text{C}_{18}\text{H}_{37}\text{COOH}$
20	ейкозанова	арахінова	$\text{C}_{19}\text{H}_{39}\text{COOH}$
21	генейкозанова		$\text{C}_{20}\text{H}_{41}\text{COOH}$
22	докозанова	бегенова	$\text{C}_{21}\text{H}_{43}\text{COOH}$
23	трикозанова		$\text{C}_{22}\text{H}_{45}\text{COOH}$
24	тетракозанова		$\text{C}_{23}\text{H}_{47}\text{COOH}$
25	пентакозанова		$\text{C}_{24}\text{H}_{49}\text{COOH}$
26	гексакозанова	цератинова	$\text{C}_{25}\text{H}_{51}\text{COOH}$
27	гептакозанова		$\text{C}_{26}\text{H}_{53}\text{COOH}$
28	октакозанова	монтанова	$\text{C}_{27}\text{H}_{55}\text{COOH}$
29	нонанова		$\text{C}_{28}\text{H}_{57}\text{COOH}$
30	триаконтанова	мелісинова	$\text{C}_{29}\text{H}_{59}\text{COOH}$

Продовження таблиці 6

№	Найменування кислоти		Формула кислоти
	систематичне	тривіальне	
Ненасичені кислоти олійного ряду			
31	деценова		$C_9H_{17}COOH$
32	додеценова	лауроолеїнова	$C_{11}H_{21}COOH$
33	тетрадеценова	міристоолеїнова	$C_{13}H_{25}COOH$
34	гексадеценова	– пальмітоолеїнова	$C_{15}H_{29}COOH$
35	октадеценова	– олеїнова – петрозелінова – вакценова	$C_{17}H_{33}COOH$
36	ейкозенова	гадолеїнова	$C_{19}H_{37}COOH$
37	докозенова	– цетолеїнова – ерукова	$C_{21}H_{41}COOH$
38	тетракозенова	нервонова	$C_{23}H_{45}COOH$
Ненасичені кислоти поліолефінового ряду			
39	гексадекатриснова	– хірагонова	$C_{15}H_{25}COOH$
40	октадекадісна	– лінолева	$C_{17}H_{31}COOH$
41	октадекатриєнова	– ліноленова – елеостеаринова	$C_{17}H_{29}COOH$
42	октадекатетраєнова	парінарова	$C_{17}H_{27}COOH$
43		абієтинова	$C_{19}H_{29}COOH$
44	ейкозатетраєнова	арахідонова	$C_{19}H_{31}COOH$
45	докозапентаєнова	крупанонова	$C_{21}H_{33}COOH$
46	тетракозагексаєнова	нізінова	$C_{23}H_{35}COOH$
Ненасичені кислоти з додатковими оксигенвмістними групами			
47	гідроксіолеїнова	рицинолева	$C_{27}H_{32}OHCOOH$
48	кетоелеостеаринова	ліканова	$C_{17}H_{27}OCOOH$

Таблиця 7 — Константи рівнянь Таубкіна для розрахунку параметрів теплового самозаймання

№	Речовина або матеріал	A_p	n_p	A_b	n_b
1	бавовна	2,018	0,140	2,332	0,057
2	бавовна об'ємна 2-й сорт	1,986	0,157	2,334	0,061
3	барвник азопігмент жовтий світлостійкий $C_{16}H_{12}O_4N_4Cl_2$ (основної речовини 23 %)	1,983	0,144	2,396	0,175
4	барвник азопігмент бордо ЖВ $C_{21}H_{18}O_5N_4$	2,124	0,093	2,298	0,092
5	барвник азопігмент яскраво червоний 4ЖВ $C_{24}H_{17}O_3N_3Cl_2$ (основної речовини 40 %)	2,023	0,142	2,323	0,054
6	барвник дисперсний червоний Ж $C_{16}H_{18}O_3N_4$ (основної речовини 6 %)	1,894	0,146	2,198	0,096
7	барвник дисперсний бордо 2С $C_{17}H_{19}O_4N_4$	2,046	0,073	2,268	0,100
8	барвник дисперсний червоно-коричневий $C_{16}H_{16}O_3N_3Cl_2$	1,922	0,146	2,259	0,059
9	барвник дисперсний фіолетовий 4К $C_{17}H_{19}O_6N_5$	1,928	0,100	2,182	0,071
10	барвник диспергатор НФ	1,997	0,156	2,432	0,154
11	барвник зелений пігмент	1,900	0,150		
12	барвник нігрозин спирторозчинний	1,708	2,220	2,254	0,260
13	барвник кислотний фіолетовий $C_{37}H_{35}O_6N_3S_2Na$ (основної речовини 25 %)	2,117	0,060	2,248	0,024
14	барвник кислотний зелений $C_{37}H_{35}O_6N_2S_2Na$ (основної речовини 30 %)	2,105	0,067		
15	барвник бутиловий ксантогенат калію	1,853	0,133	2,196	0,132
16	барвник цианол блакитний 4 „3„	1,793	0,167	2,181	0,178

Продовження таблиці 7

№	Речовина або матеріал	A _p	n _p	A _b	n _b
17	барвник кубазол „Сірий С„	2,009	0,100	2,340	0,225
18	барвник 4,8-діаміно 1,5-діоксиатрахінон	2,020	0,173	2,628	0,340
19	бітум нафтовий окиснений	1,7241	0,259	2,291	0,122
20	борошно вітамінне з листя	1,897	0,157	2,268	0,106
21	борошно вітамінне з хвої	1,772	0,230	2,282	0,121
22	борошно кормове	1,507	0,322	2,103	0,244
23	борошно житнє	1,815	0,235	2,360	0,130
24	борошно шламове фосфорне	1,112	0,512	2,354	0,418
25	брикетоване трав'яне різання	1,8877	0,177	2,266	0,124
26	повість будівельна	1,726	0,279	2,350	0,140
27	повість мінеральна по бітумній основі	1,724	0,259	2,291	0,122
28	вітамін В ₂	1,716	0,220	2,140	0,300
29	вугілля активоване марки АП-14	1,921	0,161	2,221	0,085
30	вугілля активоване марки Б	1,697	0,289	2,209	0,388
31	гранітоль (шкірозамінник з покриттям на нітроцелюлозній основі)	1,307	0,390	2,160	0,150
32	гіпсотермін у вигляді крихти	1,792	0,272	2,362	0,107
33	гудрон нафтовий	1,743	0,259	2,310	0,122
34	дерматин (шкірозамінник з покриттям на нітроцелюлозній основі)	1,661	0,230	2,160	0,090
		1,661	0,230	2,53	0,231
35	дріжджі кормові	1,895	0,174	2,279	0,168
36	дріжджі хлібні	2,307	0,041	2,147	0,073
37	добриво для теплиць	2,078	0,089	2,356	0,110
38	ізіп (бактеріальний препарат)	1,744	0,177	2,100	0,098
39	іонообмінна смола СГ № 30 (полідисперсний порошок)	2,146	0,106	2,350	0,048
40	картон покрівельний	1,974	0,159	2,334	0,142
41	каталізатор К-14	1,776	0,225	2,174	0,229

Продовження таблиці 7

№	Речовина або матеріал	A _p	n _p	A _b	n _b
42	кордний пил	1,897	0,14	2,527	0,7
43	кормарин	1,531	0,310	2,185	0,212
44	кормогрезин 10	1,757	0,231	2,299	0,198
45	ледерин (шкірозамінник)	1,174	0,470	2,210	0,180
46	миючий засіб „Лотос-7„	1,880	0,240	2,340	0,050
47	нітроамофос НАФ, марка А (1:1)	1,927	0,149	2,201	0,081
48	нітроамофоска НАФК, марка А (1:1:1)	1,950	0,121	2,249	0,491
49	нітроамофоска з кубовими залишками амінів в індустріальній олії НАФК КОА (1:1:1)	2,021	0,110	2,271	0,041
50	нітроамофоска із сечовиною	1,835	0,188	2,283	0,075
51	плита ДВП ізоляційна	1,864	0,207	2,381	0,075
52	плита ДВП напівтверда	1,834	0,227	2,332	0,104
53	плита мінераловатна з вмістом бітуму 19 %	2,202	0,134	2,313	0,119
54	плита торф'яна	1,760	0,248	2,271	0,117
55	полілак (смола поліакрилонітрильна)	1,956	0,113	2,230	0,100
56	препарат № 30"М", нанесений на бавовну (1:1)	1,923	0,132	2,220	0,050
57	препарат № 30"М", нанесений на шлаковату (1:2,8)	1,792	0,175	2,250	0,150
58	поліміцин	1,762	0,275	2,332	0,121
59	сіно	2,103	0,109	2,311	0,058
60	сірка	2,062	0,119	2,327	0,073
61	силос	1,884	0,182	2,300	0,113
62	солома пшениці	2,169	0,067	2,438	0,035
63	сланцевий пил	1,611	0,288	2,255	0,145
64	тирса соснова	1,855	0,219	2,296	0,096
65	торф	2,554	0,181	1,298	0,031

Продовження таблиці 7

№	Речовина або матеріал	A _p	n _p	A _b	n _b
66	торф фрезерний	1,781	0,264	2,396	0,180
67	тізолін	1,707	0,228		
68	товарні дріжджі, вологість 8 %	1,867	0,184	2,254	0,077
69	тютюн неферментований краснодарський 4-й сорт	1,869	0,207	2,314	0,126
70	тютюн ферментований краснодарський 2 сорт	1,986	0,137	2,322	0,111
71	фітобактеріоміцин	1,937	0,204	2,353	0,175
72	целолігнін карбонізований ЦБК	1,902	0,170	2,192	0,102
73	цинеб 80 %	1,626	0,194	2,078	0,093
74	цинеб 80 % у суміші із ТНТД–80 у співвідношенні 17:3	1,650	0,146	1,973	0,151
75	шевелін	1,889	0,237	2,358	0,192

Таблиця 8 — Значення Гаусова інтеграла помилок
(функції Крампа)

A	erf(A)	A	erf(A)	A	erf(A)	A	erf(A)
0,00	0,0000	0,50	0,5205	1,00	0,8427	1,50	0,9661
0,02	0,0216	0,52	0,5379	1,02	0,8508	1,52	0,9684
0,04	0,0451	0,54	0,5549	1,04	0,8586	1,54	0,9706
0,06	0,0676	0,56	0,5716	1,06	0,8661	1,56	0,9726
0,08	0,0901	0,58	0,5876	1,08	0,8733	1,58	0,9745
0,10	0,1125	0,60	0,6039	1,10	0,8802	1,60	0,9763
0,12	0,1348	0,62	0,6194	1,12	0,8868	1,62	0,9780
0,14	0,1569	0,64	0,6346	1,14	0,8931	1,64	0,9796
0,16	0,1790	0,66	0,6494	1,16	0,8991	1,66	0,9811
0,18	0,2009	0,68	0,6638	1,18	0,9048	1,68	0,9826
0,20	0,2227	0,70	0,6778	1,20	0,9103	1,70	0,9838
0,22	0,2443	0,72	0,6914	1,22	0,9155	1,72	0,9850
0,24	0,2657	0,74	0,7047	1,24	0,9205	1,74	0,9861
0,26	0,2869	0,76	0,7175	1,26	0,9252	1,76	0,9872
0,28	0,3079	0,78	0,7300	1,28	0,9297	1,78	0,9882
0,30	0,3286	0,80	0,7421	1,30	0,9340	1,80	0,9892
0,32	0,3491	0,82	0,7538	1,32	0,9381	1,90	0,9928
0,34	0,3694	0,84	0,7651	1,34	0,9419	2,00	0,9953
0,36	0,3893	0,86	0,7761	1,36	0,9456	2,10	0,9970
0,38	0,4090	0,88	0,7867	1,38	0,9460	2,20	0,9981
0,40	0,4284	0,90	0,7969	1,40	0,9523	2,30	0,9989
0,42	0,4475	0,92	0,8068	1,42	0,9554	2,40	0,9993
0,44	0,4662	0,94	0,8163	1,44	0,9583	2,50	0,9996
0,46	0,4847	0,96	0,8254	1,46	0,9611	2,60	0,9998
0,48	0,5027	0,98	0,8312	1,48	0,9637	2,70	0,9999

Таблиця 9 — Показники пожежовибухонебезпеки пилу органічних речовин

Вид пилу	Температура самоспалах., °С		НКМПП, г·м ⁻³	Мінім. енергія запалювання, мДж	Максимальний тиск вибуху, кПа	Макс. швидкість зростання тиску, кПа·с ⁻¹
	аерозоль	аерогель				
арахіс	460	210	45	50	829	57140
бавовна	407	–	>44	25	630	17500
білок яйця	610	–	140	640	414	3570
борошно житнє	415	325	–	5,5	250	–
борошно кукурудзяне	–	–	37	46,4	–	–
борошно пшеничне	380	360	50	50	779	26430
борошно соєве	550	340	60	100	670	5710
борошно ячне	–	–	33	85	–	–
ванадій	500	490	220	8,0	350	6900
вітамін С	460	280	70	60	630	34290
вугілля	605	210	120	120	443	2860
вугілля деревне	530	180	140	20	714	12860
горох	560	–	50	40	710	43000
гума	350	–	25	50	–	26200
декстрин	410	440	50	40	707	64290
декстрин зерновий	410	390	40	40	886	50000
дріжджі	520	260	50	50	880	25000
желатина сушена	620	480	500	–	560	8570
кава	450	350	17	160	350	1800
казеїн	>460	–	45	60	460	3500
какао	500	200	65	120	493	8570

Продовження таблиці 9

Вид пилу	Темп. самоспалах., °С		НКМШ, Г·м ⁻³	Мінім. енергія запалювання, мДж	Максимальний тиск вибуху, кПа	Макс. швидкість зростання тиску, кПа·с ⁻¹
	аерозоль	аерогель				
карбамід	450	–	70	80	600	14000
качан кукурудзяний	450	240	45	45	907	26430
келлін	–	–	24	4,6	465	13800
кора березова	450	250	20	60	710	52000
кориця	440	230	60	30	864	27860
крохмаль картопляний	420	320	40–60	45	670	15800
крохмаль кукурудзяний	390	–	40	30	1036	67860
крохмаль пшеничний	430	–	45	25	714	46430
лігнін	450	300	40	20	710	35000
лікоподій	480	310	25	40	610	50000
люцерна	460		100	320	460	7100
макуха солодкова	470	–	50	25	670	4290
молоко сухе	490	200	50	50	680	16430
метилцелюлоза	340	–	30	20	968	37900
папір	440	270	55	60	690	25710
пектин	410	200	75	35	943	57140
поліпропілен	–	325	40	3,4	590	39000
поліуретан	510	390	25	15	670	26000
поліетилен (н.т.)	–	417	33	5,6	630	37000
пробка	460	210	35	35	686	53570

Продовження таблиці 9

Вид пилу	Темп. самоспалах., °С		НКМПП, Г·м ⁻³	Мінім. енергія запалювання, мДж	Максимальний тиск вибуху, кПа	Макс. швидкість зростання тиску, кПа·с ⁻¹
	аерозоль	аерогель				
протеїн сої	540	–	50	60	700	46430
рис	440	240	50	50	750	19290
сахароза	420	–	45	40	614	39290
сечовинова смола	430	–	20	34	786	11430
сіно	490	180	70	260	440	4200
сірка	190	–	35	15	560	32400
торф	460	240	45	50	743	15710
целюлоза	410	300	45	40	836	57140
цитрусова шкірка	500	330	60	100	407	8570
цукор	370	400	45	30	780	35710
шеллак	390	–	>15	10	510	24800
шрот соняшниковий	775	–	7	13,8	–	–
етилцелюлоза	310	293	>25	10	840	49000
ячмінь солодовий	400	250	55	35	680	31430

Таблиця 10 — Показники пожежовибухонебезпеки пилу деяких кормів

№	Речовина	Елементний склад, мас. %					Показники пожежовибухонебезпеки				$Q_{в}$ кДж·кг ⁻¹
		C	H	O	N	S	$\varphi'_{в}$, Г·м ⁻³	P_{\max} , кПа	dP/dt , мПа·с ⁻¹	φ_{\max} , об. %	
1	висівки пшеничні	43,6	7,0	44,7	3,4	1,25	55	483	6,2	11,8	17677
2	дріжджі кормові	35,6	6,2	44,58	7,9	5,8	36	650	9,2	11,0	19087
3	кукурудза дроблена	43,5	5,4	47,15	2,6	1,35	37	651	6,9	11,5	17543
4	пшениця дроблена	47	6,95	41,11	3,7	1,3	38	524	14,2	12,8	17322
5	ячмінь дроблений	43,5	6,0	46,01	3,1	1,42	47	645	11,4	12,3	17372
6	горох дроблений	45,8	6,5	42,8	3,6	1,3	52	620	19,3	11,8	18292
7	овес дроблений	46,6	6,77	43,23	3,1	0,34	54	650	4,67	12,0	19206
8	просо дроблене	44,1	6,82	46,02	2,5	0,58	36	—	—	—	18972
9	шрот соняшниковий	41,7	6,46	44,44	6,1	1,25	40	532	9,4	11,3	18368
10	шрот соєвий	43	6,57	42,32	6,9	1,2	49	673	12,5	16,0	18485
11	шрот бавовни	45,1	6,41	41,72	5,3	1,56	42	547	4,07	12,5	21786

Таблиця 11 – Параметри процесу горіння деяких речовин і матеріалів (за н.у.)

№	Речовина	Об'єм повітря $v^0_{пов}$, м ³ /кг	Об'єм продуктів згорання $v^0_{пр}$, м ³ /кг	Коефіцієнт повноти згорання η	Масова швидкість вигорання $V_m, 10^{-3}$, кг/(м ² с)	Лінійна швидкість вигорання $V_b, 10^{-6}$, м/с	Нормальна швидкість поширення горіння V_b , м/с	Теплота згорання Q'_{zb} , кДж/кг	Температура горіння, К	Температура само- спалахування, °С	Мінімальна енергія запалювання E_{min} , мДж
1	аміак NH ₃	4,70	5,68	0,97	-	-	0,23	18618	1777	650	680
2	ацетилен C ₂ H ₂	10,3	10,7	0,85	-	-	1,57	50038	2322	335	-
3	бутан C ₄ H ₁₀	11,9	12,9	0,85	-	-	0,45	45810	-	405	0,25
4	водень H ₂	26,6	32,3	0,85	-	-	2,7	120800	2400	510	0,017
5	оксид карбону CO	1,9	2,3	0,97	-	-		10107		605	-
6	етан C ₂ H ₆	12,4	13,6	0,85	-	-		52533		515	0,48
7	епоксіетан C ₂ H ₄ O	6,06	6,83	0,93	-	-	0,9	27727		430	0,06
8	етилен C ₂ H ₄	11,4	12,22	0,85	-	-	0,74	47071		435	0,12
9	сірководень H ₂ S	4,71	5,03	0,97	-	-	0,41	15394		246	0,07
10	метан CH ₄	13,3	14,7	0,85	-	-	0,39	50125	1300	537	0,28
11	акрилова кислота C ₃ H ₄ O ₂	4,44	5,08	0,97	37,0		-	17763	-	440	-
12	амілацетат C ₇ H ₁₄ O ₂	7,80	8,56	0,93	-		0,4	29879	-	290	-

Продовження таблиці 11

№	Речовина	Об'єм повітря $v_{\text{пов}}^0$, м ³ /кг	Об'єм продуктів згорання $v_{\text{пр}}^0$, м ³ /кг	Коефіцієнт повноти згорання η	Масова швидкість вигорання $V_{\text{м}}, 10^{-3}$, кг/(м ² ·с)	Лінійна швидкість вигорання $V_{\text{л}}, 10^{-6}$, м/с	Нормальна швидкість поширення горіння $V_{\text{н}}$, м/с	Теплота згорання $Q'_{\text{з}}$, кДж/кг	Температура горіння, К	Температура само- спалахування, °С	Мінімальна енергія запалювання $E_{\text{мін}}$, мДж
13	аміловий спирт $C_5H_{12}O$	9,10	10,0	0,93	17,5	21,6	-	38385	-	300	-
14	анілін C_6H_7N	8,90	9,34	0,93	-	-	-	32385	-	617	-
15	ацетон C_3H_6O	7,35	8,14	0,93	44	55,5	0,44	28890	-	535	0,41
16	бензол C_6H_6	10,3	10,7	0,85	72	83	0,48	38520	2300	560	0,22
17	бутанон-2 C_4H_8O	8,14	8,92	0,93	66	-	0,58	34297	-	514	0,28
18	бутилацетат $C_6H_{12}O_2$	7,35	8,14	0,93	52	-	0,4	28280	-	330	-
19	бутиловий спирт $C_4H_{10}O$	8,64	9,52	0,93	45,5	18	-	36805	-	340	0,28
20	гексан C_6H_{14}	11,8	12,7	0,85	103	-	0,39	45105	-	233	0,25
21	гексильовий спирт $C_6H_{14}O$	8,0	8,92	0,93	43	-	-	39653	-	285	-

Продовження таблиці 11

№	Речовина	Об'єм повітря $V_{\text{пов}}^0$, м ³ /кг	Об'єм продуктів згорання $V_{\text{пр}}^0$, м ³ /кг	Коефіцієнт повноти згорання η	Масова швидкість вигорання $V_{\text{м}}, 10^{-3}$, кг/(м ² с)	Лінійна швидкість вигорання $V_{\text{л}}, 10^{-6}$, м/с	Нормальна швидкість поширення горіння $V_{\text{н}}$, м/с	Теплота згорання $Q_{\text{н}}$, кДж/кг	Температура горіння, К	Температура само- спалахування, °С	Мінімальна енергія запалювання $E_{\text{мін}}$, мДж
22	гліцерин $C_3H_8O_3$	4,06	4,90	0,97				16102	-	400	-
23	діізопропіловий ефір $C_6H_{14}O$	9,42	10,3	0,93	87,3	95- 115		36552	-	443	1,1
24	діетиловий ефір $C_4H_{10}O$	8,65	9,55	0,93	104	82	0,49	34147	-	180	0,2
25	етилацетат $C_4H_8O_2$	6,06	6,83	0,93	55	22		23613	2213	446	0,28
26	етилбензол C_8H_{10}	10,56	11,07	0,85	88			41386	1592	431	0,2 (100°C)
27	етиленгліколь $C_2H_6O_2$	4,16	5,06	0,97	-			19319		412	-
28	етиловий спирт C_2H_6O	6,95	7,91	0,93	33	33- 42	0,56	27200	1800	400	0,25
29	ізопентан C_5H_{12}	11,9	12,8	0,86	105	167	0,37	45220		432	0,28

Продовження таблиці 11

№	Речовина	Об'єм повітря $V_{\text{пов}},$ м ³ /кг	Об'єм продуктів згорання $V_{\text{пр}},$ м ³ /кг	Коефіцієнт повноти згорання η	Масова швидкість вигорання $V_m, 10^{-3},$ кг/(м ² с)	Лінійна швидкість вигорання $V_{\text{л}}, 10^{-6},$ м/с	Нормальна швидкість поширення горіння $V_{\text{н}},$ м/с	Теплота згорання $Q_{\text{н}},$ кДж/кг	Температура горіння, К	Температура само- спалахування, °С	Мінімальна енергія запалювання $E_{\text{мін}},$ мДж
30	ізопропілбензол (кумол) C_9H_{12}	10,68	11,24	0,85	60	60- 73		46663	1620	424	0,18
31	ізопропіловий спирт C_3H_8O	8,0	8,92	0,93	31,3	42- 45	0,42	30145		430	0,65
32	ізопропілформіат $C_4H_8O_2$	6,06	6,83	0,93	73			23465		440	
33	камфен $C_{10}H_{16}$	10,98	11,66	0,85	-	67- 77				275	
34	ксилол C_8H_{10}	10,56	11,07	0,85	29	33	0,4	41217	1557	490	0,53
35	метиловий спирт CH_4O	4,99	6,06	0,97	26	20	0,57	23839		440	0,14
36	метилформіат $C_2H_4O_2$	9,52	11,52	0,97	60			19788	1691	456	0,4

Продовження таблиці 11

№	Речовина	Об'єм повітря $V_{\text{пов}}^0$, м ³ /кг	Об'єм продуктів згорання $V_{\text{пт}}^0$, м ³ /кг	Коефіцієнт повноти згорання η	Масова швидкість вигорання $V_{\text{пр}} \cdot 10^{-3}$, кг/(м ² с)	Лінійна швидкість вигорання $V_{\text{л}} \cdot 10^{-6}$, м/с	Нормальна швидкість поширення горіння $V_{\text{р}}$, м/с	Теплота згорання $Q_{\text{зг}}^0$, кДж/кг	Температура горіння, К	Температура само-спалахування, °С	Мінімальна енергія запалювання $E_{\text{мін}}$, мДж
37	пентан C ₅ H ₁₂	11,9	12,8	0,86	90		0,39	45350		286	0,22
38	пінен C ₁₀ H ₁₆	10,98	11,66	0,85	50	57-73	0,63				0,26
39	сірковуглець CS ₂	4,2	4,2	0,97	36,8	28	0,59	184134	2400	102	0,01
40	стирол C ₈ H ₈	11,9	10,7	0,85			0,57	42623	1590	490	0,99
41	толуол C ₇ H ₈	10,5	11,9	0,85	63,0	60	0,39	40936	1635	535	0,26
42	хлорбензол C ₆ H ₅ Cl	6,63	7,03	0,93	45	28-47		27315	1530	637	
43	циклогексанол C ₆ H ₁₂ O	9,06	9,85	0,93	40	42-45		35114		300	0,77 (75 °С)
44	циклогексанон C ₆ H ₁₀ O	8,7	9,37	0,93	32	43-52	0,7 (100°С)	34074		420	1,3 (50 °С)
45	капролактам C ₆ H ₁₁ ON	7,76	8,54	0,91	26	24		31849		400	

Продовження таблиці 11

№	Речовина	Об'єм повітря $V_{\text{пов}}^0$ м ³ /кг	Об'єм продуктів згорання $V_{\text{пр}}^0$, м ³ /кг	Коефіцієнт повноти згорання η	Масова швидк. вигорання $V_{\text{пр}}^0$, 10 ⁻³ , кг/(м ² с)	Лінійна швидкість вигорання $V_{\text{л}}^0$, 10 ⁻⁶ , м/с	Теплота згорання $Q_{\text{пр}}^0$, кДж/кг	Температура горіння, К	Температура само- спалахування, °С	Мінімальна енергія запалювання $E_{\text{мін}}^0$, мДж
46	бензин	11,6	12,4	0,85	62,0	55 -83	41870	1200	375	0,4
47	бітум	9,45	10,4	0,93			35000	-	390	-
48	гас	11,4	12,3	0,85	48	60-67	43540	-	240	-
49	дизельне паливо	11,5	12,0	0,85	42	55	48870	-	210- 310	-
50	нафта	11,8	11,9	0,85	22-28	25-33	43500- 46000	1400	> 222	
51	мазут	11,3	11,9	0,85	15,5	17	38100- 41900	1000	250	
52	паливо Т1	11,4	12,3	0,85	18,0		43040		220	0,18 (100 °С)
53	скипидар	11,0	11,6	0,85	-		44000		> 245	0,4 (50 °С)

Продовження таблиці 11

№	Речовина	Об'єм повітря $V_{\text{пов}}^0$, м ³ /кг	Об'єм продуктів згорання $V_{\text{пл}}^0$, м ³ /кг	Коефіцієнт повноти згорання η	Масова швидк. вигорання $V_{\text{мр}}$, 10 ⁻³ , кг/(м ² с)	Лійна швидкість вигорання $V_{\text{л}}$, 10 ⁻⁶ , м/с	Теплота згорання $Q'_{\text{мр}}$, кДж/кг	Температура горіння, К	Температура само-спалахування, °С	Мінімальна енергія запалювання $E_{\text{мін}}$, мДж
54	бавовна та вироби з неї	3,95	4,64	0,97	5	200-250	15700			25 (аерозоль)
55	волокно штапельне	3,95	4,64	0,97	7		13800			
56	вугілля антрацит				-		32000		500	
57	вугілля буре				-		16300		410	
58	гумотехнічні вироби	10,2	10,8	0,85	15		33500		> 350	50
59	деревина вологістю 10 %	4,20	4,86	0,97	19		13800	1200	> 375	60
60	« / « / « 20 %	3,74	4,42	0,97	-					
61	« / « / « 30 %	3,54	3,99	0,97	-					
62	деревина (меблі в житлових будинках, $R_{\text{пож}}=50$ кг/м ²)				14	16,6				

Продовження таблиці 11

№	Речовина	Об'єм повітря $v^0_{\text{пов}} \text{ м}^3/\text{кг}$	Об'єм продуктів згорання $v^0_{\text{пр}} \text{ м}^3/\text{кг}$	Коефіцієнт повноти згорання η	Масова швидк. вигорання $V_{\text{пр}} \cdot 10^{-3}, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	Лінійна швидкість вигорання $V_{\text{л}} \cdot 10^{-6}, \text{ м}/\text{с}$	Теплота згорання $Q', \text{ кДж}/\text{кг}$	Температура горіння, К	Температура само-спалахування, °С	Мінімальна енергія запалювання $E_{\text{мін}} \text{ мДж}$
63	деревина (штабель пиломатеріалів, $R_{\text{пож}} = 2000 \text{ кг}/\text{м}^2$)				117		16600			
64	калій				20	19,3				
65	карболітові вироби				6		26900			
66	каучук натуральний	10,0	10,8	0,85	18	14-17	42300		375	
67	каучук синтетичний	10,2	10,82	0,85	12	7-10	40200		> 305	30
68	кіноплівка нітроцелюлозна	3,62	4,32	0,97	5		150642	1500	> 120	
69	кіноплівка триацетатна	4,34	4,97	0,97	9		18800			
70	книги на стелажах	3,95	4,64	0,97	6 - 10		13400			
71	натрій				12-15		10880	900	330	
72	органічне скло				14		27737			
73	папір	3,95	4,64	0,97	11		13400			

Продовження таблиці 11

№	Речовина	Об'єм повітря, $V_{\text{пов}}^0$ м ³ /кг	Об'єм продуктів згорання $V_{\text{пр}}^0$, м ³ /кг	Коефіцієнт повноти згорання η	Масова швидк. вигорання $V_{\text{м}}, 10^{-3}$, кг/(м ² с)	Лінійна швидкість вигорання $V_{\text{л}}, 10^{-6}$, м/с	Теплота згорання, $Q'_{\text{в}}$ кДж/кг	Температура горіння, К	Температура само- спалахування, °С	Мінімальна енергія запалювання $E_{\text{мін}}$, мДж
74	полістирол	10,3	10,7	0,85	14		39000	1500	> 439	3,4
75	поліпропілен у виробх	11,4	12,2	0,87	15		45600	1550	> 325	3,4
76	поліетилен у виробх	11,4	12,2	0,85	10		47100	1950	> 349	6-30
77	пінополіуретан	6,00	6,55	0,93	15	173- 190	24300			20
78	Текстоліт марки А				7		22430		> 500	
79	торф вологістю 10 %	5,01	5,66	0,93	10,6		16613	1100	405	
80	- / - / - 20 %	4,54	5,14	0,97	-		11300			
81	- / - / - 30 %	3,96	4,62	0,97	4-5	17-33				
82	фенопласти				6				> 325 (аерозо ль)	

Таблиця 12 — Значення показників пожежної небезпеки деяких сумішей і технічних продуктів

№	Продукт (склад суміші), % мас.	Сумарна формула	Молярна маса, кг·кмоль ⁻¹	Температура спалаху, °С	Температура самоспалахування, °С	Константи Ангуана			Темп. інтервал констант Ангуана, °С	НКМЩ, % (об)	Теплота згорання, кДж·кг ⁻¹
						А	В	С _а			
1	бензин авіаційний Б–70	C _{7,267} H _{14,796}	102,2	-34	300	7,5442	2629,65	384,2	-40 ÷ 100	0,79	44094
2	бензин А–72 (зимовий)	C _{6,991} H _{13,108}	97,2	-36	–	4,195	682,88	222,07	-60 ÷ 85	1,08	44239
3	бензин АІ–93 (літній)	C _{7,024} H _{13,706}	98,2	-36	–	4,1231	664,98	221,7	-60 ÷ 95	1,06	43641
4	бензин АІ–93 (зимовий)	C _{6,911} H _{12,168}	95,3	-37	–	4,2651	695,02	223,22	-60 ÷ 90	1,1	43641
5	дизельне паливо "З"	C _{12,343} H _{23,889}	172,3	> +35	225	5,0782	1255,73	199,52	40 ÷ 210	0,61	43590
6	дизельне паливо "Л"	C _{14,511} H _{29,120}	203,6	> +40	210	5,0011	1314,04	192,47	60 ÷ 240	0,52	43419
7	гас освітлювальний КО–20	C _{13,595} H _{28,860}	191,7	> +40	227	4,8218	1211,73	194,68	40 ÷ 240	0,55	43692
8	гас освітлювальний КО–22	C _{10,914} H _{21,832}	153,1	> +40	245	5,596	1394,72	204,26	40 ÷ 190	0,64	43692
9	гас освітлювальний КО–25	C _{11,054} H _{21,752}	154,7	> +40	236	5,125	1223,85	203,34	40 ÷ 190	0,66	43692
10	ксилол (суміш ізомерів)	C ₈ H ₁₀	106,17	+29	490	6,1797	1478,16	220,54	0 ÷ 50	1,1	43154
11	уайт-спірит	C _{10,5} H _{21,0}	147,3	> 33	250	7,1362	2218,3	273,15	20 ÷ 80	0,7	43996

Продовження таблиці 12

№	Продукт (склад суміші), % мас.	Сумарна формула	Молярна маса, кг·кмоль ⁻¹	Температура спалаху, °С	Температура само- спалахування, °С	Константи Антуана			Темп. інтервал констант Антуана, °С	НКМПП, % (об)	Теплота згорання, кДж·кг ⁻¹
						A	B	C _a			
12	масло трансформаторне	C _{21,74} H _{42,28} S _{0,04}	303,9	>135	270	6,8841	2524,17	174,01	164 ÷ 343	0,29	43111
13	масло АМТ–300	C _{22,25} H _{33,48} S _{0,34} N _{0,07}	312,9	>170	290	6,1244	2240,0	167,85	170 ÷ 376	0,2	42257
14	масло АМТ–300Т	C _{19,04} H _{24,58} S _{0,196} N _{0,04}	260,3	> 189	334	5,6202	2023,77	164,09	171 ÷ 396	0,2	41778
15	розчинник Р–4 (ацетон 26 %, н-бутилацетат 12 %, толуол 62 %)	C _{5,452} H _{7,606} O _{0,535}	81,7	-7	550	6,2969	1373,67	242,83	-15 ÷ 100	1,65	40936
16	розчинник Р–4 (ксилол 15 %, толуол 70 %, ацетон 15 %)	C _{6,231} H _{7,798} O _{0,223}	86,3	-4	–	6,2785	1415,2	244,75	-15 ÷ 100	1,38	43154
17	розчинник Р–5 (ацетон 30 %, н-бутилацетат 30 %, ксилол 40 %)	C _{5,309} H _{8,655} O _{0,897}	86,8	-9	–	6,3034	1378,85	245,039	-15 ÷ 100	1,57	43154
18	розчинник Р-12(ксилол 10 %, н-бутилацетат 30 %, толуол 60 %)	C _{6,837} H _{9,217} O _{0,515}	99,6	10	–	6,173	1403,08	221,48	0 ÷ 100	1,26	43154

Продовження таблиці 12

№	Продукт (склад суміші), % мас.	Сумарна формула	Молярна маса, кг·кмоль ⁻¹	Температура спалаху, °С	Температура само- спалахування, °С	Константи Ангуана			Темп. інтервал констант Ангуана, °С	НКМПП, % (об)	Теплота згорання, кДж·кг ⁻¹
						A	B	C _a			
19	розчинник М (етилловий спирт 60 %, н-бутилацетат 30 %, етилацетат 5 %, ізобутиловий спирт 5 %)	$C_{2,761}H_{7,147}O_{1,187}$	59,36	6	397	8,057	2083,57	267,74	0 ÷ 50	2,79	36743
20	розчинник РМЛ (толуол 10 %, етиловий спирт 64 %, н-бутиловий спирт 10 %, етилцелозольв 16 %)	$C_{2,645}H_{6,810}O_{1,038}$	55,24	10	374	8,6965	2487,73	290,92	0 ÷ 50	2,85	40936
21	розчинник РМЛ-218 (етилловий спирт 16 %, н-бутилацетат 9%, ксилол 21,5 %, н-бутиловий спирт 3 %, етилцелозольв 13 %, толуол 21,5 %, етилацетат 16 %)	$C_{4,791}H_{8,318}O_{0,974}$	81,51	4	399	7,2024	1761,04	251,55	0 ÷ 50	1,72	43154
22	розчинник РМЛ-315 (ксилол 25 %, н-бутилацетат 18 %, толуол 25 %, етилцелозольв 17 %, н-бутиловий спирт 15 %)	$C_{5,962}H_{9,779}O_{0,845}$	94,99	16	367	6,8365	1699,69	241,0	0 ÷ 50	1,25	43154

Таблиця 13 — Об'ємні теплоти згоряння та мінімальні енергії запалювання газів і рідин

Додатки

Речовина		Теплота згоряння, кДж·м ⁻³		Мінімальна енергія запалювання, мДж	Теплота утворення, ΔH ^o _f , кДж·моль ⁻¹	T _{сес} , °C
назва	формула	вища, Q'' _в	нижча, Q'' _н			
метан	CH ₄	39820	35880	0,28	-74,8	537
етан	C ₂ H ₆	70310	64360	0,24	-84,68	515
пропан	C ₃ H ₈	101210	93180	0,22	-103,8	470
н-бутан	C ₄ H ₁₀	133800	123570	0,25	-126,0	405
пентан	C ₅ H ₁₂	169270	150630	0,22	-146,4	286
н-гексан	C ₆ H ₁₄	187400	187400	0,25	-167,2	233
н-гептан	C ₇ H ₁₆	216880	200550	0,25	-187,7	223
циклогексан	C ₆ H ₁₂	–	–	0,22	-123,13	259
ізооктан	C ₈ H ₁₈	–	–	1,35	–	411
водень	H ₂	12750	10790	0,017	0	510
сульфід гідрогену	H ₂ S	25350	23700	0,068	–	246
сульфід карбону	CS ₂	–	–	0,009	88,7	102
оксид карбону	CO	12640	12640	–	-110,5	605
етилен	C ₂ H ₄			0,12		435
етилцеллозольв	C ₄ H ₁₀ O ₂			0,15	-405,0	235
бензин АІ-92				0,3		435
уайт-спірит	C _{10,5} H ₂₁	–	–	0,33		250
п-ксилол	C ₈ H ₁₀			84,5	-24,4	528

Таблиця 14 — Теплота утворення та константи Антуана деяких рідин

Речовина	Формула	ΔH° , кДж·моль ⁻¹	Константи Антуана		
			A	B	C _a
акрилова кислота	C ₃ H ₄ O ₂	-336	7,0931	1913	236,0
акролеїн	C ₃ H ₄ O	-58,5	6,190	1156,947	230,60
аліловий спирт	C ₃ H ₆ O	-131,8	7,6594	1944,765	247,60
амілбензол	C ₁₁ H ₁₆	-34,4	6,6832	2069,486	210,43
амілметилкетон	C ₇ H ₁₄ O	-291	9,2537	3336,004	310,07
аміловий спирт	C ₅ H ₁₂ O	-302,5	6,307	1287,625	161,33
амілциклогексан	C ₁₁ H ₂₂	-233,8	6,33628	1808,242	213,89
анілін	C ₆ H ₇ N	109	6,04162	1457,02	176,19
ацетон	C ₃ H ₆ O	-217,57	6,3755	1281,721	237,09
ацетонітрил	C ₂ H ₃ N	-25,62	7,27	1838	273,00
бензилбензоат	C ₁₄ H ₁₂ O ₂	-372,84	9,2	4057	273,00
бензиловий спирт	C ₇ H ₈ O	-220,86	8,7223	2664,68	279,64
бензол	C ₆ H ₆	82,9	5,6139	902,275	178,10
бутаналь	C ₄ H ₈ O	-205	7,0839	1768,4	273,00
бутандіол-2,3	C ₄ H ₁₀ O ₂	-445,5	8,67	3024	273,00
бутанова кислота	C ₄ H ₈ O ₂	-486,3	7,4394	2158,56	233,66
бутанон	C ₄ H ₈ O	-238,3	6,1494	1292,79	232,34
ізобутилацетат	C ₆ H ₁₂ O ₂	-535,5	6,24133	1332,3	205,57
бутилбензол	C ₁₀ H ₁₄	-13,7	6,5495	1882,49	230,94

Продовження таблиці 14

Речовина	Формула	ΔH° , кДж·моль ⁻¹	Константи Антуана		
			A	B	C _a
бутилметилкетон	C ₆ H ₁₂ O	-272	6,6317	1613,425	221,67
бутанол	C ₄ H ₁₀ O	-274,6	8,7223	2664,68	279,64
бутилфенол	C ₁₀ H ₁₄ O	-285,12	6,4777	1928,57	207,18
бутилформіат	C ₅ H ₁₀ O ₂	-437,6	6,8194	1711,66	249,58
валеріанова кислота	C ₅ H ₁₀ O ₂	-490,4	8,0456	2661,49	256,17
валеріановий альдегід	C ₅ H ₁₀ O	-227,8	6,4554	1460,27	225,18
валеролактон	C ₅ H ₈ O ₂	-421,14	7,331	2540,4	273,00
гексадекан	C ₁₆ H ₃₄	-373,3	5,9124	1656,405	136,87
гексадієн	C ₆ H ₁₀	-94,1	6,132	1184,99	227,70
гексан	C ₆ H ₁₄	167,2	5,9951	1166,27	223,66
гексилметилкетон	C ₈ H ₁₆ O	-311,7	6,9090	1980,4	230,92
гексиловий спирт	C ₆ H ₁₄ O	-319,8	6,1789	1293,83	152,63
гептан	C ₇ H ₁₆	-187,7	6,0764	1295,405	219,82
декан	C ₁₀ H ₂₂	-249,6	6,5202	1809,975	227,70
діацетоновий спирт	C ₆ H ₁₂ O ₂	-425	7,216	2188	253,00
дибутиловий ефір	C ₈ H ₁₈ O	-333,9	6,4403	1648,4	230,00
діізопропілкетон	C ₇ H ₁₄ O	-291	7,1	2021,4	273,00
діоксан	C ₄ H ₈ O ₂	-434,16	6,989	1866,7	273,00
дипропіловий ефір	C ₆ H ₁₄ O	-293,4	6,240	1397,34	240,20

Додатки

Продовження таблиці 14

Речовина	Формула	ΔH° , кДж·моль ⁻¹	Константи Антуана		
			A	B	C _a
діетиламін	C ₄ H ₁₁ N	-137,34	7,22	1709	273,00
діетиленгліколь	C ₄ H ₁₀ O ₃	-642,84	7,2767	2727,3	273,00
діетилізопропілметан	C ₈ H ₁₈	-211,2	5,9885	1318,12	215,30
діетилкетон	C ₅ H ₁₀ O	-252	6,3555	1477,021	237,52
діетиловий ефір	C ₄ H ₁₀ O	-252,2	6,1228	1098,945	232,37
додекан	C ₁₂ H ₂₆	-290,9	7,2957	2463,739	253,88
ізопропенілбензол	C ₉ H ₁₀	-112,9	6,3696	1680,13	219,6
крезол	C ₇ H ₈ O	-158	6,6329	1856,356	199,07
ксилідин	C ₈ H ₁₁ N	-85,26	6,7578	2035,4	216,00
кумол	C ₉ H ₁₂	-21,5	6,0675	1461,643	207,56
мезитилен	C ₉ H ₁₂	-15,9	6,3584	1691,49	224,20
метиламінол	C ₆ H ₁₄ O	-344,2	7,5919	2174,869	257,78
метанол	CH ₄ O	-201,3	7,352	1660,45	245,80
метилацетат	C ₃ H ₆ O ₂	-409,1	6,1901	1157,63	219,73
метилбутират	C ₅ H ₁₀ O ₂	-485	6,2263	1338	214,34
метилгексан-2	C ₇ H ₁₆	-194,9	5,9981	1236,026	219,55
метилпентальдегід	C ₆ H ₁₂ O	-249,1	6,465	1519,1	223,65
метилпропіонат	C ₄ H ₈ O ₂	-438,8	6,74	1667	273,00
метилпропілкетон	C ₅ H ₁₀ O	-258,6	6,9891	1870,4	273,20

Продовження таблиці 14

Речовина	Формула	ΔH° , кДж·моль ⁻¹	Константи Антуана		
			A	B	C _a
метилформіат	C ₂ H ₄ O ₂	-349,8	6,4589	1206,148	239,02
метилциклогексан	C ₇ H ₁₄	-154,7	5,9518	1272,864	221,63
метилциклопентан	C ₆ H ₁₂	-106,6	5,9877	1186,059	226,04
метоксиетилацетат	C ₅ H ₁₀ O ₃	-573,6	6,2500	1447,037	196,10
мурашина кислота	CH ₂ O ₂	-210,6	4,9927	765,889	154,55
м-ксилол	C ₈ H ₁₀	17,25	6,588	1906,8	234,9
нонан	C ₉ H ₂₀	-229	6,1777	1510,695	211,50
ноніловий спирт	C ₉ H ₂₀ O	-387	5,8006	1276,626	123,10
октан	C ₈ H ₁₈	-208	6,0939	1379,556	211,89
октаналь	C ₈ H ₁₆ O	-643,96	6,7024	1815,764	218,61
октанова кислота	C ₈ H ₁₆ O ₂	-565,3	5,2690	1014,81	72,77
октиловий спирт	C ₈ H ₁₈ O	-357	5,7209	1170	120,00
октилциклогексан	C ₁₄ H ₂₈	-295,6	6,6848	2213,668	209,50
пентан	C ₅ H ₁₂	-146,4	5,9720	1062,555	231,81
пентанол-2	C ₅ H ₁₂ O	-314,13	6,3504	1254,854	169,60
піридин	C ₅ H ₅ N	140,6	6,007	1281,3	205,00
пірол	C ₄ H ₅ N	63	6,4196	1501,563	210,40
пропаналь	C ₃ H ₆ O	-221,7	6,0657	1163,288	231,17
пропіламін	C ₃ H ₉ N	-101,5	6,3854	1243,947	235,88

Додатки

Продовження таблиці 14

Речовина	Формула	ΔH° , кДж·моль ⁻¹	Константи Антуана		
			A	B	C _a
пропілбензол	C ₉ H ₁₂	-7,9	6,2971	1627,827	220,49
пропілбутират	C ₇ H ₁₄ O ₂	-556,8	6,6514	1756,37	234,96
пропіленгліколь	C ₃ H ₈ O ₂	-499,9	8,640	3039	273,00
пропанол	C ₃ H ₈ O	-257,7	7,4420	1751,981	225,13
пропілформіат	C ₄ H ₈ O ₂	-417	5,9724	1126,539	203,46
пропілциклогексан	C ₉ H ₁₈	-193,3	6,0135	1461,715	207,99
пропілциклопентан	C ₈ H ₁₆	-148	6,0796	1438,79	222,23
пропілетилкетон	C ₆ H ₁₂ O	-272	6,4469	1538,995	222,58
пропіонова кислота	C ₃ H ₆ O ₂	-466	7,839	2410	273,00
пропіоновий ангідрид	C ₆ H ₁₀ O ₃	-289	4,944	810,31	108,74
стирол	C ₈ H ₈	155,6	7,0654	2123,057	272,99
тетрагідрофуран	C ₄ H ₈ O	-214	6,1200	1202,29	226,25
тетраметилбензол	C ₁₀ H ₁₄	-41,9	6,2418	1693,156	195,23
тетраметилгептан	C ₁₁ H ₂₄	-276,2	6,2872	1715,271	216,61
тетраметилпентан	C ₉ H ₂₀	-273,2	5,9536	1397,483	213,70
толуол	C ₇ H ₈	50,17	6,050	1328,171	217,71
тридекан	C ₁₃ H ₂₈	-311,5	7,0938	2468,91	250,31
триметилбензол	C ₉ H ₁₂	-15,9	6,4429	1791,164	227,84
триметилгексан	C ₉ H ₂₀	-254	5,9602	1324,049	210,74

Продовження таблиці 14

Речовина	Формула	ΔH°_f , кДж·моль ⁻¹	Константи Антуана		
			A	B	C _a
оцтова кислота	C ₂ H ₄ O ₂	-437,3	7,1033	1906,53	255,97
оцтовий ангідрид	C ₄ H ₆ O ₃	-328	6,274	1444,718	199,82
ундеканол	C ₁₁ H ₂₄ O	-422,5	5,6520	1250	100,00
фенілетиловий ефір	C ₈ H ₁₀ O	-84	6,5277	1808,8	230,00
хлорбензол	C ₆ H ₅ Cl	51,4	6,3861	1607,316	235,351
цимол	C ₁₀ H ₁₄	28,8	6,6498	1893,381	232,66
етилацетат	C ₄ H ₈ O ₂	-442,9	6,2267	1244,95	217,88
етилбензол	C ₈ H ₁₀	29,9	6,3587	1590,66	229,58
етиленгліколь	C ₂ H ₆ O ₂	-453,8	8,1375	2753,183	252,00
етилтолуол	C ₉ H ₁₂	-1,6	6,4147	1732,11	228,10
етилформіат	C ₃ H ₆ O ₂	-371,2	6,1339	1123,943	218,25
етилциклогексан	C ₈ H ₁₆	-171,7	5,9953	1384,036	215,13

Додатки

ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

Вимушене запалювання – це виникнення горіння внаслідок дії джерела запалювання на малу частку холодної горючої суміші.

Виникнення горіння – це швидкий перехід повільної окисно-відновної реакції до миттєвого перетворення вихідних речовин у продукти реакції за рахунок самоприскорення. Це перетворення носить вибуховий характер та супроводжується спалахом або звуковим ефектом.

Вища теплота згоряння – кількість тепла, що виділяється при повному згорянні одиниці кількості горючої речовини за умови, що горюча суміш і продукти горіння знаходяться за стандартних умов, а вода у продуктах горіння знаходиться у сконденсованому (рідкому) стані.

Горіння – складний фізико-хімічний процес, основою якого є швидка окиснювально-відновна реакція, що супроводжується інтенсивним виділенням енергії у вигляді тепла та світлового випромінювання.

Джерело запалювання – це тіло, що горить, або розжарене тіло, а також електричний розряд, які мають енергію і температуру, достатні для запалювання (виникнення горіння) інших речовин.

Дим – це дисперсна система, що складається з твердих і рідких частинок розміром $10^{-5} \div 10^{-8}$ м (дисперсної фази), завислих у газовому дисперсійному середовищі.

Йодне число (J_q) – число грамів йоду, що приєднається за умов спеціальних досліджень (або за

розрахунком) по місцю ненасичених зв'язків до 100 грамів олії.

Коефіцієнт надлишку повітря (α) – коефіцієнт, який показує, у скільки разів кількість повітря, що дійсно надходить до зони горіння, відрізняється від теоретично необхідної кількості повітря для повного згорання горючої речовини.

Мінімальна енергія запалювання E_{\min} газу, пари або аерозолу даної речовини в повітрі – найменша енергія конденсатора, при розряді якого через повітряний проміжок виникає іскра, що запалює стехіометричну суміш даної речовини з повітрям із імовірністю 0,01.

Нижча теплота згорання речовини – кількість тепла, що виділяється при повному згорянні одиниці кількості горючої речовини за умови, що горюча суміш і продукти горіння знаходяться за стандартних умов, а вода, яка міститься у продуктах горіння, знаходиться у газоподібному стані.

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

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

Самозаймання – процес виникнення горіння за рахунок самонагрівання системи внаслідок накопичення тепла всередині самої системи під впливом внутрішніх екзотермічних процесів за сприятливих умов і відсутності джерела запалювання.

Самонагрівання – це підвищення температури системи за рахунок перевищення швидкості тепловиділення в системі внаслідок протікання екзотермічних процесів над швидкістю тепловіддачі від системи в навколишнє середовище.

Самоспалахування – це процес виникнення горіння в результаті різкого підвищення швидкості екзотермічних реакцій окиснення, що виникають під дією зовнішнього нагрівання всієї горючої системи до критичної температури [1], [6], [10], [11].

Стандартна температура самоспалахування – найменша температура, визначена стандартним методом, до якої повинна бути нагріта горюча суміш пари з повітрям, що найлегше займається, щоб виникло горіння без внесення стороннього джерела запалювання.

Стандартна теплота утворення речовини ΔH_f° – теплота реакції, в якій за стандартних умов ($P = 101,3$ кПа, $T = 298$ К) утворюється один моль речовини із простих речовин, стійких за стандартних умов.

Стехіометрична концентрація – концентрація горючої речовини, що відповідає рівнянню реакції горіння.

Температура горіння – температура, до якої нагріваються продукти горіння під час їх утворення в зоні горіння.

Температура запалювання – це критична температура нагрітого тіла, за якої досягається рівновага між тепловиділенням при окисненні горючої речовини у пристінному шарі горючої суміші і тепловіддачею у навколишню холодну суміш.

Температура самонагрівання – найменша температура горючої системи, за якої виникає

самонагрівання речовини.

Температура самоспалахування – найменша температура горючої системи, за якої в умовах спеціальних випробувань спостерігається її самоспалахування.

Тепловий ефект реакції – кількість тепла, що виділяється чи поглинається системою під час протікання в ній незворотної хімічної реакції (хімічна енергія перетворюється в теплову) за умов сталої температури й об'єму чи температури й тиску.

Теплота згоряння – кількість тепла, що виділяється при повному згорянні одиниці кількості горючої речовини з утворенням продуктів повного згоряння за умов, що початкові та кінцеві продукти знаходяться за стандартних умов.

Температура займання – найменша температура рідини, за якої після короткочасної дії джерела запалювання встановлюється стійке горіння. За цієї температури інтенсивність випаровування рідини стає рівною інтенсивності вигорання пароповітряної суміші.

Температура спалаху – найменша температура рідини, за якої в умовах спеціальних випробувань над її поверхнею накопичується пара, здатна спалахувати під впливом короткочасної дії джерела запалювання середньої потужності, але без встановлення стійкого горіння.

Температурні межі поширення полум'я (ТМПП) (нижня або верхня) – такі температури рідини, за яких над її поверхнею утворюється насичена пара в концентрації, що відповідає нижній або верхній концентраційній межі поширення полум'я.

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЗЧИК

Г

- горіння, 7, сл.
- виникнення, 126, сл.
- енергетичний баланс, 59
- матеріальний баланс, 10
- рівняння реакції, 15

Д

- дим, 24
- джерело запалювання, 217

Е

- енергія
- внутрішня, 60
- запалювання, 218, сл.
- ентальпія, 60

З

- запалювання вимушене,
128, 217

І

- іскра
- електрична, 218
- короткого замкнення, 227
- фрикційна, 227, 229

Й

- йодне число, 172

К

- коефіцієнт
- стехіометричний, 16
- надлишку повітря, 27
- концентрація стехіо-
метрична, 17

Н

- навантага пожежна, 79
- надлишок повітря, 28

О

- об'єм повітря, 29, 44, сл.
- об'єм продуктів горіння,
30, 45, сл.

П

- період індукції, 129, 198
- полум'я, 10, сл.
- продукти горіння, 24, сл.

Р

- радикал, 170, 180
- реакція
- автокаталітична, 126
- горіння, 16, 20, 25
- ланцюгова, 126
- тепловий ефект, 59, 184
- речовини пірофорні, 166

Литература

С

самозаймання, 128, 166,
сл.
- мікробіологічне, 167
- теплове, 196
- хімічне, 169
- - при контакті з водою,
184
- - при контакті з киснем,
169
- фізичне, 167
самонагрівання, 136, 166,
сл.
самоспалахування, 128, сл.

Т

температура
- безпечна, 136, 202
- вибуху, 106
- горіння, 80, сл.
- запалювання, 226, сл.
- самонагрівання, 198
- самоспалахування, 130,
153
теплота
- згоряння, 62, сл., 69, 73
- утворення, 63, 66
тиск вибуху, 107

ЛІТЕРАТУРА

1. Процессы горения / Абдурагимов И.М., Андросов А.С., Исаева Л.К., Крылов Е.В. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1984. – 268 с.
2. Демидов П.Г., Шандыба В.А., Щеглов П.П. Горение и свойства горючих веществ. – М.: Химия, 1981. – 311 с.
3. Демидов П.Г., Саушев В.С. Горение и свойства горючих веществ. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1975. – 280 с.
4. Исаев С.И. Курс химической термодинамики. – М.: Высшая школа, 1986. – 232 с.
5. Монахов В.Т. Методы исследования пожарной опасности веществ. – М.: Химия, 1979. – 424 с.
6. Соколик А.С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. – М.: Изд-во АН СССР, 1960.
7. Справочник “Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения”/ Под редакцией А.Н. Баратова и А.Я. Корольченко, ч. I и II. – М.: Химия, 1990. – 650 с.
8. Баратов А.Н., Иванов Е.Н., Корольченко А.Я и др. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность. Справочник. – М.: Химия, 1987. – 272 с.
9. Справочник химика / Под ред. Б.П. Никольского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1963. Т.1. – 1002 с.
10. Розловский А.Н. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. – М.: Химия, 1980. – 376 с.

11. Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. – Харків: АПУ, 2002. – 352 с.
12. Блинов В.И., Худяков Г.Н. Диффузионное горение жидкостей. – М.: РИСО АН СССР, 1961. – 210 с.
13. Таубкин С.И., Таубкин И.С. Пожаро- и взрывоопасность пылевидных материалов и технологических процессов их переработки. – М.: Химия, 1976. – 212 с.
14. Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность промышленной пыли. – М.: Химия, 1986. – 242 с.
15. Абдурагимов И.М., Говоров В.Ю., Макаров В.Е. Физико–химические основы развития и тушения пожара. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1980. – 255 с.
16. Повзик Я.С., Ключ П.П., Матвейкин А.М., Пожарная тактика. – М.: Стройиздат, 1990. – 283 с.
17. Иванников В.П., Ключ П.П. Справочник руководителя тушения пожара. – М.: Стройиздат, 1987. – 288 с.
18. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров: Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1990. – 265 с.
19. Термогазодинамика пожаров в помещениях / Астапенко В.М., Кошмаров Ю.А., Молчадский И.С. и др. – М.: Стройиздат, 1988. – 295 с.
20. Романенко И.М., Кошмаров Ю.А., Башкирцев М.П. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1977. – 415 с.
21. Ройтман М.Я. Основы противопожарного нормирования в строительстве. - М.: Стройизд, 1969. - 480 с.
22. Зернов С.И. Расчетные оценки при решении задач пожарно–технической экспертизы: Учебное пособие. – М.: ЭКЦ МВД России, 1992. – 88 с.

23. Баратов А.Н., Иванов Е.Н. Пожаротушение на предприятиях химической и нефтеперерабатывающей промышленности. – М.: Наука, 1979. – 120 с.

24. Иванов Е.Н. Противопожарная защита открытых технологических установок. – М.: Химия, 1986. – 190 с.

25. Таубкин С.И. Пожар и взрыв, особенности их экспертизы. – М., 1999. – 245 с.

26. Франк–Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1967. – 220 с.

27. Юбилейный сборник трудов Всероссийского научно–исследовательского института противопожарной обороны. – М.: ВНИИПО МВД России, 1997. – 287 с.

28. Шрайбер Г., Порст П. Огнетушащие средства: Пер. с нем. – М.: Стройиздат, 1975. – 260 с.

29. НАПБ Б.03.002–2007. Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. – К.: УкрНДПБ, 2007. – 40 с.

30. ГОСТ 12.1.044–89. ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 67 с.

31. ГОСТ 12.1.004–91. Пожарная безопасность. Общие требования. – М.: Изд-во станд-в, 1991. – 110 с.

32. ДНАОП 0.00-1.32-01. Правила устройства электроустановок. Электрооборудование специальных установок. – К.: ОАО «Киевпромэлектропроект», 2001. – 80 с.

33 Таубкин СИ., Баратов А.Н., Никитина А.С. Справочник пожароопасности твердых веществ и материалов. - М.: МКХ РСФСР, 1961.-125 с.

Навчальне видання

Тарахно Олена Віталіївна
Трегубов Дмитро Георгійович,
Жернокльов Костянтин Владиславович,
Шепелева Алла Іванівна
Коврегін Володимир Володимирович

ТЕОРІЯ РОЗВИТКУ ТА ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ

Практикум

Частина I

Підписано до друку 10.12.10. Формат 60x84/16.
Папір 80 г/м². Друк ризограф. Ум.друк. арк. 19,5
Тираж 300 прим. Вид. № 109/10. Зам.№ 913 (472/10) Обл.вид арк. 14,8
Відділення редакційно-видавничої діяльності
Університету цивільного захисту України
61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94

КП "Міська друкарня", 61002, харків, вул. Артема, 44

Свідоцтво Державного комітету інформаційної політики, телебачення та радіомовлення
України про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців,
виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції,
№ 3613 серія дк від 29.10.2009