

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ**

**КАФЕДРА СПЕЦІАЛЬНОЇ ХІМІЇ ТА ХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Начальник кафедри СХХТ,

к.т.н., п-к. сл.ц.з.

\_\_\_\_\_ Тарахно О.В.

\_\_\_\_\_ 201\_\_ р.

**ТЕОРІЯ РОЗВИТКУ ТА ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

Конспект лекцій розглянуто і затверджено на засіданні кафедри СХХТ

Протокол №\_\_ від \_\_\_\_\_ 201\_\_ р.

м. Харків

# КОСПЕКТ ЛЕКЦІЇ № 1

## ОСНОВИ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ. ПРОЦЕСИ, ЩО ВІДБУВАЮТЬСЯ У ПОЛУМ'І

### Вступ.

**План лекції:** 1. Основи процесів горіння та вибуху. 2. Класифікація процесів горіння. 3. Полум'я. Процеси, що відбуваються у полум'ї.

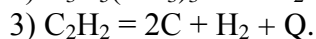
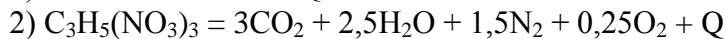
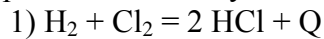
**Ключові слова:** окисник (ОК), продукти горіння (ПГ), горюча речовина або паливо (ГР), горюча система (ГС), ХР, зона горіння (ЗГ), швидкість хімічної реакції, гомогенне ГМ та гетерогенне ГТ горіння

*Горіння буває як корисне, так і руйнівне, тому необхідно знати закони його розвитку. Пожежі пов'язані з загибеллю людей та матеріальними збитками, що перевищують 1 % національного доходу. На Україні щороку відбувається 50 – 60 тисяч пожеж та загорянь, на яких гине більше 3 тисяч осіб.*

#### 1. Основи процесів горіння та вибуху.

Горіння – це складний фізико-хімічний процес з швидкою реакцією окиснення або розкладання, інтенсивним виділенням тепла, світла та утворенням продуктів горіння.  $ГР + ОК \rightarrow ПГ + Q$ .

Реакції горіння – це окислювально-відновні реакції з киснем, галогенами, паром сірки, розкладання вибухонебезпечних та ендотермічних сполук.



Горіння відрізняється від окиснення більшою швидкістю реакції.

Вибух це процес дуже швидкої зміни фізичного чи хімічного стану системи, що супроводжується переходом її потенційної енергії в роботу та різким стрибком тиску. Руйнівна дія обумовлена швидким розширенням газів, незалежно від того, існували вони раніше чи утворилися під час вибуху. Вибух може бути як наслідком хімічної реакції, так і чисто фізичним процесом, наприклад – викид відстояної і перегрітої води під шаром нафти, що горить.

Пожежа – це неконтрольоване горіння поза спеціального осередку. Частіше – це реакція з киснем повітря.

*Демонстрація горіння рідини у тиглі по температурі спалаху бутанолу.*

*Як бачимо, джерело запалювання (ДЗ) запалило систему лише за певних умов: спочатку накопичувалась пара рідини відповідно її температурі, але спалаху ще не було, далі при достатній концентрації пари відбувся спалах, тобто коли утворилась горюча система (ГС).*

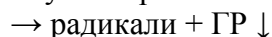
**Горіння виникає** за наявності суміші ГР та ОК у достатніх концентраціях і джерела запалювання з достатньою температурою та потужністю.

Поширення полум'я обумовлено прогрівом ГС за рахунок передачі тепла: 1. Теплопровідністю (від молекули до молекули). 2. Конвекцією (циркуляція газу). 3. Тепловим випромінюванням. 4. Нагрів ГС швидким стисненням.

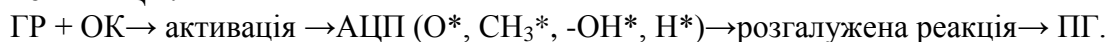
#### Теорії горіння:

Теплова теорія горіння: горіння виникає та поширюється якщо тепловиділення хімічної реакції більше за тепловтрати в навколишній простір.

Теорія горіння **А.Н. Баха:** Кінцеві продукти окислення ГР утворюються за допомогою проміжних високоактивних сполук – перекисей:



Теорія горіння **Н.Н.Семенова** більш точна: реакція починається з утворення активних центрів полум'я (АЦП) і продовжується через ланцюг розгалужених реакцій з утворенням нових АЦП:



Якщо при реакції утворюється більш одного АЦП – ланцюгова реакція розгалужена.

При цьому АЦП швидко накопичуються,  $\omega_{x,p} \uparrow$ , окиснення переходить в горіння. Загибель АЦП гальмує реакцію горіння, що використовують для припинення горіння.

## 2. Класифікація процесів горіння.

2.1. За агрегатним станом ГР та ОК у ЗГ: гомогенне, гетерогенне, змішане.

- Гомогенне горіння (полум'яне) – компоненти ГС газоподібні, так горять гази і рідини.  
(Демонстрація горіння газу на пальнику Бунзена).

Швидкість гомогенного горіння показує рівняння Ареніуса:  $\omega_{xp} = k (\varphi_{ГР})^n (\varphi_{ОК})^m e^{(-E_{акт}/RT)}$

- Гетерогенне горіння (безполум'яне) – компоненти ГС у різному агрегатному стані (вуглець, нелетучі метали, металургійний кокс).

(Демонстрація двох режимів горіння деревини).

Швидкість гетерогенного горіння залежить лише від кількості кисню та температури:

$$\omega_{xp} = k (\varphi_{ОК})^m e^{(-E_{акт}/RT)}$$

- Змішане горіння спостерігається для деревини, яка при нагріві розкладається на горючий газ, який горить гомогенно, і твердий вуглецевий залишок, який горить гетерогенно.

2.2. За стадією процесу, що гальмує горіння: кінетичне, дифузійне.

Горіння відбувається у дві стадії дифузійну і кінетичну, тому визначається часом на сумішеутворення і часом на проходження хімічної реакції  $\tau_{x,p}$ .  $\tau_{гор} \approx \tau_d + \tau_{x,p}$ ,

- Дифузійне горіння супроводжується утворенням суміші в процесі горіння. Дифузійна стадія тривала, дифузія  $\tau_d$  визначає швидкість горіння ( $\tau_d \gg \tau_{x,p}$ ,  $\tau_{гор} \approx \tau_d$ ,  $\omega_{гор} \approx \omega_d$ ,  $\omega_d = \gamma \varphi_{ОК}$ ).

(Демонстрація горіння пари горючої рідини у дифузійному режимі на пальнику Теклю).

- Кінетичне горіння відбувається, якщо ГС утворюється ще до початку горіння. Швидкість горіння буде визначатись лише швидкістю хімічної реакції  $\omega_{x,p}$  ( $\tau_{гор} \approx \tau_{x,p}$ ,  $\omega_{гор} \approx \omega_{x,p}$ ). Може спостерігатися, як вибух.

(Демонстрація горіння газу у вибуховій трубі).

2.3. По способу поширення кінетичного горіння: дефлаграційне та детонаційне горіння.

- дефлаграційне – повільне проходження ЗГ – до 50 м/с, запалювання ГС відбувається шляхом пошарового прогріву від ЗГ по механізму теплопровідності. Може спостерігатися, як вибух.
- детонаційне, вибухове горіння – запалювання відбувається за рахунок швидкого адіабатичного стиснення ГС ударною хвилею або швидким фронтом полум'я  $> 500$  м/с ( $P \uparrow$ , тому  $T \uparrow$  до 1500 – 1700 К).

2.4. По газодинамічному стану компонентів ГС: ламінарне та турбулентне горіння.

- ламінарне – повільне надходження компонентів ГС до ЗГ по законах дифузії.
- турбулентне – інтенсивне надходження компонентів ГС до ЗГ з перемішуванням ПГ і ГС та відривом ЗГ.

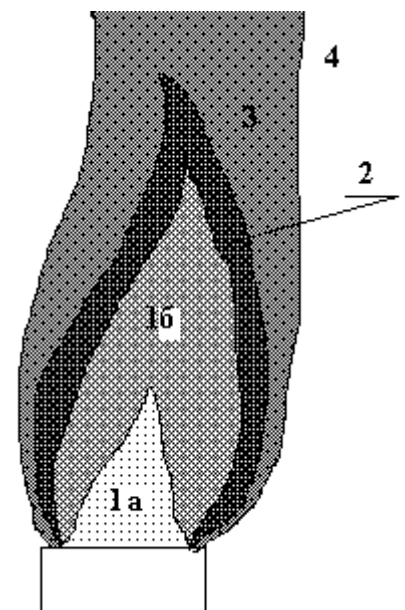
## 3. Полум'я. Процеси, що відбуваються у полум'ї.

3.1. Будова ламінарного полум'я:

Полум'я це газовий об'єм при гомогенному горінні, у якому відбувається підготовка та сам процес горіння. Ламінарне полум'я спокійне. Тому має чіткі зони:

- 4) холодне повітря.
- 3) Прогрів повітря гарячими ПГ;
- 2) ЗГ, виділення тепла ХР;
- 1б) нагрів і розкладання ГР на атоми за рахунок тепла ПГ та випромінювання;
- 1а) попередній нагрів горючого газу;
- 1) підготовча зона ПЗ:

3.2. Кінетичне полум'я може тривати без кисню ззовні, оскільки на горіння потрапляє вже горюча суміш. У ПЗ відбувається розкладання і попереднє окиснення ГР з низькою  $\omega_{x,p}$ , тобто це ще не горіння. У ЗГ потрапляють



газоподібні продукти неповного окислення, які згоряють з утворенням продуктів повного згоряння з повним виділенням тепла. Випромінювання гарячих газів людське око не бачить, тому полум'я блакитне. Якщо кисню не вистачить - колір може бути і жовтим.

3.3. У дифузійному полум'ї горінню передують сумішеутворення, ОК потрапляє у ЗГ з повітря, а ГР – з ПЗ. ЗГ властиве стехіометричне співвідношення між ГР та ОК. Температура менша ніж у кінетичного полум'я.

ГР розкладається в підготовчій зоні, утворюється карбон, який потрапляє у ЗГ розжарюється і світиться, полум'я стає жовтим. Якщо карбону багато він не встигає окислитись у ЗГ, полум'я жовте, кіптяве, ПГ містять сажу. Якщо молекула ГР містить кисень, його потреба ззовні зменшується і полум'я може бути навіть блакитне.

**ЗАВДАННЯ НА САМОПІДГОТОВКУ:** Демидов, Шандиба, Щеглов, с.7 – 11.

## ЛЕКЦІЯ № 2.

### МАТЕРІАЛЬНИЙ БАЛАНС ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ

План лекції: 1. Основні поняття матеріального балансу горіння. 2. МБ реакції горіння індивідуальної ГР. 3. МБ реакції горіння суміші ГГ. 4. МБ реакції горіння складних речовин. 5. Надлишок повітря. 6. Продукти горіння, дим.

Ключові слова: матеріальний баланс (МБ), горюча речовина (ГР), горючий газ (ГГ), окислювач (ОК), повітря (П), горюча суміш ГС, коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha$ , продукти горіння (ПГ), продукти повного згоряння (ППЗ), продукти неповного згоряння (ПНЗ).

#### 1. Основні поняття матеріального балансу горіння.

Основою процесів горіння є швидка хімічна реакція перетворення початкових компонентів (ГС) в продукти горіння (ПГ), що підкоряється законам збереження речовини і енергії.



Частіше окислювачем при горінні є кисень повітря.  $\text{ГР} + \beta (\text{O}_2 + 3,76 \text{N}_2) = \sum n_i \text{ПГ}_i + \beta * 3,76 \text{N}_2$

$\beta$  - стехіометричний коефіцієнт, який показує, скільки повітря необхідно для сгорання одиниці ГР. *Стехіометрична* суміш відповідає рівнянню реакції горіння і є найбільш вибухонебезпечна.

Матеріальний баланс реакції горіння – це співвідношення між кількістю речовин горючої суміші, та кількістю ПГ.

Принципи розрахунку:

1. Маса вихідних речовин дорівнює масі кінцевих:  $\sum m_{\text{г.с.}} = \sum m_{\text{п.г.}}$

2. Кількість моль реагуючих речовин та ПГ визначають за рівнянням реакції.

3. Для рідких та твердих ГР враховують, що 1 кмоль важить  $\mu$  кг (молекулярна маса).

4. *Нейтральні речовини повітря* - азот, аргон, діоксид вуглецю та інші переходять у ПГ без хімічних змін, але вони зменшують температуру горіння, бо на їх нагрів йде частина

тепла горіння.

5. Нестачу або надлишок повітря при горінні визначає **коефіцієнт надлишку повітря,  $\alpha$** , який показує, у скільки разів кількість повітря, що надходить до ЗГ, відрізняється від необхідної для повного згоряння ГР. Наявність кисню у ГР зменшує потребу у повітрі для горіння та збільшує  $T_{гор}$ . Відповідно меншає кількість азоту у ПГ.
6. **Теоретична кількість П та ПГ** пропорційні їх молярному співвідношенню у реакції.
7. **Дійсна кількість П та ПГ** враховує частку повітря, що не прореагувала  $\Delta\alpha = \alpha - 1$  ( $\alpha > 1$ ) і переході у ПГ.
8. **Питома кількість** визначає скільки П або ПГ відповідає одиниці кількості ГР.
9. **Повна кількість П та ПГ** враховує згоряння даної кількості ГР.
10. Об'єм газу змінюється за умов, відмінних від нормальних  $V_{\mu} = 22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$  ( $T_0 = 273 \text{ К}$ ;  $P_0 = 101,3 \text{ кПа}$ ):  $V_{\mu} = 22,4 \frac{101,3 * T}{273 * P}$

Тому гарячі продукти горіння розширюються.

За однакових умов різні гази займають однаковий об'єм, тому:  $V_{\mu}^{ГР} = V_{\mu}^{П} = V_{\mu}^{ПГ}$

11. Відсотковий склад ПГ:  $\%ПГ_i = 100 \frac{n_{ПГ_i}}{n_{ПГ}}$

## 2. МБ горіння індивідуальної ГР.

Приклад. Горіння  $1 \text{ м}^3$  метану:  $\text{CH}_4 + 2(\text{O}_2 + 3,76 \text{ N}_2) = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 2*3,76\text{N}_2$

П:  $9,52 \text{ м}^3$ ; ПГ:  $1 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$ ,  $2 \text{ м}^3 \text{ H}_2\text{O}$  та  $7,52 \text{ м}^3 \text{ N}_2$

Тобто, питома теоретична кількість молей:  $n_{\text{П}}^0 = (1+3,76) \beta$  моль/моль  
 $n_{\text{П}}^0 = \sum n_{\text{ПГ}}^0$  моль/моль

Питома дійсна кількість молей:  $n_{\text{П}} = n_{\text{П}}^0 \alpha$  моль/моль

$$n_{\text{П}} = n_{\text{ПГ}}^0 + (\alpha - 1) n_{\text{П}}^0 \text{ моль/моль}$$

Визначення об'ємів: Для газів  $v = n \text{ м}^3/\text{м}^3$ .

Для рідин та твердих речовин:  $v = n V_{\mu}/\mu$

Повні об'єми враховують весь об'єм або масу ГР, що горить:  $V = v V_{ГР}$  або  $V = v m_{ГР}$

## 3. МБ ГОРІННЯ СУМІШІ ГГ.

1. Розраховують горіння кожного компоненту з урахуванням його вмісту у суміші в об'ємних відсотках ( $\varphi_i/100$ ).

2. **Питому теоретичну кількість повітря** розраховують з урахуванням кисню, що

може бути присутній у горючому газі:  $v_n^o = 4,76 \sum_{i=1}^n \left( \beta_i \frac{\varphi_i}{100} - \frac{\varphi_{\text{O}_2}}{100} \right) = \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i * \varphi_i - \varphi_{\text{O}_2}}{21}$ ,  $\text{м}^3 / \text{м}^3$ .

3. **Питомий теоретичний об'єм ПГ** для газових сумішей:  $v_{n.z.}^o = \left( \sum_{i=1}^n v_{n.z.i}^o \right) \frac{\varphi_i}{100}$

## 4. МБ ГОРІННЯ СКЛАДНИХ РЕЧОВИН.

1. **Складні речовини** не мають загальної формули, їх склад визначають у масових частках окремих елементів або у відсотках, містять **C, H, O, S**.

2. Повітря потрібно для горіння кожного елементу  $v_{\text{П}}^o (C); (H); (S)$  з врахуванням наявності кисню у ГР:  $v_{\text{П}}^o = v_{\%O(.,)}^o C + v_{\%O(S)}^o S + v_{\%O(H)}^o H - v_{\%O(O)}^o O$ , де **C, H, O, S** – масові частки.

За реакціями горіння цих елементів отримаємо:  $v_{\text{П}}^o = 0,267 \left( \frac{C}{3} + H + \frac{S-O}{8} \right)$ ,  $\text{м}^3 / \text{кг}$

3. Об'єм ПГ розраховують, як і для газових сумішей або за таблицею, з врахуванням вмісту елементів.

## 5. НАДЛИШОК ПОВІТРЯ.

**Надлишок повітря** це частина повітря, що не витрачена на горіння і переходить у ПГ:

$$\Delta v_{\text{П}} = v_{\text{П}} - v_{\text{П}}^o = v_{\text{П}}^o (\alpha - 1);$$

- коефіцієнт надлишку повітря,  $\alpha = v_{\text{п}}/v_{\text{п}}^0$

$\alpha = 1$  – кінетичне горіння або вибух, ГС є стехіометричною ( $V_{\text{п}}^0 = V_{\text{п}}$ ).

$\alpha < 1$  - суміш багата (надлишок ГР і нестача ОК - повітря), утворюються продукти неповного згорання.

$\alpha > 1$  - суміш бідна (нестача ГР і надлишок ОК - повітря), ПГ містять надлишок повітря  $\Delta v_{\text{п}}$ .

Для кінетичного горіння якщо  $\alpha < \alpha_{\text{min}}$  або  $\alpha > \alpha_{\text{max}}$  суміш є негорючою;  $\alpha_{\text{min}}$  відповідає верхній концентраційній межі поширення полум'я  $\varphi_{\text{в}}$  (надлишок ГР), а  $\alpha_{\text{max}}$  –

нижній  $\varphi_{\text{п}}$  (нестача ГР): 
$$\alpha_{\text{min(max)}} = \frac{100 - \varphi_{\text{в(п)}}}{v_{\text{п}}^0 \varphi_{\text{в(п)}}$$

При дифузійному горінні кількість кисню в повітрі зменшується (у повітрі кисню 21%), а ПГ накопичуються. Тому  $\omega_{\text{гор}} \downarrow$ , утворюються продукти неповного згорання CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, доокиснення яких проходить поза ЗГ. За вмісту кисню у повітрі < 14%, полум'яне горіння припиняється. Гетерогенне горіння триває ще до 5 % кисню. Тобто продукти горіння

містять кисень, тому  $\alpha > 1$ : 
$$\alpha_{\text{п}} = \frac{21}{21 - \%O_2}, \text{ тобто } \alpha_{\text{пmin}} = \frac{21}{21 - 14} = 3$$

Після доокиснення ПНЗ вміст кисню ще зменшується до  $\alpha \approx 2$ .

#### 6. ПРОДУКТИ ГОРІННЯ, ДИМ.

ПГ утворюються при горінні і містять нейтральні домішки вихідної суміші і частину ГР або ОК, яка не прореагувала; продукти розкладання твердих речовин: вода, спирти, альдегіди, кетони, HCl, HCN, H<sub>2</sub>S.

ПГ класифікують:

- за агрегатним станом: Газоподібні: CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, HCl, HCN та ін.

**Рідкі:** H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HCl, продукти розкладу ГР. **Тверді ПГ:** карбон, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, оксиди металів.

Саме тверді та рідкі ПГ обумовлюють непрозорість диму.

- по повноті згорання:

Продукти повного згорання (ППЗ) утворюються при повному окисленні ГР (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, і т.п.). Вони не горять і не підтримують горіння більшості інших речовин. Лише їх враховують при складанні рівняння реакції горіння. Накопичення продуктів неповного згорання (ПНЗ) та розкладання призводить до отруєння людей та можливості вибуху.

- за хімічним складом.

Хімічно інертні ПГ не здатні до подальших хімічних перетворень за даних умов горіння. Реакційноздатні ПГ вступають в подальші хімічні реакції за умова горіння – це ПНЗ, які можуть доокислюватися та деякі продукти повного згорання (ППЗ), що вступають в реакції обміну (HCl).

Дим це дисперсна система, що складається з твердих і рідких часток 10<sup>-5</sup> до 10<sup>-8</sup> м (дисперсної фази), завислих у газовому дисперсійному середовищі. Ці частки мають малу масу і дуже повільно осідають.

#### Властивості диму:

1. Концентрація диму – це кількість ПГ, що містяться в одиниці об'єму, кг/м<sup>3</sup>.
2. Щільність задимлення – це ступінь зниження прозорості внаслідок поглинання та розсіювання світла твердими частками.
3. Вміст кисню у ПГ. Нижче 21% - кисневе голодування, нижче 16% загибель (у чистому повітрі 14 %).
4. Токсичність - це здатність диму викликати отруєння людей.
5. Температура диму біля осередку горіння - 1000°C.

#### Способи зниження небезпеки диму:

- охолодження та осадження диму розпорошеними струменями води.
- видалення диму димовсмоктувачами;
- відкриття верхніх отворів.

**Завдання на самопідготовку.**

1. Демидов, Шандиба, Щеглов, Горіння та властивості горючих речовин, стор. 18-29.
2. Демидов, Саушев, Горіння та властивості горючих речовин, стор. 24-42.
3. Розрахувати МБ згоряння речовини за індивідуальним завданням.

## Р1. Л.3. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС ТА ТЕМПЕРАТУРА ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ

**План лекції:** 1. Види теплоти згоряння. 2. Розрахунок теплоти згоряння складних ГР. 3. Тепловий баланс процесу горіння. 4. Види температури горіння речовин.

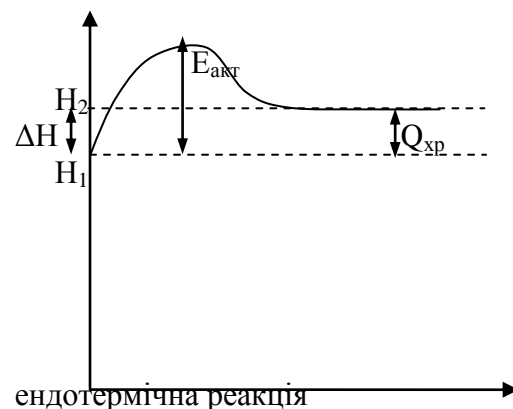
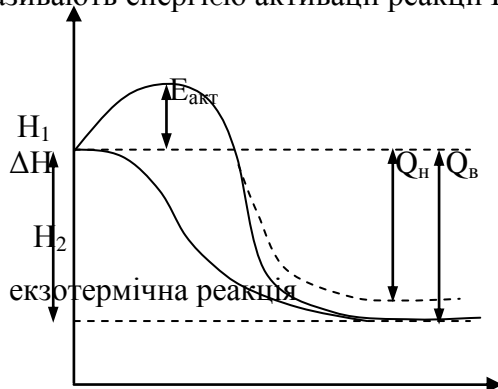
**Ключові слова:** ГР, ПГ, стандартна теплота згоряння  $Q_{гор}$  (вища -  $Q_{в}$ , нижча -  $Q_{н}$ ), енергії активації реакції  $E_{акт}$ , температура горіння  $T_{гор}$ ,

### 1. Утворення теплоти згоряння

**Стандартна теплота утворення** – це тепловий ефект утворення складних речовин з простих ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $C$  та ін.). Якщо ця теплота має позитивне значення, то відповідна сполука ендотермічна. Деякі з таких сполук розкладаються з вибухом самовільно.

**Тепловий ефект реакції** це кількість теплоти, що виділяється чи поглинається системою в ході реакції при  $T$  і  $V = \text{const}$  або  $T$  і  $P = \text{const}$  і визначається як різниця між сумарними теплотами утворення ПГ  $H_{пг}$  та теплотами утворення компонентів ГС  $H_{гс}$ .

Більшість реакцій починається, якщо до початкової системи додати певну кількість енергії, яку називають енергією активації реакції  $E_{акт}$ .



Після **екзотермічної** реакції тепловміст системи зменшується, тобто частина енергії виділяється у вигляді тепла. Коли така реакція прискорюється - виникає горіння.

Після **ендотермічної** реакції тепловміст системи збільшується. Для підтримання більш енергоємних хімічних зв'язків продуктів реакції енергія поглинається ззовні.

Послідовність зміни енергії системи у ході горіння:

1. *тепловий імпульс достатньої потужності*, тобто він відповідає **енергії активації реакції**.

2. *активація системи – поява молекул з підвищеною енергією, АЦП*. 3.- 4. *реакція горіння та виділення тепла*:  $ГР + \beta (O_2 + 3,76 N_2) \rightarrow \Sigma n ПГ_i + Q_{гор}$

5. *передача тепла і розвиток пожежі*

## 2. ВИДИ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ

Теплоту згорання  $Q_{гор}$  екзотермічної реакції визнають за **законом Гесса**:

$$Q_{гор} = |\Delta H_{гор}| = Q_{гор} = \left| \sum_i n_i H_{фгг_i}^0 - H_{гг}^0 \right|, \text{ кДж/моль}$$

**Стандартна теплота згорання**  $Q_{гор}$  це кількість тепла, що виділяється при повному згоранні одиниці кількості ГР за стандартних умов, як у горючій ситемі, так і у продуктах горіння ( $T_{ст} = 298 \text{ К}$ ,  $P_{ст} = 101,3 \text{ кПа}$ ).

За одиницею виміру кількості ГР розрізняють теплоти згорання: на 1 моль ГР - *молярна*  $Q_{гор}$

(кДж/моль), 1 кг – *масова*  $Q'_{гор} = \frac{Q_{гор} \cdot 1000}{\mu}$ , кДж/кг, 1 м<sup>3</sup> - *об'ємна*  $Q''_{гор} = \frac{Q_{гор} \cdot 1000}{V_{\mu}}$ ,

кДж/м<sup>3</sup>.

В залежності від агрегатного стану води, яка утворилася в процесі горіння, розрізняють вищу  $Q_v$  та нижчу  $Q_n$  теплоту згорання.

*Нижча теплота згорання*  $Q_n$  це кількість тепла, що виділяється при повному згоранні одиниці кількості ГР за умови, що утворюється вода у газоподібному стані (гарячі ПГ). Якщо ПГ охолонули, то після переходу пари води у рідину (процес конденсації) виділяється додаткова енергія і утворюється *вища теплота згорання*  $Q_v$ :  $Q_v = Q_n + Q_{конденс}$

*Робоча теплота згорання*  $Q_n^p$  менша ніж  $Q_n$ , бо вона враховує: хімічний недопал,  $W$ ,

$Q_{випр}$  та ін. (волога ГР збільшує втрати на нагрів ГР, тобто теплоти виділяться менше).

Практичне значення теплоти згорання:

1. Визначення пожежної навантаги – кількості тепла, що виділяється з 1 м<sup>2</sup> пожежі.
2. Визначення горючості: якщо речовини не є вибухонебезпечними та їх  $Q_n < 2100$  кДж/кг вони є негорючими.
3. Розрахунок  $T_{гор}$ ,  $T_{виб}$ ,  $R_{виб}$ ,  $\phi_n$ , теплоти пожежі.

## 3. Розрахунок теплоти згорання складних ГР

Теплота згорання речовини визначається її складом (C, S, H, O) і залежить від вмісту вологи  $W$ . Для складних ГР визначають молярну теплоту згорання атомів у будові речовини C, H і S. Наприклад:  $C + (O_2 + 3,76 N_2) \rightarrow CO_2 + 3,76 N_2$

$$Q_v = |-393,8 - 0| = 393,8 \text{ кДж/моль. } Q'_{гор} = \frac{393,8 \cdot 1000}{12} = 32760, \text{ кДж/кг,}$$

$$Q_v' = 327,6 \cdot \phi_C + 1429,2 \cdot \phi_H + 92,8 \cdot \phi_S; \text{ кДж/ кг,}$$

Більш точна формула Менделєєва:  $Q_v' = 339,4 \cdot \phi_C + 1256,8 \cdot \phi_H + 108,9 (\phi_S - \phi_O - \phi_N)$ , кДж/ кг

де  $\phi_C, \phi_H, \phi_S, \phi_O, \phi_N$  - відсотковий вміст C, H, S, O, N %

$Q_n' = Q_v' - 25,1(9 \cdot \phi_H + W\%)$  кДж/ кг; де  $W\%$  - вміст вологи в горючій речовині.

Або, коли відомо відсотковий вміст газів у суміші:  $Q''_{n(v)сум} = \sum_{i=1}^n Q''_{n(v)i} \frac{\phi_i}{100}$

де  $Q''_{n(v)i}$  - теплота згорання і-го компоненту суміші, кДж/м<sup>3</sup> ;

$\phi_i$  – доля газу у суміші, %.

## 3. ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ.



Теплова енергія, що виділяється при горінні  $Q_{гор}$ , частково переходить у внутрішню енергію ПГ  $Q_{пг}$ , випромінюється із ЗГ  $Q_{випр}$  і йде на попередній нагрів та розкладання речовин, що реагують  $Q_{\lambda}$ . Теплота горіння сумується з кількістю тепла, що надходить у ЗГ з горючою сумішшю  $Q_{гс} \approx (1 - 3\%)Q_{гор}$ , і зменшується на кількість тепла, яка не виділилася у ЗГ внаслідок хімічного (нестача ОК) або фізичного недопалу (недостатній контакт між ГР і ОК)  $Q_{нед}$ :  $Q_{гс} + Q_{гор} - Q_{нед} = Q_{пг} + Q_{твт}$ ; (кДж/моль),

$Q_{твт}$  - кількість тепла, що втрачається з ЗГ шляхом випромінювання, конвекції і

теплопровідності.:  $Q_{твт} = Q_{\lambda} + Q_{кон} + Q_{випр}$ ;  $Q_{кон} \leq 0.4 Q_{гор}$

#### 4. ВИДИ ТЕМПЕРАТУРИ ГОРІННЯ РЕЧОВИН

Температуру, до якої нагріваються ПГ, називають **температурою горіння**. На розігрів ПГ від холодного стану витрачається  $Q_{кон}$ :

$$Q_{кон} = v_{пг} C_p (T_{гор} - T_0) \quad T_{гор} = \frac{Q_{кон}}{C_p v_{пг}} + T_0$$

де  $v_{пг}$  - об'єм ПГ;  $C_p$  - середньооб'ємний тепловміст ПГ;

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

**1. Калориметрична  $T_{гор}$  ( $Q_{пг} = Q_{н}$ )** – це найбільш спрощений розрахунок:

1) все тепло реакції йде на нагрів ПГ (теплообмін між ГС і навколишнім середовищем відсутній, тобто умови адіабатичні);  $Q_{нагрів\ пг} = Q_{кон} = Q_{гор}$ ;  $Q_{нед} = Q_{твт} = 0$

2) стехіометрична концентрація ГР ( $\alpha_n = 1$ ), немає нестачі або надлишку повітря, об'єм ПГ дорівнює теоретичному;

3) при утворенні ПГ не відбувається їх дисоціація;

4) нормальні початкові умови  $T_0 = 273K$  і  $P_0 = 101,3$  кПа:  $T_{гор} = \frac{Q_{н}}{C_p v_{пг}^0} + T_0$

**2. Теоретична  $T_{гор}$**  на відміну від калориметричної враховує тепловтрати на дисоціацію ПГ за температури більше  $1700^{\circ}C$  ( $Q_{пг} = Q_{н} - Q_{дис}$ ).  $2CO_2 = 2CO + O_2 - 566$  кДж;  $2H_2O = 2H_2$

+  $O_2 - 478$  кДж;  $T_{гор} = \frac{Q_{н} - Q_{дисоц}}{C_p v_{пг}^0} + T_0$

**3. Адіабатична  $T_{гор}$**  на відміну від калориметричної враховує надлишок повітря  $\alpha_n \geq 1$  ( $Q_{пг} =$

$Q_{н}$ ).  $T_{гор} = \frac{Q_{н}}{C_p v_{пг}} + T_0$

**4. Дійсна  $T_{гор}$**  це температура, до якої нагріваються ПГ в реальних умовах горіння з надлишком або нестачею повітря (недопал ГР, тепловтрати у навколишнє середовище, будь які початкові умови). Дійсна  $T_{гор}$  нижча за адіабатичну ( $Q_{пг} = Q_{н} - Q_{твт} - Q_{нед}$ ).

$$T_{гор} = \frac{Q_{н} - Q_{твт} - Q_{недоп}}{C_p v_{пг}} + T_0$$

Завдання на самопідготовку.

1. Демидов, Шандиба, Щеглов, Горіння та властивості горючих речовин, стор. 29 – 33.

2. Демидов, Саушев, Горіння та властивості горючих речовин, стор. 24-42.

Задачі: 1. Визначити  $Q_v$  (кДж/м<sup>3</sup>, кДж/моль) газової суміші:  $C = 30\%$ ,  $H_2 = 20\%$ ,  $N_2 = 50\%$ .

2. Визначити  $Q_n$ ;  $Q_v$  для октану  $\Delta H_f = -208,59$  кДж/ моль

3. Визначити  $Q_v$ ;  $Q_n$  Каучуку складу  $C - 85\%$ ,  $H - 14\%$ ,  $O - 1\%$ .

## Р.2. Л.4. КОНЦЕНТРАЦІЙНІ МЕЖІ ПОШИРЕННЯ ПОЛУМ'Я (КМПШ)

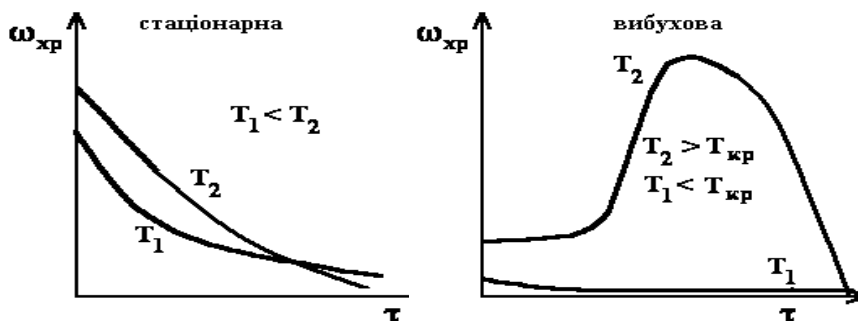
**План лекції:** 1. Умови утворення горючої системи. Поняття концентраційних меж поширення полум'я. 2. Фактори, що впливають на концентраційні межі поширення полум'я. 3. Практичне значення КМПШ.

**Ключові слова:** ГР, ОК, ДЗ; АЦП, ГС; тепловиділення реакції  $q(+)$ , тепловтрати  $q(-)$ , концентраційні межі поширення полум'я (КМПШ)  $\Phi_{н}$ ,  $\Phi_{в}$ , пожежна небезпека (ПНБ).

### 1. Умови та види виникнення горіння

Виникнення горіння - це швидкий перехід від повільної, стаціонарної реакції до миттєвої, вибухоподібної шляхом самоприскорення.

За стаціонарної реакції  $\Phi_{Гр}$ ,  $\Phi_{ок}$  і  $W_{хр}$  - зменшуються поступово зі зменшенням концентрації реагентів.

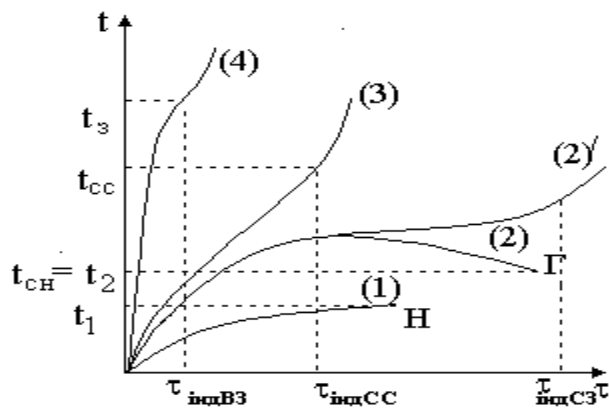


У вибухових реакцій за малих температур реакція стаціонарна, але за температури більше критичної вона різко прискорюється по схемі: час індукції, коли реакція повільна – різке прискорення реакції – різке гальмування реакції.

Горіння виникає після дії теплового імпульсу достатньої потужності на ГС. Це пояснює **теплова теорія виникнення горіння**: за високих температур у ГС швидкість руху молекул зростає, що прискорює реакцію. Тепло реакції  $q(+)$  підвищує температуру системи, тому виникає різниця температур і відповідна конвекційна тепловіддача від ГС в навколишнє середовище  $q(-)$ .

$$q(-) = \alpha(T - T_0) S; \quad q(+) = Q_H V_{ГС} w_{ХР}; \quad W_{ХР} = \Phi_{ГР}^n \Phi_{ОК}^m k \exp(-E_{акт}/RT)$$

За температури самонагрівання  $T_{сн}$  виконується критична теплова умова  $q(+)=q(-)$  і виникає **самонагрів** внаслідок накопичення тепла і підвищення



температури при протіканні внутрішніх екзотермічних процесів. За таких умов реакція

може самоприскоритись з наступним виникненням горіння. Якщо  $q(+)$  <  $q(-)$  реакція гальмується, горіння припиняється.

1. *Самонагрівання немає.* За температури нагрівача  $t_1$  процесів окиснення немає, температура матеріалу не перевищить  $t_1$ .

2. *Самонагрівання існує, але до горіння не перейде.* Температура нагрівача  $t_2$  є температурою самонагрівання  $T_{сн}$ . Температура системи спочатку збільшується, але реакція окиснення зменшує концентрації ГР та ОК, тому  $W_{ХР} \downarrow q(+)$  і за умови  $q(+)$  <  $q(-)$  -  $T \downarrow$  до  $t_2$ .

2. *Самонагрів твердої речовини призведе до самозаймання,* якщо за температури  $t_2$  є умови для накопичення тепла. Оскільки  $q(-)$  малий, то  $q(+)$  >  $q(-)$  і є повільний самонагрів.

3. При нагріві всієї горючої повітряної системи до критичної температури  $t_{сс}$  швидкий самонагрів призведе до *самоспалахування* усієї системи водночас.

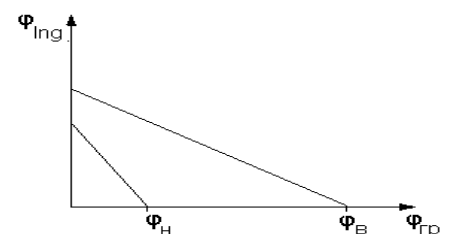
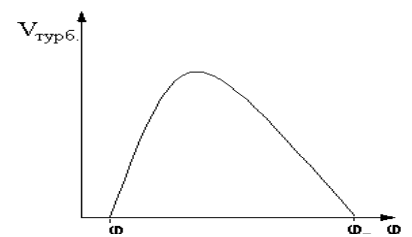
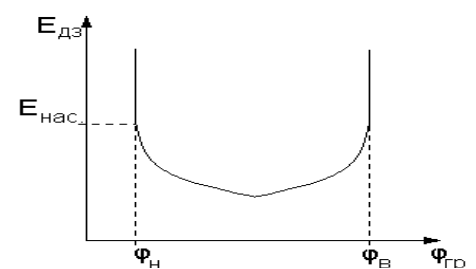
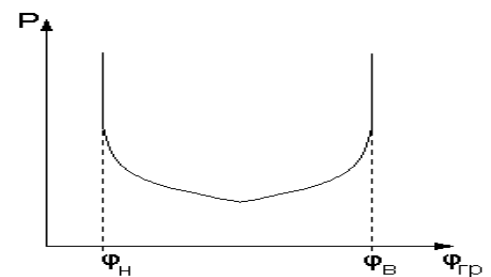
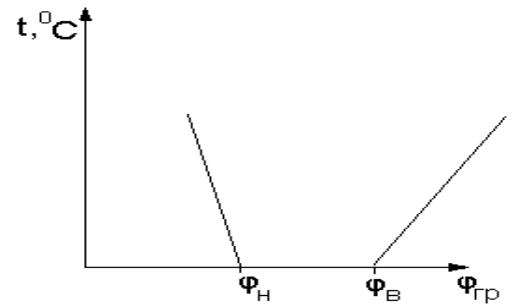
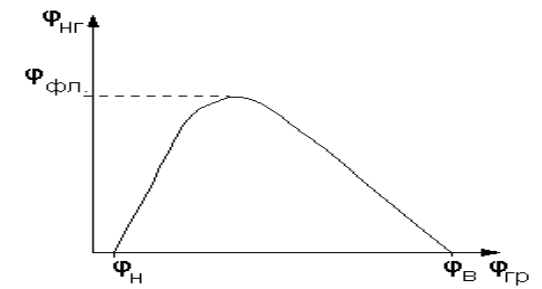
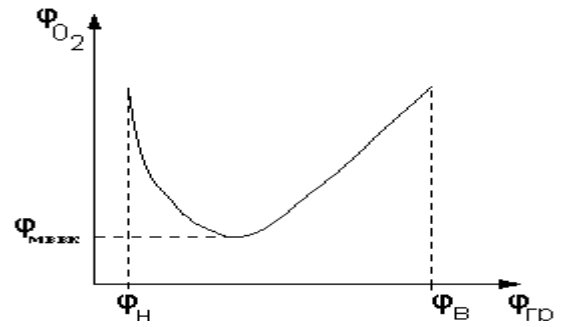
4. При дії джерела запалювання з  $T_3 \gg T_{сн}$  на частку ГС, її температура зростає дуже інтенсивно і відбувається *вимушене запалювання*.

Таким чином, існують наступні види виникнення горіння: *самозаймання, самоспалахування, вимушене запалювання.*

*Загальні риси видів виникнення горіння: 1.  $T_0 > T_{кр}$ ; 2.  $q(+)$  >  $q(-)$ ; 3. Існує **період індукції**  $\tau_{інд}$  – затримка часу перед виникненням горіння, за який відбуваються самонагрів і підготовчі процеси у ГС: нагрів; розкладання або випаровування ГР; окиснення з виділенням тепла; самонагрів від  $T_0$  до  $T_{гор}$ ; виникнення горіння.*

## 2. Характеристика КМПП

На практиці можуть утворюватися як замалі, так і завеликі концентрації ГР, коли *горючої системи* не має, а реакція окиснення повільна, тепло-ділення



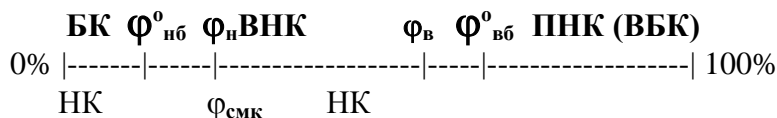
слабке і така суміш ГР + ОК не здатна самостійно горіти. Але існують концентрації, за яких виконується умова виникнення горіння  $q(+)=q(-)$ .

**Ланцюгова теорія Семенова** пояснює наявність меж горючих концентрацій утворенням АЦП зі швидкістю, яка дорівнює швидкості їх загибелі. При нестачі ГР або ОК утворення АЦП повільне, а швидкість обриву ланцюгової реакції велика, тому  $\omega_{xp} \downarrow$ , горіння припиняється.

*Тобто існує як мінімальна, так і максимальна концентрація горючого газу, пари або пилу у суміші з повітрям, за якої настають критичні умови виникнення та поширення полум'я.*

**Нижня КМПП ( $\varphi_n$ )** - найменша концентрація ГР у повітрі, за якої вже можливе виникнення та поширення горіння,  $\alpha > 1$ .

**Верхня КМПП ( $\varphi_v$ )** - найбільша концентрація ГР в суміші з повітрям, за якої ще можливе виникнення та поширення горіння,  $\alpha < 1$ .



1. За  $\varphi_n < \varphi_{гр} < \varphi_v$  вибухонебезпечні концентрації (ВНК) – гомогенне кінетичне горіння.
2. За  $\varphi_{гр} < \varphi_n$  горіння не виникає, це безпечні концентрації (БК).
3. За  $\varphi_{гр} > \varphi_v$  - це вибухонебезпечні концентрації (ВБК), але пожежонебезпечні (ПНК), за яких неможливе кінетичне горіння але можливе дифузійне.
4. НК – запалювання суміші можливе за зміни умов у суміші. Тому забезпечення пожежної безпеки визначають ще й безпечні межі концентрацій, нижче або вище яких ГС не буде запалюватися при зміні умов:

$$\varphi_{факт}^0 \leq \varphi_{нб}^0 = 0,9(\varphi_n^0 - 0,21), \%$$

$$\varphi_{факт}^0 \geq \varphi_{вб}^0 = 1,1(\varphi_v^0 + 0,42), \%$$

### 3. ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ШИРИНУ КМПП.

*Якщо фактор призводить до  $q(+)\uparrow$ , КМПП розширюються ( $\varphi_n\downarrow, \varphi_v\uparrow$ ), якщо до  $q(+)\downarrow$ , КМПП звужуються ( $\varphi_n\downarrow, \varphi_v\uparrow$ ).*

#### 1. Концентрація кисню в повітрі

$\varphi_{O_2}\downarrow, W_{xp}\downarrow, q(+)\downarrow$  ( $\varphi_n\uparrow, \varphi_v\downarrow$ ) ПНБ $\downarrow$ . Існує мінімальна вибухонебезпечна концентрація кисню  $\varphi_{мвкк}$ , КОЛИ  $\varphi_n = \varphi_v$ .

#### 2. Концентрація негорючих газів

Негорючі газы розбавляють ГС:

$\varphi_{O_2}\downarrow$  та  $\varphi_{ГР}\downarrow, W_{xp}\downarrow, q(+)\downarrow, \varphi_v\downarrow$  ПНБ $\downarrow$ . Якщо  $\varphi_{нг}$  менше мінімальної флегматизуючої концентрації  $\varphi_{фл}$ , негорючого газу, то горіння не можливе.

#### 3. Початкові температура та тиск.

$T_0\uparrow, W_{xp}\uparrow, q(+)\uparrow, q(-)\downarrow$  ( $\varphi_n\downarrow, \varphi_v\uparrow$ ). ПНБ $\uparrow$

$$\varphi_{н(в)}^t = \varphi_{н(в)}^0 (1 - (t-25)/z); \text{ де } z = 1250 \text{ (для } \varphi_n), z = -800 \text{ (для } \varphi_v).$$

$P\uparrow, \varphi_{O_2}\uparrow$  та  $\varphi_{ГР}\uparrow, W_{xp}\uparrow, q(+)\uparrow$  ( $\varphi_n\downarrow, \varphi_v\uparrow$ ). ПНБ $\uparrow$

Так, для  $C_2H_2$  у повітрі за (1 атм)  $\varphi_v = 81\%$ , (1,5 атм)  $\varphi_v \approx 100\%$ ,

2,7 атм. - тепловий вибух за нормальних умов.

Горіння ГР стає неможливим за деякого мінімального тиску.

#### 4. Потужність джерела запалювання

Запалювання можливе якщо  $E_{дз} > E_{min}$  ( $\varphi_n = \varphi_v$ ).  $E_{дз}\uparrow, W_{xp}\uparrow, q(+)\uparrow$  ( $\varphi_n\downarrow, \varphi_v\uparrow$ ). ПНБ $\uparrow$ , що прискорює випаровування, розкладання, активацію. При досягненні насиченої потужності  $E_{нас}$  ця залежність зникає.

#### 5. Наявність турбулентності

Швидкий рух газового потоку  $V_{турб}$  збільшує охолодження  $q(-)$ , ( $\varphi_n\uparrow, \varphi_v\downarrow$ ) ПНБ $\downarrow$

### 6. Наявність каталізаторів і інгібіторів.

Каталізатори  $W_{xp} \uparrow$  ( $\Phi_n \downarrow, \Phi_v \uparrow$ ) ПНБ  $\uparrow$ , а інгібітори -  $W_{xp} \downarrow$  ( $\Phi_n \uparrow, \Phi_v \downarrow$ ) ПНБ  $\downarrow$ .

### 4 КМПП ЗАСТОСОВУЮТЬ ДЛЯ:

1. Для порівняння ПНБ декількох речовин. Наприклад:

	$\Phi_n$	$\Phi_v \%$	
Бутан C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> -	1,8	9;	
бутену C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> -		1,6	10;
вінілацетилену C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> -		1,8	53,2%.

ПНБ найбільша у вінілацетилену, оскільки його КМПП ширше.

2. Для оцінки ПНБ фактичної концентрації ГР. Тобто порівнюють фактичну  $\Phi_{\text{факт}}$  з КМПП.

3. Для визначення ВБК парів і газів у технологічному обладнанні

$$(\Phi_{\text{нб}}^0 < \Phi_{\text{без}}^0 > \Phi_{\text{вб}}^0).$$

4. Визначення БК для проведення вогневих робіт ( $\Phi_{\text{без}}^0 < \Phi_{\text{нб}}^0$ ).

**Завдання на самопідготовку:** 1. Вивчити літературу:

1. Демидов, Шандыба, Щеглов. - Горіння і властивості горючих матеріалів. СТОР. 85-104.

2. Демидов, Саушев. - Горіння і властивості горючих матеріалів. СТОР. 152-181.

2. Підготуватися до практичного заняття.

## Л 5. ОСНОВИ ТЕОРІЇ САМОСПАЛАХУВАННЯ РЕЧОВИН

**План лекції:** 1. Теплова теорія самоспалахування. 2. Фактори, що впливають на  $T_{\text{cc}}$ . 3. практичне значення  $T_{\text{cc}}$

**Ключові слова:** Самоспалахування (СС), самонагрівання (СН), період індукції ( $\tau_{\text{інд}}$ ),  $W_{xp} T_0$  ГС,  $T_{\text{сн}}$   $T_{\text{cc}}$ (СС), (СН), ( $\tau_{\text{інд}}$ ),  $l_{\text{cp}}$  середня довжина карбонового ланцюга. ПНБ

### 1. Теплова теорія самоспалахування

*Провести дослід, показати самонагрівання і самоспалахування.*

СС виникає якщо вся горюча повітряна суміш нагріта від гарячих стінок до критичної температури, за якої тепловиділення  $q(+)$  більше за тепловіддачу  $q(-)$  і система без додаткового впливу займається.

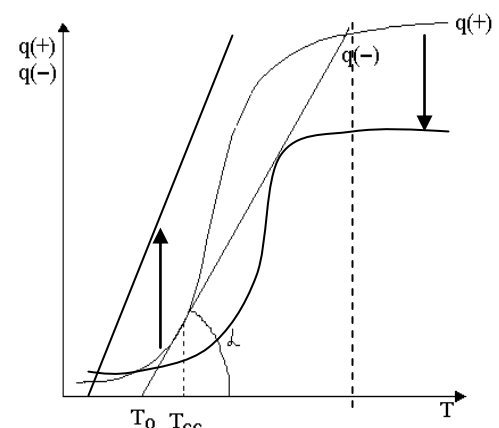
Суміш самонагрівається теплом реакції окиснення. Чим більша температура, тим більше швидкість реакції  $q(+)=Q_n V_{\text{гс}} w_{\text{х.р}}$ . Але  $W_{xp}$  має максимум і зростання  $q(+)$  припиняється. Коли  $T_{\text{газу}} > T_0$  виникає  $q(-)$  шляхом конвекції пропорційно коефіцієнту тепловіддачі  $\alpha$  від газу через стінки посудини з поверхнею  $S$  і температурою  $T_0$ :  $q(-)=\alpha(T - T_0) S$

В точці дотику графіків за  $T_{\text{cc}}$  виконується *критична умова виникнення горіння:*

$q(+)=q(-)$  – нестійка рівновага функцій

$$\left. \frac{dq(+)}{dT} \right|_{T_{\text{cc}}} = \left. \frac{dq(-)}{dT} \right|_{T_{\text{cc}}} > 0 \text{ - зростання функцій з}$$

однаковою швидкістю



$$\left. \frac{d^2 q(+)}{dT^2} \right|_{T_{cc}} > 0 \text{ - прискорення зростання } q(+)$$

Підставляючи  $q(+)$  і  $q(-)$ :

$$Q_n V_{гс} \Phi_{гг} \Phi_{ок} \exp(-E_{акт}/RT_{cc}) = \alpha(T_{cc} - T_0) S$$

$$Q_n V_{гс} \Phi_{гг} \Phi_{ок} \exp(-E_{акт}/RT_{cc}) E_{акт}/RT_{cc}^2 = \alpha S$$

звідси  $T_{cc}$ :  $T_{cc} = T_0 + RT_0^2/E_{акт}$  Тобто для теплового самоспалахування необхідний початковий розігрів ГС від  $T_0$  до  $T_{cc}$ :  $\Delta T = T_{cc} - T_0 = RT_0^2/E_{акт}$ .

$T_{cc}$  це найменша температура системи, за якої різко збільшується швидкість екзотермічної реакції і порушується теплова рівновага. При цьому виникає стрибкоподібний підйом температури за рахунок самонагрівання ГС. Через час індукції досягається температура горіння.  $\tau_{інд}$  при СС залежить від виду ГР; складу ГС ( $\Phi_{гг}$ ,  $\Phi_{ок}$ ,  $\Phi_{нг}$ ),  $T_0$ ;  $P_0$ . Якщо  $T_0 \downarrow$ ,  $\tau_{інд} \uparrow$ .

Тому  $T_{cc}$  це температура стінок посудини, за якої  $\tau_{інд}$  є максимальним.

За  $T_{cc}$  існує *нестійка рівновага* і може початися самонагрів ГС, що призведе до виникнення горіння. За  $T_{гор}$  існує *стійка рівновага*: якщо підняти температуру, то  $q(-) \uparrow$  і температура упаде, та навпаки. При зменшенні  $q(+)$  ( $P_0 \downarrow$ ) або збільшенні  $q(-)$  ( $T_0 \downarrow$ ,  $\alpha \uparrow$ ) критична умова  $q(+)$  =  $q(-)$  не досягається.

## 2. ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА $T_{cc}$ .

**2.1. Вплив  $q(+)$  і  $q(-)$  на  $T_{cc}$ .** Якщо  $q(+)$   $\uparrow$ ,  $T_{cc}$  досягається раніше, тобто  $T_{cc} \downarrow$ ,  $\tau_{інд} \downarrow$ . Якщо  $q(-) \uparrow$  і  $T_{cc} \uparrow$ ,  $\tau_{інд} \uparrow$ . За математичними виразами для  $q(+)$  і  $q(-)$  виділяють три групи факторів:

1) **Хімічна будова ГР:**  $Q_n$ ; середня довжина карбонового ланцюга (залежить від будови і просторової структури ГР)  $l_{сер}$ ;

2) **Склад ГС:**  $\Phi_{гг}$ ;  $\Phi_{ок}$ ; наявність негорючих газів  $\Phi_{нг}$ ; каталізаторів  $\Phi_{кат}$  або інгібіторів  $\Phi_{інг}$ .

3) **Умови, в яких знаходиться ГС:**  $P_0$ ,  $T_0$ ; об'єм  $V_{гс}$ , діаметр судини; площа тепловідводу  $S$ ; коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$ .

**2.2. Хімічна будова ГР.** При збільшенні середньої довжини карбонового ланцюга  $l_{сер}$   $T_{cc} \downarrow$ , бо енергія молекули витрачається на протидію обертанню і коливанню. Чим більш компактна молекула, тим вона більш стійка. Найбільша  $T_{cc}$  у разголужених насичених (зв'язок С-С) та ароматичних вуглеводнів (С-С). Ненасичені зв'язки (С=С), кисневмісні (С-О, С=О) розриваються легше, тому  $T_{cc} \downarrow$ . Дія факторів на  $T_{cc}$

Фактор	Механізм дії	$q(+)$	$q(-)$	$T_{cc}$	ПНБ
1. $Q_n \uparrow$	-	$\uparrow$	-	$\downarrow$	$\uparrow$
$l_{сер} \uparrow$	$E_{акт} \downarrow$ $W_{xp} \uparrow$	$\uparrow$	-	$\downarrow$	$\uparrow$
2. $\Phi_{гг} = \Phi_{стм}$	$W_{xp} = \max$	$\max$	-	<b>min</b>	$\max$
$\Phi_{O_2} \uparrow$	$W_{xp} \uparrow$	$\uparrow$	( $\downarrow$ )	$\downarrow$	$\uparrow$
$\Phi_{нг} \uparrow$	$\Phi_{гг}$ ; $\Phi_{ок} \downarrow$ $W_{xp} \downarrow$		$\downarrow$	( $\uparrow$ )	$\uparrow$
$\Phi_{інг} \uparrow$	$E_{акт} \uparrow$		$\downarrow$	-	$\uparrow$
$\Phi_{кат} \uparrow$	$E_{акт} \downarrow$	$\uparrow$	-	$\downarrow$	$\uparrow$
3. $P \uparrow$	$\Phi_{гг}$ ; $\Phi_{ок} \uparrow$	$\uparrow$	( $\downarrow$ )	$\downarrow$	$\uparrow$
$T_0 \uparrow$	$W_{xp} \uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\uparrow$
$V_{гс} \uparrow$	$S_{пит} = S/V \downarrow$ $\alpha \downarrow$	-	$\downarrow$	$\downarrow$	$\uparrow$
$V_{гс} < \min$	$S_{пит} \uparrow$ $\alpha \uparrow$	-	$\max$	$\uparrow$	немає

**2.3. Склад ГС ( $\Phi_{гг}$ ;  $\Phi_{ок}$ ;  $\Phi_{нг}$ ;  $\Phi_{інг}$ ;  $\Phi_{кат}$ )** впливає на  $W_{xp}$ , і відповідно на  $q(+)$ .

1.  $\Phi_{гг}$ . При  $\Phi_{гг} < \Phi_{гг} > \Phi_{в}$  ГС не самоспалахує.

2.  $\Phi_{ок} \uparrow$   $W_{xp} \uparrow$ ,  $q(+)$   $\uparrow$ , водночас зменшуються витрати на нагрів негорючого газу  $q(-) \downarrow$ , тому  $T_{cc} \downarrow$ .

3.  $\Phi_{нг} \uparrow$  Негорючі газы розбавляють ГС, знижують концентрації  $\Phi_{гг} \downarrow$   $\Phi_{ок} \downarrow$   $W_{xp} \downarrow$ ,  $q(+)$   $\downarrow$ . Збільшуються витрати на нагрів НГ  $q(-) \uparrow$ , тому  $T_{cc} \uparrow$ .

4.  $\Phi_{кат}$  або інгібіторів  $\Phi_{інг}$ . Інгібітори (наприклад антидетонатори) гальмують процеси низькотемпературного окиснення вуглеводнів,  $W_{xp} \downarrow$ ,  $q(+)$   $\downarrow$ , а  $T_{cc} \uparrow$ .

Каталізатори  $W_{xp} \uparrow$ ,  $q(+)\uparrow$  а  $T_{cc} \downarrow$ . Так,  $T_{cc}$  для  $C_6H_6$  в судині з кварцу  $571^\circ C$ , з цинку -  $721^\circ C$ .

### 3.4. Умови у ГС

1. *Об'єм і діаметр посудини.* При збільшенні об'єму реакційної судини зменшується питома поверхня ( $S_{уд}=S/V$ ), тепловіддача зменшується  $\alpha \downarrow$  і відносні втрати тепла зменшуються  $q(-)\downarrow$ ,  $T_{cc} \downarrow$ . Є мінімальний діаметр судини, менше якого тепловий вибух не відбувається. Збільшення поверхні тепловіддачі без зміни об'єму діє так само. Так працюють вогнеперешкоджувачі у технологічних апаратах (щілині, сітки, касети, гравійні засипки).

2.  $T_0, P_0$ : При  $T_0 \uparrow$   $W_{xp} \uparrow$ ,  $q(+)\uparrow$   $q(-)\downarrow$  а  $T_{cc} \downarrow$ .

$P \uparrow$   $\Phi_{O_2} \uparrow$  та  $\Phi_{ГР} \uparrow$   $W_{xp} \uparrow$   $q(+)\uparrow$   $T_{cc} \downarrow$ .

### 3. ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ $T_{cc}$

1. Порівняння ПНБ речовин за  $T_{cc}$ . У Державному Стандарті 12.1.044-89 цей показник є обов'язковим для ГР в усіх агрегатних станах.  $T_{cc}$  визначають методами: 1) впускання готової стехіометричної ГС у вакуумовану нагріту посудину; 2) адиабатичне стиснення стехіометричної ГС; 3) горючу рідину за стандартних умов капають у нагріту колбу установки СТС для утворення стехіометричної ГС. 4) Розрахункові методи: за  $l_{cp}$ , за гомологічним рядом.

Група вибухонебезпечних сумішей	Температура самоспалахування, $^\circ C$
T1	більше за 450
T2	300-450
T3	200-300
T4	135-200
T5	100-135
T6	85-100

2. *Визначення групи вибухонебезпечних сумішей*

ГР з повітрям по ГОСТ 12.1.011 - 78.

2. *Визначення допустимої температури нагріву робочих поверхонь технологічного обладнання* (ГОСТи 12.1.004-85 і 12.1.010-76). Максимальна безпечна температура:  $T_{без} \leq 0,8 T_{cc}$

Так, при використанні сірковуглецю  $T_{cc} = 90^\circ C$ , забороняється використання парового опалювання яке має  $T = 95^\circ C$ .

Завдання на самопідготовку: 1. Вивчити літературу:

Демидов, Шандыба, Щеглов - Горение и свойства горючих материалов, с.42-64.

И.М.Абдурагимов и др. - Процессы горения, стр.58-85

А.И.Розловский. Основы взрывобезопасности при работе с горючими газами, с. 129-153.

## Р.2. Конспект лекції № 6

### СУТНІСТЬ САМОЗАЙМАННЯ. ТЕПЛОВЕ САМОЗАЙМАННЯ

**План лекції:** 1. особливості процесів самозаймання. 2. умови і фактори виникнення самозаймання. 3. теплове самозаймання

**Ключові слова:** Самозаймання (СЗ), летючі продукти розкладання (ЛПР),  $T_{сн}$ ,  $CC$ ,  $CH$

#### 1. ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ САМОЗАЙМАННЯ.

*Дослід самозаймання. Чим пояснити появу полум'яного горіння без попереднього нагріву речовини і без впливу джерела запалювання? Дати висловити думку бажаним і зробити узагальнюючий висновок.*

Самозаймання виникає у скупченні твердого матеріалу, у зоні з малою  $q(-)$ , тому за умов не дуже великого  $q(+)$  може скластися умова  $q(+)$  >  $q(-)$ . Найменшу температуру речовини, за якої виникає її самонагрів, називають *температурою самонагрівання*  $T_{сн}$ . Виникнення горіння речовин за рахунок їх самонагріву під впливом внутрішніх екзотермічних процесів і відсутності джерела запалювання називають **самозайманням**. До самозаймання схильні тверді речовини: деякі метали, вугілля, торф, рослинні матеріали. Так, алюмінієва пудра самонагрівається вже при  $10^\circ C$ .

Розрізняють **пірофорні** речовини в яких  $T_{сн} < 50^\circ C$ . вони здатні до горіння без додаткового нагріву, тому що  $T_0 \geq T_{сн}$ . Речовини в яких  $T_{сн} > 50^\circ C$ , здатні до запалювання лише при їх нагріві.

Для СЗ **необхідні** умови: 1) первинний тепловий імпульс всередині системи, який викликає окислення ГР 2) накопичення тепла всередині системи можливе якщо  $q(+)$  >  $q(-)$ . Після цього виникає самонагрів, який закінчується самозайманням через період індукції.

#### 2. ВІДМІННОСТІ СЗ ВІД СС.

1. Нагрівається і самоспалахує вся горюча повітряна суміш за рахунок нагріву ззовні. Самозаймається осередок у скупченні твердого матеріалу, в якому найменша  $q(-)$  і тому максимальна температура.
2. До СЗ схильні пористі, волокнисті, сипучі тверді речовини, в середину яких може проникати кисень та в яких може накопичуватись тепло.
3. При СС горіння гомогенне кінетичне. При СЗ - дифузійне гетерогенне (окиснення по внутрішній поверхні твердої речовини в порах). Процес починається вглибині матеріалу у формі тління, яке може перейти в полум'яне горіння на поверхні.
4. Період індукції при СЗ значно більший, ніж при СС, і може досягати декількох місяців.
5. СЗ виникає на виробництві частіше, ніж СС. *Це пожежі на елеваторах, вугільних складах, комбікормових заводах, при зберіганні хімічних речовин.*
6. До СС призводить самонагрівання при окисленні ГР. До СЗ призводить самонагрівання за рахунок екзотермічних процесів: 1) фізичні, 2) хімічні, 3) мікробіологічні, 4) процеси теплового розкладання.

Тому за *первинним чинником самонагрівання* речовини розрізняють види СЗ: - мікробіологічне, - хімічне, - фізичне; - теплове.

Хімічне СЗ виникає в місці контакту речовин, що реагують з виділенням тепла. Розрізняють реакції: 1. з киснем повітря. 2) водою 3) іншим окисником.

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

Мікробіологічне СЗ *властиве рослинним матеріалам, в яких можливе життя мікроорганізмів, за тривалого зберігання в умовах вологості.*

Теплове СЗ *виникає при нагріві речовини до температури розкладання. Окиснення продуктів розкладання ГР ініціює самонагрів.*

### 3. ФАКТОРИ ВИНИКНЕННЯ САМОЗАЙМАННЯ.

СЗ виникає за умов, що сприяють накопиченню тепла в системі. Тобто призводять до  $q(+)>q(-)$

При окисленні матеріалу виділяється тепло:  $q(+)=Q\rho_m K\Phi_{ок}$

Це тепло витрачається на нагрів матеріалу і повітря, на втрати тепла в навколишнє середовище, на випаровування вологи  $\Phi$ , шляхом теплопровідності.  $q(-)=q_{нагр матер} + q_{нагр пов.} + q_{втрат} =$

$$= \rho_m c_m dT/d\tau + \rho_n c_n w_n dT/dy + \lambda \nabla^2 T + \alpha_k S(T-T_0) + \Phi$$

де  $Q$  - теплота реакції окислення;  $K$  - константа швидкості адсорбції;

$\rho_m$   $\rho_n$   $c_m$ ,  $c_n$   $dT/d\tau$ ,  $dT/dy$  – густина, теплоємність, швидкість нагріву матеріалу і повітря;

$v_{пов}$  - швидкість потоку повітря;

$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності матеріалу;

$\nabla^2 T$  - зміна в часі температурного поля

За критичними умовами СЗ  $q(+)=q(-)$  бачимо фактори, що впливають на можливість СЗ:

1. Хімічні:  $\Phi_{ок}\uparrow$ ,  $T_{сн}\downarrow$  ПНБ $\uparrow$   
Еакт $\downarrow$   
 $Q\uparrow$ .

2. Фізичні:  $S_{пит}$ , дисперсність, пористість, сумарна поверхня часток, кількість повітря в матеріалі, вологість,  $\rho_m$ ,  $c_m$ ,  $c_n$ .

$c_m$ ,  $c_n$ . $\uparrow$   $T_{сн}\uparrow$  ПНБ $\downarrow$

Самозаймання виникає, коли  $S_{пит}$  мала, а площа поверхні реагування  $S_{xp}\gg S_{зовн}$ . Так, при зменшенні висоти штабелю вугілля  $S_{зовн}\uparrow$   $S_{пит}\uparrow$ ,  $q(-)\uparrow$  і самозаймання стає неможливим.



3. Стан навколишнього середовища,  $T_0$ ,  $\nu_{пов. \alpha}$

$T_0 \uparrow$ ,  $q(-) \downarrow$   $T_{сн} \downarrow$  ПНБ  $\uparrow$   
 $\alpha \uparrow$   $q(-) \uparrow$   $T_{сн} \uparrow$  ПНБ  $\downarrow$

#### 4. ТЕПЛОВЕ САМОЗАЙМАННЯ

##### Стадії теплового СЗ:

1. Тривалий зовнішній нагрів
2. За критичної температури починається розкладання речовини на летючі та тверді продукти.
3. Окиснення ЛПР киснем з виділенням тепла.
4. Накопичення тепла реакції, що прискорює розкладання і окиснення.
5. Окиснення твердого вуглецевого залишку з виділенням тепла.
6. При акумуляції тепла виникає самозаймання у вигляді тління.
7. Поява полум'яного горіння.

*Приклад пожежі в сауні, на комбикормовому заводі.*

Схильність речовин до теплового СЗ визначають за показниками: 1. Мінімальна  $T_{сн}$  матеріалу. 2. Період індукції. 3. Питома поверхня матеріалу  $S_{пит} = S_{повн} / V$

За експериментом, якщо в матеріалі температура підіймається вище ніж в нагрівачі, значить існують процеси з виділенням тепла і даний матеріал схильний до самозаймання.

##### **ЗАВДАННЯ НА САМОПІДГОТОВКУ:**

Вивчити літературу: 1. Демидов, Шандыба, Щеглов - Горение и свойства горючих материалов, с.68-70,

2. И.М.Абдурагимов и др. - Процессы горения, стр.58-85

3. Демидов, Саушев - Горение и свойства горючих веществ, стр.121-131.

## **Р.2. Л.7. ХІМІЧНЕ, ФІЗИЧНЕ, МІКРОБІОЛОГІЧНЕ САМОЗАЙМАННЯ.**

План лекції: 1. **ХІМІЧНЕ СЗ** при контакті з киснем повітря, водою, іншими окисниками. 2. Фізичне СЗ. 3. Мікробіологічне СЗ.

Ключові слова: СЗ, ЛПР, ТВЗ, ПНБ

### **1. ХІМІЧНЕ СЗ**

#### **1.1. СЗ ПРИ КОНТАКТІ З КИСНЕМ ПОВІТРЯ.**

##### **1. Хімічно активні сполуки:**

Лужні, лужноземельні метали, алюміній, білий та жовтий фосфор на повітрі активно окислюються. Рубідій та цезій самозаймаються в кусковому вигляді, інші – лише як порошки.



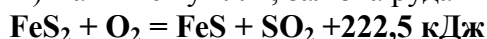
Пляшки с запальною сумішшю - розчин фосфору у сірковуглеці. Сірковуглець випаровується, а фосфор окислюється та самозаймається.

2. Металоорганічні сполуки (етилат натрію  $C_2H_5ONa$ , триетілалюміній  $(C_2H_5)_3Al$ ).

3. Елементоорганічні сполуки –  $SiH_4$ ,  $P_2H_4$ ,  $H_3As$ .

4. Пірофорне сірчисте залізо. Сульфід заліза  $FeS$ ,  $FeS_2$ ,  $Fe_2S_3$ .

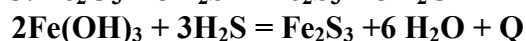
А) Кам'яне вугілля, залізна руда містить пірит  $FeS_2$  ;



В присутності вологи:  $2FeS_2 + 7,5O_2 + H_2O = Fe_2(SO_4)_3 + H_2SO_4 + 2777,5 \text{ кДж}$

б) Нафтопродукти містять  $H_2S$ .

При корозії резервуару та  $T < 300^\circ C$ :  $Fe_2O_3 + 3H_2S = Fe_2S_3 + 3H_2O$



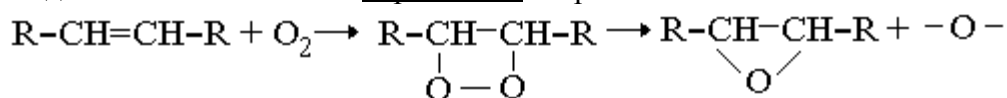
Тепловиділення цих реакцій викликає СЗ пірофорного заліза на стінках резервуара, що може призвести до вибуху пари горючих рідин.

Заходи безпеки: 1) очищення нафти від сірководню. 2) антикорозійне покриття, 3) видалення O<sub>2</sub> інертними газами, 4) охолодження водою.

**5. Жири, олії та обмаслені матеріали.** C3 масел відбувається за рахунок тепловиділення при окисленні і полімеризації, що протікають по місцю ненасичених(подвійних) зв'язків C=C.

Чим більше таких зв'язків, тим більше схильність масла до самозаймання

Стадії окиснення масел за перекісною теорією Баха:



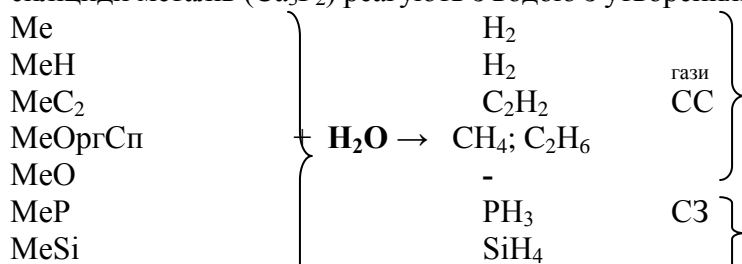
Мінеральні масла отримують з нафти, містять насичені вуглеводні (C-C), до C3 не схильні.

Ненасичені зв'язки утворюються після перегріву і схильність масла до C3 підвищується.

Рослинні та тваринні масла і жири містять гліцериди – складні ефіри гліцерину і карбонових кислот: C<sub>3</sub>H<sub>5</sub>(COOR)<sub>3</sub>, де R – радикал карбонової кислоти. Гліцериди насичених кислот (R = C<sub>n</sub>H<sub>2n+1</sub>) є основною частиною тваринних жирів, до C3 не здатні. Гліцериди ненасичених кислот (R = C<sub>n</sub>H<sub>2n-x</sub>) є основною частиною рослинних жирів, мають ненасичені (C=C) зв'язки, тому рослинні масла схильні до C3.

### 1.2. C3 ПРИ КОНТАКТІ З ВОДОЮ

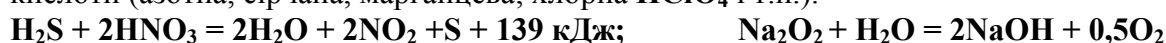
1. Лужні метали, гідриди, металоорганічні сполуки і карбіди (Na, KN, Be(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) реагують з водою з виділенням горючих газів, які самоспалахують, 2. Оксиди, пероксиди, карбіди (CaO, Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>C<sub>2</sub>) реагують з водою з виділенням тепла, яке може викликати C3. 3. Фосфіди та силіциди металів (Ca<sub>3</sub>P<sub>2</sub>) реагують з водою з утворенням речовин, здатних до C3 на повітрі.



### 1.3. C3 РЕЧОВИН ПРИ КОНТАКТІ З ХІМІЧНИМИ ОКИСНИКАМИ

Газоподібні окислювачі: F<sub>2</sub>; Cl<sub>2</sub>; O<sub>2</sub>; O<sub>3</sub> активно реагують з багатьма ГР з виділенням тепла, що викликає C3: **Na + 0,5Cl<sub>2</sub> = NaCl + 412 кДж**

Рідкі окислювачі: пероксиди водню, лужних і лужноземельних металів, оксигенвмісні кислоти (азотна, сірчана, марганцева; хлорна HClO<sub>4</sub> і т.п.).



Тверді окислювачі: оксиди і солі оксигенвмісних кислот з високою мірою окислення CrO<sub>3</sub>;

Mn<sub>2</sub>O<sub>7</sub>; K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>; KMnO<sub>4</sub>; AgNO<sub>3</sub>; CuSO<sub>4</sub>. K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>, добрива і отрутохімікати.



## 2. ФІЗИЧНЕ САМОЗАЙМАННЯ

**Фізичне** C3 виникає за рахунок тепла адсорбції (вугілля) та тертя (обмаслена ганчірка на вібруючій поверхні). Стадії C3 вугілля:

1. Тепловиділення при адсорбції кисню .
2. Накопичення тепла у глибині штабеля, T↑ до 60°C.
3. При T = 60°C самонагрів різко прискорюється.
4. **Хемосорбція кисню з** утворенням пероксидних комплексів.
5. T = 150°C - розкладання пероксидних комплексів на ЛПР і ТВЗ.
6. Саморозігрів при окисненні ЛПР. T↑ до 200-210°C.
7. Окиснення ТВЗ, T↑ до 450 °C.
8. W<sub>xp</sub>↑ T↑, самонагрівання переходить в самозаймання.
9. Поширення горіння на весь матеріалу.

*Фізичне C3 залежить від:* виду вугілля; притоку повітря, щільності укладання, міра подрібнення, наявності вологи, піриту; інтенсивність віддачі тепла в навколишнє середовище q(-), кількість летючих компонентів Vdaf.

Класи вугілля за ПНБ: **A** - небезпечне,  $V_{daf} > 12\%$ ,  $T_{сн} < 130^{\circ}\text{C}$  – молоде вугілля; **B** - стійке,  $V_{daf} < 12\%$ ,  $T_{сн} > 130^{\circ}\text{C}$  – зріле вугілля.

Осередки СЗ виникають з *навітряної* сторони на глибині 0,5 м.

Більш *подрібнене* вугілля має більшу площу контакту з окислювачем, тому СЗ виникає легше. *Волога* бере участь у процесах адсорбції і прискорює самонагрівання.

*Профілактика СЗ вугілля*: необхідно добитися  $q(+)\downarrow$  і  $q(-)\uparrow$ .

- 1) утрамбовка, 2) обмаслення відходами нафтопереробки для ізоляції поверхні вугільних часток; 3) на м'якому ґрунті не буде потоку повітря по дну.
- 4) Зменшення висоти насипу  $S/V\uparrow$ . 5) вентилявання.

### 3. МІКРОБІОЛОГІЧНЕ САМОЗАЙМАННЯ

До мікробіологічного СЗ схильні рослинні матеріали з підвищеною вологістю (сіно, бавовна, зерно, торф), в яких можлива життєдіяльність мікроорганізмів. Етапи самонагріву:

1. Накопичення тепла життєдіяльності мікроорганізмів;
2. За  $T\ 60-70^{\circ}\text{C}$  початок розкладання органічних сполук на ЛПР і ТВЗ.
3. Адсорбція повітря на ТВЗ з виділенням тепла;
4. За  $T\ 100-130^{\circ}\text{C}$  розклад нових сполук з утворенням ЛПР та ТВЗ; початок виділення горючих газів  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ .
5.  $W_{xp}\uparrow$ , окиснення ЛПР з виділенням та накопиченням тепла всередині купи.
6. За  $T\ 180-200^{\circ}\text{C}$  окиснення ТВЗ;
7. Утворення осередків тління.

*Класи торфу за ПНБ* :

A–безпечні, осередки самонагрівання відсутні 3-4 місяці зберігання.  $T\uparrow < 0.5\ \text{C/добу}$ ,  $T_{с.н.} > 60^{\circ}\text{C}$ .

B–середньонебезпечні, 2-3 осередки за 3-4 місяці зберігання.  $T\uparrow = 0.5-1.5\ \text{C/добу}$ .  $T_{с.н.} = 50^{\circ}\text{C}$ .

B – небезпечні, масовий розвиток осередків СЗ.  $T\uparrow = 1.5-4.5\ \text{C/добу}$ .  $T_{с.н.} < 40^{\circ}\text{C}$ .

**ЗАВДАННЯ НА САМОПІДГОТОВКУ**: 1. Вивчити літературу:

Демидов, Шандыба, Щеглов - Горение и свойства горючих материалов, с.70-82,

И.М.Абдурагимов и др. - Процессы горения, стр.58-85

Демидов, Саушев - Горение и свойства горючих веществ, стр.109-130.

2. Підготуватися до практичного заняття та ЛР.

### Р.2. Л.8. ВИМУШЕНЕ ЗАПАЛЮВАННЯ ГОРЮЧИХ СИСТЕМ.

**План лекції**: 1. Особливості процесу запалювання. 2. Стационарна теплова теорія запалювання нагрітим тілом. 3. Запалювання горючих систем електричним розрядом. 4. Запалювання фрикційними іскрами, краплями розплавленого металу.

**Ключові слова**: вимушене запалювання ВЗ, Джерела запалювання ДЗ, температура запалювання  $T_z$ , самоспалахування  $CC$ ,  $ГС$ ,  $ГР$ ,  $ОК$ ,  $ПГ$ . *ЕлР*.

#### 1. ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ЗАПАЛЮВАННЯ.

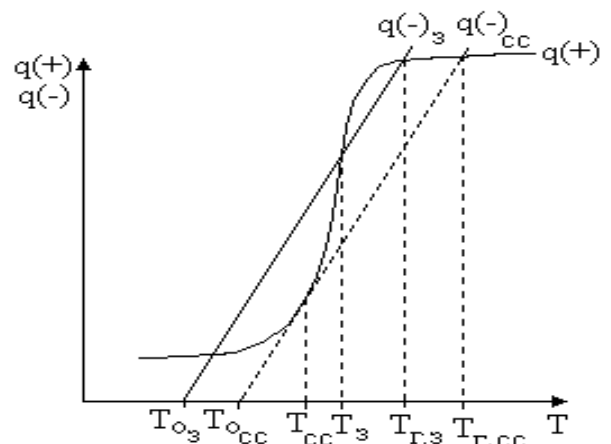
**Вимушене запалювання** це виникнення горіння внаслідок прогріву малої частки холодної ГС малим гарячим джерелом запалювання, від якого фронт полум'я поширюється на всю горючу суміш.

**Джерело запалювання** це полум'я, розжарене тіло, електричний розряд, які мають енергію і температуру, достатні для запалювання інших речовин.

**Види ДЗ**: теплові прояви хімічної, електричної, механічної енергії та фактори горіння (полум'я, розжарені ПГ, нагріте полум'ям тіло, іскри).

Критичні умови вимушеного запалювання досягаються за умови дії потужного ДЗ на ГС, якщо воно нагріте до  $T_{zap}$ , за якої  $q(+)=q(-)$ , а екзотермічна реакція різко самоприскорюється з появою горіння.

**Відмінності ВЗ від СС**:



1. СС виникає при зовнішньому нагріві і запалюванні всієї повітряної суміші водночас; ВЗ - при зовнішньому нагріві повітряної горючої системи або ТГМ малим джерелом тепла і запалюванні біля нього малої вогненної сфери.

2. При СС  $q(-)$  визначається конвекцією. При ВЗ нагрівається від ДЗ мала частка об'єму, тому є тепловідвод в холодну ГС за рахунок теплопровідності:  $q(-) = -\lambda d^2T/dx^2$ .

4.  $q(-)_{ВЗ} > q(-)_{СС}$  оскільки мале ДЗ швидше втрачає тепло.

5.  $t_{зап} \gg t_{cc}$  бо ВЗ має великий  $q(-)\uparrow$  і для виникнення горіння необхідне велике  $q(+)\uparrow$ .

6.  $\tau_{інд} СС > \tau_{інд} ВЗ$  бо ВЗ відбувається за великої  $t_{зап}$  за час, коли тепло не встигне розсіятися в холодну суміш шляхом теплопровідності.

7. Оскільки при ВЗ  $q(-)\uparrow$  початкова  $T_{гор}$  буде нижчою, ніж при СС.

8. При СС - гомогенне кінетичне горіння, при ВЗ може виникати ще й гетерогенне дифузійне (тління).

9. На практиці частіше виникає ВЗ.

## 2. СТАЦІОНАРНА ТЕПЛОВА ТЕОРІЯ ЗАПАЛЮВАННЯ НАГРІТИМ ТІЛОМ

Розглянемо розподіл температури в холодному газі з температурою  $T_0$  біля нагрітої стінки ДЗ. Якщо середовище не горюче, то  $T_{газу} \downarrow$  до  $T_0$  на відстані  $l$  від стінки. Для горючого середовища у реальних умовах при окисненні ГР біля ДЗ  $\Phi_{гр} \downarrow \Phi_{ок} \downarrow W_{xp} \downarrow q(+)\downarrow$ . Тому для виникнення горіння потрібна ще більш висока температура ДЗ.

$T_1$  - реакції окиснення майже немає.

$T_2$  - повільна реакція, тому  $q(+)< q(-)$  і на відстані  $l$  від стінки  $T \downarrow$  до  $T_0$ .

$T_3 > T_2$ ,  $q(+)\uparrow$ , здійснюється критична умова запалювання  $q(+)= q(-)$ ,  $T_3 = T_{зап}$ , тому у шарі  $\delta$  біля стінки  $T_{гс} = T_2$ ,  $(dT/dx)_{x<\delta} = 0$ . ДЗ перестає нагрівати ГС, поширення горіння залежить не від ДЗ, а від умов у ГС. При  $x > \delta$   $w_{xp} = 0 \Rightarrow q(+)= 0$ , тому при  $x = l \gg \delta$   $T \downarrow$  до  $T_0$ .

$T_4 > T_3$ , є реакція за  $x > \delta$ ,  $q(+)\uparrow$ ,  $q(+)> q(-)$ ,  $(dT/dx)_{x<\delta} > 0$ ,  $T_{гс} \uparrow$  до  $T_{гор}$ .

$T_5 > T_4$   $(dT/dx)_{x<\delta} > 0$ ,  $T_{гс} \uparrow$  до  $T_{гор}$ .

## 3. ЗАПАЛЮВАННЯ ГОРЮЧИХ СИСТЕМ ЕЛР

40 % пожеж починається за теплових проявів електричної енергії: статичні та атмосферні електричні розряди; іскри та краплі замикання; перегріті лампи накаливання, електричні дроти, контакти.

### 3.1. ТЕПЛОВА ТЕОРІЯ ЗАПАЛЮВАННЯ ЕЛР

Енергія розряду виділяється миттєво в межах нульового об'єму  $T = T_{ел р} \gg T_{гор}$ . Прогрів та запалювання ГС залежить від її хімічних і фізичних властивостей. Виникає прогрита сфера, радіус якої збільшується з часом, а температура зменшується. У не горючому середовищі через значний час на великій відстані  $T_{газу} \downarrow$  до  $T_0$ .

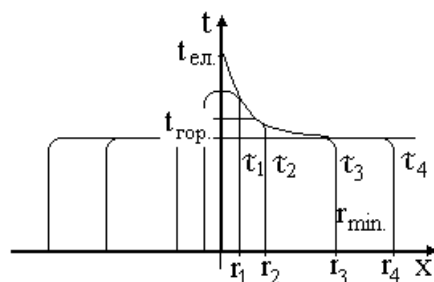
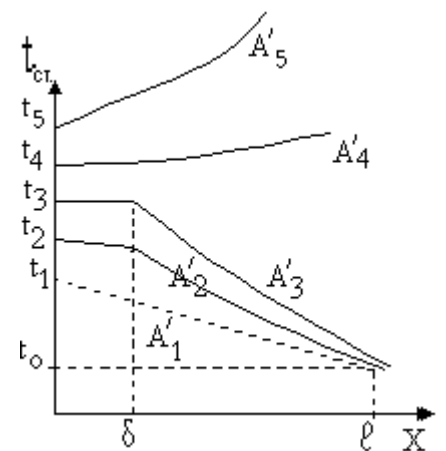
У горючому середовищі до тепла розряду додається тепло окиснення. Якщо тепло розряду і тепло окиснення прогріє об'єму газу радіусом  $r_{min}$  від  $T_0$  до  $T_{гор}$ , то виникне критичний незгасаючий сферичний елемент полум'я, здатний до поширення. Існує  $E_{min}$  -

мінімальна енергія ЕЛР, більше за яку горіння виникне,  $E_{ел р} \geq E_{min}$ .  $r_{нагр} > r_{min} = 3,7\delta_{пл}$

$E_{min}$  - це найменша енергія електричного конденсатора, при розряді якого виникає іскра, здатна запалити стехіометричну горючу повітряну суміш з імовірністю 0,01.

### 3.2. ІОННА ТЕОРІЯ ЗАПАЛЮВАННЯ ЕЛР

ЕЛР поляризує суміш з утворенням іонів, які стають активними центрами ланцюгової реакції. Горіння з'явиться



якщо швидкість розгалуження реакції більше швидкості обриву ланцюга:  $W_{\text{ланц. реакц.}} = W_o + W_{\text{розг}} - W_{\text{обр}}$

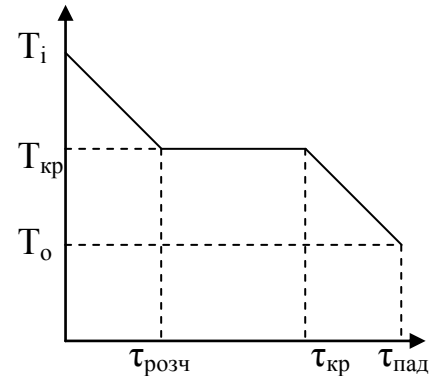
#### 4. ЗАПАЛЮВАННЯ ФРИКЦІЙНИМИ ІСКРАМИ ТА РОЗЖАРЕНИМИ КРАПЛЯМИ

**Фрикційні іскри** - шматочки металу відірвані і нагріті при механічному впливі і частково окиснені. Окиснення може підвищити  $T$  іскри ще на 500 С.

Запас енергії іскри визначають її маса, розмір, теплоємність, температура, час остигання при падінні.

$$Q = V_{\text{іск}} \rho_{\text{іск}} C_p \text{іск} (T_{\text{іск}} - T_{\text{сг гр.}})$$

Під час польоту іскра остигає і кристалізується, зменшується її температура і запас енергії. Якщо  $Q_{\text{іскри}} > E_{\text{мінГР}}$  ГС може бути запалена.



#### 5. ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ВЗ

Температура нагрітого тіла ( $T_{\text{зап}}$ ) повинна забезпечити необхідний початковий запас тепла  $E_{\text{мін}}$ .  $E_{\text{мін}}$  і  $T_{\text{зап}}$  залежать від:

$$1. \text{ Вид ГР: } - Q_{\text{н}} \uparrow \quad q(+)\uparrow \quad T_{\text{зап}} \downarrow \\ - T_{\text{сг}} \downarrow \quad T_{\text{зап}} \downarrow$$

$E_{\text{мін H}_2} = 0,017$  МДж,  $E_{\text{мін C}_2\text{H}_4} = 0,24$  МДж,  $E_{\text{мін NH}_3} = 680$  МДж. У твердих ГР  $T_{\text{зап}} \uparrow E_{\text{мін}} \uparrow \tau_{\text{інд}} \uparrow$  (до 20–25 с), оскільки необхідна додаткова енергія та час на розкладання, плавлення, випаровування ГР, сумішоутворення.

$$2. \text{ Склад ГС: } - \phi_{\text{O}_2} \text{ в повітрі} \uparrow \text{ або } \phi_{\text{нГ}} \downarrow W_{\text{хр}} \uparrow \quad q(+)\uparrow \quad T_{\text{зап}} \downarrow E_{\text{мін}} \downarrow \\ - \phi_{\text{ГР}} = \phi_{\text{сгм}} \quad T_{\text{зап}} = \text{мін}, E_{\text{ДЗ}} = \text{мін}$$

Існує насичена енергія іскри яка запалить ГС при  $\phi_{\text{н}} < \phi_{\text{факт}} < \phi_{\text{в}}$

Увага: якщо ДЗ каталізатор  $T_{\text{зап}} \uparrow$  з максимумом при  $\phi_{\text{сгм}}$ , тому що  $\phi_{\text{ГР}} \downarrow \phi_{\text{O}_2} \downarrow W_{\text{хр}} \downarrow$ , свіжа ГС не встигає прогрітись.

#### 3. УМОВИ ГС

-  $T_0 \uparrow \quad q(-)\downarrow \quad T_{\text{зап}} \downarrow E_{\text{мін}} \downarrow \tau_{\text{інд}} \downarrow$  (від 3 до 0,5 с)

-  $P \uparrow \quad W_{\text{хр}} \uparrow \quad q(+)\uparrow \quad T_{\text{зап}} \downarrow E_{\text{мін}} \downarrow$

- швидкість газу:  $v_{\text{руху}} \uparrow \alpha \uparrow q(-)\uparrow T_{\text{зап}} \uparrow E_{\text{мін}} \downarrow$

#### 4. Властивості та час впливу ДЗ

-  $c_p \downarrow \quad T_{\text{зап}} \uparrow$

-  $d_{\text{ДЗ}} \text{ або } S_{\text{ДЗ}} \uparrow \quad T_{\text{зап}} \downarrow \downarrow \text{ до } T_{\text{сг}}$

$\tau_{\text{впливу}} \uparrow \quad T_{\text{зап}} \downarrow E_{\text{мін}} \downarrow$

#### 5. ВИЗНАЧЕННЯ ПНБ ПРИ ДІЇ ДЗ.

Безумовні ДЗ: удари блискавок, потужні електричні розряди, полум'я газових пальників, сірника.

Визначення  $E_{\text{мін}}$  за порівнянням з відомою

ГР і нормальною швидкістю поширення горіння  $u_{\text{н}}$ , наприклад за н-бутаном,  $E_{\text{мін}} = 0,25$  МДж,  $u_{\text{н}} = 0,379$  м/с:  $E_{\text{мін 1}} / E_{\text{мін 2}} = u_{\text{н 2}}^2 / u_{\text{н 1}}^2$

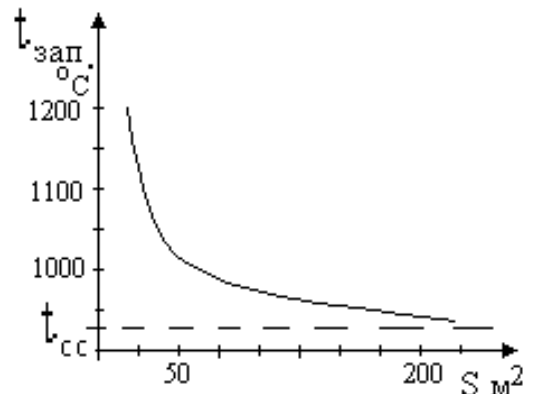
$$E_{\text{мін}} = 0,036 / u_{\text{н}}^2$$

Запалювання газу розжареною сферою радіусом  $r$  можливе якщо:  $r \geq \sqrt{\frac{E_{\text{акт}} \lambda (T_s - T_0)^2}{2Q_{\text{н}} w_{\text{хр}} R T_s^2}}$  ;

$$\text{при цьому досягається запас енергії } E_{\text{мін}} = \frac{\lambda^3 T_0^2 (T_{\text{Г}} - T_0)}{U_{\text{н}}^3 P_0^2 c_p^2},$$

умова безпеки виконується якщо:  $E_{\text{без}} = 0,4E_{\text{мін}}$ .

При тривалому контакті ДЗ з ГС  $T_{\text{зап}} = T_{\text{сг}}$ . Тоді  $T_{\text{без}} = 0,8T_{\text{сг}}$ .



Відкрите полум'я випромінює тепло, яке може нагріти ГС до  $T_{cc}$ :  $q_{кр} = \varepsilon \sigma (T_{гор}^4 - T_{cc}^4) \Psi_{1-2}$

речовина	Час до запалювання при $q_{кр}$	
	$\tau_{инд} = 3$ хв	$\tau_{инд} = 5$ хв
деревина	18,8	16,9
бавовна	11,0	9,7
гума	22,6	19,2
пластик	19,4	18,6

Сірник, що горить  $T \approx 650^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{инд} \approx 20$  с, тліюча цигарка -  $T \approx 320-410^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{инд} \approx 2-2.5$  хвилини, тліюча сигарета -  $T \approx 420-460^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{инд} \approx 25$  хвилин.

ЗАВДАННЯ НА САМОПІДГОТОВКУ:

1. П.Г.Демідов, Шандиба, Щеглов. - Горіння і властивості горючих металів. С. 65-67.

І.М.Абдурагимов і інш. - Процеси горіння, стор. 58-85

А.І.Розловський "Основи взривобезопасности при работе с ГГ и парами", с. 129-153.

### РОЗДІЛ 3. ЛЕКЦІЯ 9. ГОРІННЯ РЕЧОВИН ТА МАТЕРІАЛІВ ЗАГАЛЬНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ГОРІННЯ ГАЗОПОВІТРЯНИХ СИСТЕМ

План лекції: 1. Загальні закономірності горіння газових сумішей. 2. Структура фронту полум'я. 3. Перехід дефлаграційного горіння в детонаційне

Ключові слова: ФП, ГС,  $P_{виб}$ ,  $U_n$ , ПНБ, АЦП

#### 1. ЗАГАЛЬНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ГОРІННЯ ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ

Горіння газів, пари рідин, летючих продуктів розкладання твердих речовин є гомогенним і може бути кінетичним або дифузійним. До газів відносять речовини, які за  $T = 50$  С мають тиск пари більше за 300 кПа.

На пожежі частіше окисник і горючий газ спочатку не змішані. Процес сумішеутворення (дифузія) відбувається повільно під час горіння, тому і визначає швидкість процесу горіння,  $\omega_{х,р} \gg \omega_d$ ,  $\omega_{гор} \approx \omega_d$  і мало залежить від температури. Таке горіння дифузійне. Горіння почнеться коли при сумішеутворенні  $\phi_{гр} \downarrow$  до  $\phi_v$ .

Горіння готової ГС є кінетичним, тобто швидкість процесу горіння залежить від кінетики реакції горіння.  $\omega_d \approx 0$ ,  $\omega_{гор} \approx \omega_{х,р}$ , тому швидкість кінетичного горіння сильно залежить від температури. На пожежах відбувається при виникненні і поширенні горіння.

За силою тиску при кінетичному горінні розрізняють: 1."спалах" - збільшення тиску ПГ не відбувається. 2. "хлопок" - незначне підвищення тиску зі звуковим ефектом без руйнувань. 3. "вибух" - швидке згорання з різким виділенням енергії і стислих газів, має велику швидкість поширення фронту полум'я і різку зміну тиску, що спричиняє руйнування обладнання і будівель. Тиск утворюється, коли гарячі ПГ намагаються розширитися.

Стан ідеального газу для ГС і для ПГ:  $P_o V_o = n_{поч} R T_o$        $P_{виб} V_{виб} = n_{пг} R T_{виб}$

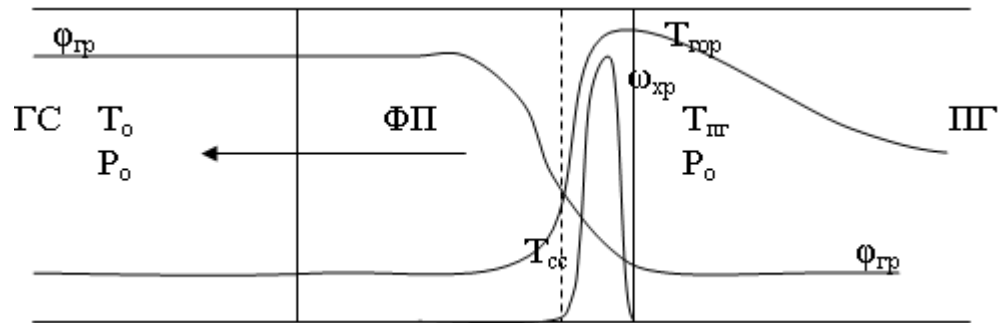
У перший момент після вибуху  $V_o = V_{виб}$ :  $P_{виб} = P_o T_{виб} n_{пг} / T_o n_{поч}$

$P_{виб} = \max$  при  $\phi_{стм}$ , коли  $T_{гор} = \max$ . Якщо  $\phi_{гр} \downarrow$  буде надлишок ОК, якщо  $\phi_{гр} \uparrow$  буде надлишок ГР, які не беруть участі в хімічній реакції,  $q(+)\downarrow$   $q(-)\uparrow$   $T_{гор} \downarrow$  і  $P_{виб} \downarrow$ . При горінні у чистому кисні  $q(+)\uparrow$   $q(-)\downarrow$   $T_{гор} \uparrow$   $P_{виб} \uparrow$ .  $P_{виб}$  – показник ПНБ речовин і матеріалів.

#### 2. ПОШИРЕННЯ ДЕФЛАГРАЦІЙНОГО ГОРІННЯ.

**Фронт полум'я** - об'єм системи, в якому реагують ГР+ОК. У цій зоні утворюються ПГ та теплота згоряння,  $T \uparrow$  до  $T_{гор}$ .

**Стационарне полум'я:** швидкості витікання свіжої ГС і переміщення ФП назустріч рівні, тому полум'я нерухоме; кількість газу, що згоряє, компенсується кількістю газу, що



поступає.  $U_{фп} = U_{гс}$

**Нестационарне полум'я:** швидкості руху ГС і поширення горіння не рівні.

$U_{фп} < U_{гс}$  - зрив полум'я.  $U_{фп} > U_{гс}$  - проскок полум'я - поширення горіння в напрямку, протилежному руху суміші, може призвести до вибуху технологічного обладнання.

**Нормальна швидкість поширення горіння  $U_n$**  - швидкість, з якою рухається ФП відносно нерухомого горючого газового середовища.  $U_n = dx/d\tau$ , ( тобто відстань  $x$ , яка пройдена ФП по нормалі до поверхні ФП за час  $\tau$ .) За рахунок розширення гарячих ПГ  $U_{фп} > U_n$  в  $\epsilon$  раз:  $U_{фп} = U_n \epsilon$ , де  $\epsilon$  - коефіцієнт розширення,  $\epsilon = T_{пг}/T_0$ .

Механізм поширення кінетичного дефлаграційного полум'я пояснюють дифузійна і теплова теорії. **Дифузійна ланцюгова теорія:** фронт полум'я рухається за рахунок дифузії АЦП із зони хімічної реакції (ФП) у холодну суміш ініціює реакцію горіння. Розгалуження ланцюгових реакцій, компенсує загибель АЦП.

**Теплова теорія:** фронт полум'я рухається за рахунок передачі потоку тепла із зони горіння теплопровідністю в свіжу горючу суміш. При  $T_{кр} \omega_{х,р} \uparrow$ , виникає полум'яне горіння.

Розглянемо процеси при поширенні **дефлаграційного ламінарного фронту полум'я:**

1. **Початкова суміш** реакцій немає.  $T_{гс} = T_0$ .

2. **Підготовча зона** прогрівається теплопровідністю від ФП,  $T \uparrow$  від  $T_0$  до  $T_{сн}$ , при якій починають протікати хімічні реакції, ПГ децю розбавлюють ГС  $\phi_{гр} \downarrow \phi_{ок} \downarrow$ .

У **ФП** протікає хімічна реакція, тому  $\phi_{гр} \downarrow \phi_{ок} \downarrow$  до нуля, а  $T \uparrow$  до  $T_{гор}$ .

3. ФП складається із зони підігріву ( $T \uparrow$  до  $T_{сн}$ , повільна реакція)  $\delta_{п}$  і зони хімічної реакції  $\delta_{р}$  (швидка реакція,  $\phi_{гр} \downarrow \phi_{ок} \downarrow$  до нуля, а  $T \uparrow$  до  $T_{гор}$ ).  $\delta_{ф.п} = \delta_{п} + \delta_{р}$ .  $\delta_{ф.п} \sim a_t / U_n$ .  $\delta_{р} = 10^{-4} - 10^{-3}$  см;  $\delta_{п} = 10^{-3} - 10^{-2}$  см;  $T_{фп\ max} = 1700 - 3000$  К

Час перебування молекул в зоні реакції  $10^{-7} - 10^{-5}$  с.

$$\text{З рівняння теплового балансу: } U_n = \frac{\sqrt{2Q_n w_{хр} \lambda R T_{г}^2 / E_{акт}}}{c_p \rho (T_{г} - T_0)}$$

$U_n$  залежить від виду ГР ( $Q_n$ ,  $E_{акт}$ ), складу ГС ( $\phi_{гр}$ ,  $\phi_{ок}$ ,  $\phi_{нг}$ ,  $\phi_{інг}$ ,  $\phi_{кат}$ ), теплофізичних параметрів ГС ( $C_p$ ,  $\rho$ ,  $T_0$ ,  $P$ .) При  $\phi_n$  та  $\phi_v$   $U_n = \min$ .

### 3. ПЕРЕХІД ДЕФЛАГРАЦІЇ В ДЕТОНАЦІЮ.

**Детонація** це механізм запалювання ГС при її швидкому адіабатичному стисненні фронтом полум'я ( $U_{фп} > 500$  м/с). Тиск та температура в газі не встигає вирівнятися,  $T \uparrow$  до 1500-1700К і відбувається самоспалахування за  $\tau_{інд} = 10^{-5} - 10^{-7}$  с.



1. Плоский ламінарний дефлаграційний. ФП. Гарячі ПГ розширюються та штовхають і прискорюють ФП.  $U_{фп} \uparrow$

2. Вигнутий дефлаграційний ФП. При треті об стінки ФП по краях гальмується і тому витягується, збільшується його реакційна поверхня  $F$ , інтенсивність горіння, тому  $U_{\text{фп}} \uparrow$

$U_{\text{фп}} = U_n F/S$ ;  $S$  – площа поперечного перетину потоку.

3. Турбулізований дефлаграційний ФП. Прискорення полум'я викликає його турбулізацію, прискорення згорання, тому  $U_{\text{фп}} \uparrow$ .  $U_{\text{фп}} = U_n * F_T / F_L$ .

$F_T$  - сумарна поверхня горіння при турбулізації;  $F_L$  - зовнішня поверхня ФП.

4. Детонаційний ФП. При пересуванні ФП перед ним утворюється хвиля стиснення. По мірі прискорення ФП тиску в ударній хвилі зростає. Виникає нова більш швидка ударна хвиля, коли вона наздожене першу, їх амплітуди складуться (резонанс). При накладенні послідовних хвиль виникає потужна детонаційна хвиля.

Чим більше початковий тиск, нормальна швидкість горіння,  $Q_n$ , відношення  $C_p/C_v$ , тим відстань переддетонаційного розгону від точки запалювання коротша. Поверхлі стінки труби прискорюють турбулізацію і детонацію.

Особливості детонаційного горіння:

- ГС запалюється за рахунок стиснення, а не теплопровідністю;
- детонаційна хвиля складається з зони стиснення і зони реакції;
- ПГ рухаються в одному напрямі із ЗР (при дефлаграції - в різні);
- швидкість детонації залежить тільки від термодинамічних характеристик речовини;
- тиск в детонаційній хвилі в декілька разів перевищує тиск адиабатичного згорання в замкненій посудині, що зумовлює її велику руйнівну силу; - механічна дія детонації не залежить від того, чи виникає вона у відкритому або закритому просторі.

Завдання на самопідготовку: 1. Вивчити літературу:

1. Демидов, Шандыба, Щеглов. - Горіння і властивості горючих матеріалів. СТОР. 85-104.

2. Демидов, Саушев. - Горіння і властивості горючих матеріалів. С. 152-181.

2. Підготуватися до практичного заняття.

### **Р.3. Л.10. Горіння рідин.**

**Повідомлення теми лекції:** На багатьох підприємствах зберігають, споживають і виробляють горючі рідини - на хімічних, коксохімічних, нафтопереробних заводах, резервуарних парках з нафтопродуктами і скрапленими газами. Кожна шоста аварія на промислових підприємствах пов'язана з вибухами і пожежами горючих рідин. Сьогодні ми з вами дізнаємось за яких умов при випаровуванні рідин може виникнути горіння та вибух і яке значення в цьому процесі мають тиск насиченої пари і температура рідини.

**ПРИКЛАД 1.** На хімічному підприємстві стався вибух, відірвало трубопровід. Почав витікати і випаровуватись циклогексан. Утворилася хмара з вибухонебезпечною концентрацією діаметром 200 м. Її вибух був еквівалентним 45 тонам тринітротолуолу і зруйнував будівлі та резервуари. Полум'я охопило 45 000 м<sup>2</sup>, висота його досягла 100 м. Цегла плавилася, сталеві конструкції горіли. Вибухом вбито 29 осіб, поранено – 39.

*Через три доби від впливу високих температур зруйнувалась ємність з рідким аміаком, що погіршило умови гасіння. Гасили цю пожежу 250 пожежних, 23 з них було поранено.*

**ПРИКЛАД 1.** В 1989 році біля Алма-Ати тепловоз зіткнувся з цистерною, в якій був рідкий пропан, який почав витікати з ємності і випаровуватися. Від іскри тепловозу пара запаллилася. Поруч була непошкоджена цистерна, через 15 хвилин вона вибухнула, утворилася вогненна куля діаметром 150 метрів. В гасінні прийняло участь більш 200 робітників пожежної охорони, 9 з них загинуло під час проведення бойових дій, ще 20 осіб загинуло від опіків.

*В Харкові при подібній аварії лейтенант Новохатський (випускник нашого університету) організував охолодження палаючих цистерн і вивів із зони впливу теплового випромінювання потяг з іншими цистернами. Через 2,5 години пожежу було ліквідовано без людських втрат. Лейтенант Новохатський нагороджений хрестом "За мужність".*

**План лекції:** 1. Закономірності горіння рідин. 2. Температурні межі поширення полум'я. 3. Займання рідин. 4. Поширення горіння. 5. Вигорання.



**Ключові слова:** теплота  $\Delta H_{\text{вип}}$ , швидкість  $W_{\text{вип}}$  та інтенсивність випаровування  $I_{\text{вип}}$ , тиск  $P_{\text{нп}}$  та концентрація насиченої пари  $\phi_{\text{нп}}$ , температурні межі поширення полум'я (ТМПП), температура спалаху ТСП, ПНБ.

## 1. ЗАГАЛЬНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ГОРІННЯ РІДИН

### 1.1. Випаровування рідин. Тиск насиченої пари

До рідин відносять речовини з температурою плавлення (краплепадіння)  $< 50$  С. Горіння рідин можливе тільки у вигляді пари, бо їх  $T_{\text{кип}} < T_{\text{сс}}$ . Горіння рідин починається як гомогенне кінетичне у вигляді вибуху, якщо при випаровуванні утвориться горюча суміш з повітрям  $\phi_{\text{н}} < \phi_{\text{пари}} < \phi_{\text{в}}$ .

**Випаровування** це перехід речовини з рідкого стану в газоподібний з вільної поверхні за  $T < T_{\text{кип}}$ . Молекули рідини відриваються з поверхні, якщо мають кінетичну енергію більшу енергії міжмолекулярної взаємодії. На це витрачається теплота випаровування  $\Delta H_{\text{вип}}$ .

Кількість рідини, що випаровує в одиницю часу з усієї поверхні це **швидкість випаровування**  $W_{\text{вип}}$ , а з одиниці поверхні це **інтенсивність випаровування**  $I_{\text{вип}}$ , вони залежать від виду та температури рідини, атмосферних умов.

При випаровуванні у закритий простір утворюється **насичена пара**, коли рідка і газоподібна фази існують водночас у **динамічній** рівновазі, тобто кількість рідини що випаровується дорівнює кількості пари, що конденсується (газова фаза а вже насичена парую). Небезпека насиченої пари визначається температурними межами поширення полум'я  $T_1$  та  $T_2$ . В діапазоні між цими температурами концентрація пари є вибухонебезпечною.

Пара буде **ненасиченою**, якщо втрачається у відкритий простір. При цьому випаровування перевищує конденсацію, динамічна рівновага не встановлюється, тиск цієї пари менший за тиск насиченої пари. Небезпеку ненасиченої пари визначають за температурою спалаху  $T_{\text{сп}}$ , більше за яку над по верхньою рідини виникає парогазова хмара, де є область вибухонебезпечних концентрацій.

Тиск пари визначається тепловим рухом молекул, чим більше молекул випаровується, тим більший тиск вони створюють. Тиск пари залежить від інтенсивності випаровування і температури, і не залежить від кількості рідини і площі випаровування. (за  $T_{\text{кип}}$ )  $\phi_{\text{нп}} = 100\% — P_{\text{заг}}$ .

$$\text{(за } T_{\text{факт}}) \phi_{\text{нп}} — P_{\text{нп}}$$

$$\phi_{\text{нп}} = 100P_{\text{нп}}/P_{\text{заг}} \%, \text{ або } P_{\text{нп}} = \phi_{\text{нп}} P_{\text{заг}}/100$$

Для сумішей взаємонерозчинних рідин  $P_{\text{нп, сум}} = \sum P_{\text{нп, i}} r_i$ , тому температура початку утворення вибухонебезпечної пари значно меншає. Для сумішей взаєморозчинних рідин  $P_{\text{нп сум}} = \sum r_i P_{\text{нп}}$ , тому температура початку утворення вибухонебезпечної пари є середньою відносно відповідних температур компонентів сумішей.

## 2. ТЕМПЕРАТУРНІ МЕЖІ ПОШИРЕННЯ ПОЛУМ'Я

При збільшенні температури  $I_{\text{вип}} \uparrow$ ,  $P_{\text{нп}} \uparrow$  і  $\phi_{\text{нп}} \uparrow$ . Цей взаємозв'язок визначається рівнянням

$$\text{Антуана: } \lg P_{\text{нп}} = A - \frac{B}{t + C_a}, \text{ звідки } t_{\text{н(в)}} = \frac{B}{A - \lg(0,01P_{\text{заг}} \phi_{\text{нп}})} - C_a.$$

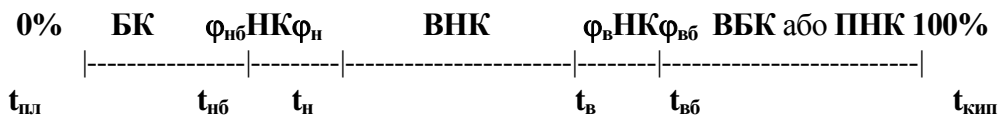
$$\text{або за рівнянням Клапейрона-Клаузіуса, } \ln \frac{P_2}{P_1} = \frac{\Delta H_{\text{вип}}}{R} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right).$$

Існують температури рідини  $t_1$  і  $t_2$ , коли над її поверхнею утвориться насичена пара з концентрацією відповідно  $\phi_{\text{н}}$  і  $\phi_{\text{в}}$ . Такі температури називають температурними межами поширення полум'я. Тобто  $t_1 = t_{\text{н}}$ ,  $t_2 = t_{\text{в}}$ . ПНБ горючих рідин зручніше оцінювати не за концентрацією її пари, а за температурою самої рідини.

На ТМПП впливають фактори: 1. Едз  $\uparrow t_{\text{н}} \downarrow, t_{\text{в}} \uparrow$ ; 2.  $\phi_{\text{ок}} \uparrow$  в повітрі;  $t_{\text{н}} \downarrow, t_{\text{в}} \uparrow$ ;

3.  $P_{\text{заг}} \uparrow$ ;  $I_{\text{вип}} \downarrow$ ,  $\phi_{\text{нп}} \downarrow t_{\text{н}} \uparrow, t_{\text{в}} \uparrow$ ; 4.  $\phi_{\text{нг}} \uparrow$ ,  $t_{\text{н}} \uparrow, t_{\text{в}} \downarrow$ ; 5. домішки негорючих рідин.

Оскільки ТМПП можуть змінюватися, визначають безпечні температурні межі експлуатації рідин. Відповідно КМПП можна виділити діапазони температур коли створюються пара з безпечною, небезпечною, вибухонебезпечною, пожежонебезпечною концентрацією.

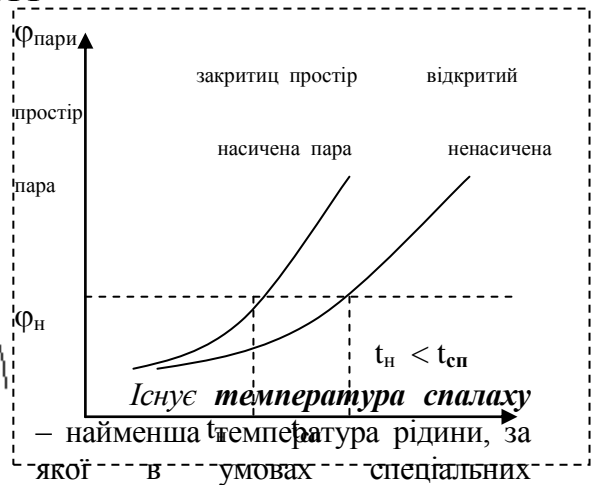
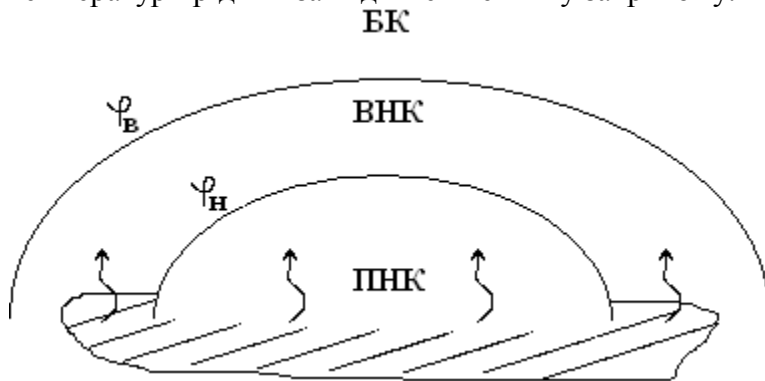


**Практичне використання ТМПП**

- 1) порівняння ПНБ декількох рідин. Найбільш безпечним є гексанол. Якщо  $t_n - t_v$ : гексанол (57 – 92°C), метанол (5 – 39°C), ацетон (-20 – 6°C).
  - 2) Визначення найбільш небезпечної пори року для використання рідини.  
Гексанол – літо, метанол – осінь, весна, літо; ацетон – зима.
  - 3) визначення вибухобезпечних температур для технологічного обладнання.  $t_{вб} < t_{роб} < t_{нб}$
  - 4) визначення ПНБ пари в закритих апаратах.
- Так, при  $t = 20^\circ\text{C}$  гексанол утворює БК, метанол – ВНК, а ацетон – ПНК.

**3. ЗАЙМАННЯ, ПОШИРЕННЯ ГОРІННЯ ТА ВИГОРЯННЯ РІДИН НА ВІДКРИТОМУ ПРОСТОРИ**

Концентрація пари у відкритому просторі за даної температури рідини завжди менше ніж у закритому.



випробувань над її поверхнею утвориться пара, здатна спалахувати в повітрі від ДЗ, без стійкого горіння. За цієї температури  $I_{вип} < I_{виг}$  і після запалювання виникне лише **спалах** – швидке гомогенне кінетичне згоряння пари без подальшого горіння. По ступеню ПНБ рідини класифікують: Горючі рідини (ГР) -  $t_{сп} > 61^\circ\text{C}$ . Легкозаймисті рідини (ЛЗР)  $t_{сп} < 61^\circ\text{C}$ .

**Температура займання** – це найменша температуру рідини, за якої після запалювання пари від ДЗ встановлюється стійке горіння. ( $I_{вип} = I_{виг}$ )

При додаванні негорючих рідин у горючі підвищується їх  $t_{сп}$  аж до негорючого стану.

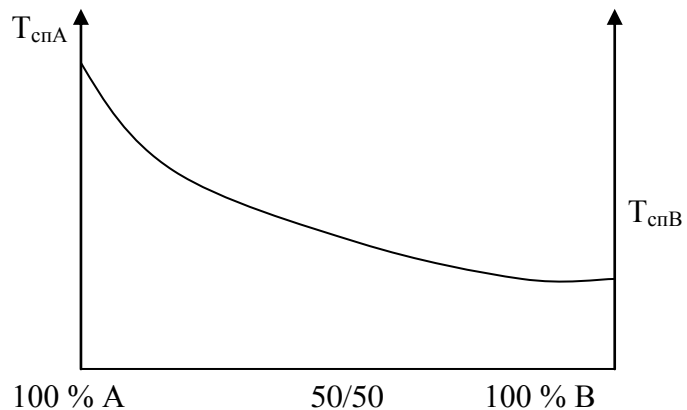
$T_{сп}$  суміші горючих нерозчинних рідин зменшується.

$T_{сп}$  двох горючих взаєморозчинних рідин (А+В) залежить від типу суміші:

1. Азеотропні суміші. Якщо  $t_{кипВ} < t_{кип(А+В)} > t_{кипА}$ , то  $t_{спВ} < t_{сп(А+В)} > t_{спА}$ , і навпаки.
2. Не азеотропні суміші: малі добавки ЛЗР до горючих рідин сильно змінюють їх ПНБ.

Запалювання і поширення полум'я по поверхні рідини з  $t_{рід} < t_{сп}$  відбувається по стадіях:

1. Дія ДЗ, випаровування, спалах в момент досягнення  $\phi_n$ , займання за  $t_{рід} = t_{займ}$ .
2. Випромінювання полум'я нагріває смугу шириною до 300 мм, глибиною до 5 мм. Конвекційні потоки за відсутності вітру підіймаються вгору і не прогривають рідину. Теплопровідність прогриває шар від прогрітої поверхні на 1 мм.
3. За  $t_{рід} = t_{сп}$   $\phi_{пари} = \phi_n$  і пароповітряна суміш над прогрітою смугою запалиться від полум'я спалахами, за  $t_{рід} = t_{займ}$  виникає стійке горіння.



4. При  $t_{\text{рід}} > t_{\text{займ}}$  полум'я почне прогрівати до  $t_{\text{сп}}$  наступну зону. Полум'я поширюється з **лінійною швидкістю  $v_l$** .

Після займання усієї поверхні рідини, починається її вигоряння у гомогенному дифузійному режимі.  $T_{\text{пов}} \uparrow$  до  $T_{\text{кип}}$  і утворюється прогрітий поверхневий шар. На випаровування йде 2 % енергії випромінювання факелу.  $I_{\text{виг}} \approx I_{\text{вип}}$ .

При вигорянні суміші з водою: 1. Якщо  $T_{\text{кип}} \text{ рідини} < T_{\text{кип}} \text{ води}$  збільшується вміст води у рідині і горіння припиняється. 2.  $T_{\text{кип}} \text{ рідини} > T_{\text{кип}} \text{ води}$  - вміст води у рідині меншає, суміш вигоряє повністю.

**Лінійна швидкість вигоряння  $V_h$**  - висота шара рідини, що вигоряє в одиницю часу.

**Масова швидкість вигоряння  $V_m$**  - кількість рідини, що вигоряє з одиниці площі поверхні в одиницю часу, залежить від:

При вигорянні поверхневий шар рідини прогріт до  $T_{\text{кип}}$ .

**Легкокиплячі** рідини ( $T_{\text{кип}} < 100 \text{ C}$ ) мають низьку  $\Delta H_{\text{вип}}$  и  $C_p$ .  $W_{\text{виг}} = W_{\text{прогр}}$ . Прогрів вглиб незначний. Це розподіл температур першого роду.

**Висококиплячі** рідини ( $T_{\text{кип}} > 100 \text{ C}$ ) мають високі  $H_{\text{вип}}$ ,  $C_p$ ,  $T_{\text{кип}}$ , в'язкість,  $W_{\text{виг}} < W_{\text{прогр}}$ . При горінні така рідина прогріватися вглиб, утворюються верхній прогрітий гомотермічний шар з  $T \approx T_{\text{кип}}$  і нижній холодний шар. Це розподіл температури другого роду. За наявності вологи можливі викид і скипання.

**Скипання (спінювання)** - перехід у пару дрібних краплин води, що містяться у нафті, збільшення об'єму рідини, яка може перелитися через борт резервуару, що розповсюджує горіння.

**Викид** – перетворення на пару відстояної під нафтою води ( $T_{\text{нафти}} \approx 300^\circ\text{C}$ ), ця пара вибухоподібно викидає нафту, що горить. Це відбудеться, коли тиск пари перегрітої води стане більшим тиску шару нафти. (1л води дає 1700 л пари)

**Завдання на самопідготовку:**

1. Демидов, Шандиба, Щеглов - горение и свойства горючих веществ - стр. 85-104, 119-128
2. В.Т.Монахов. - методи дослідження пожежної небезпеки речовин. С. 214-217; 89-105.
3. підготуватися до практичного заняття і лабораторної роботи.

### **Р.3. Л.11. ГОРІННЯ ТВЕРДИХ ГОРЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ.**

**План лекції:** Класифікація, займання та вигоряння ТГМ. Механізм поширення горіння та вигоряння ТГМ. Горіння різних ТГМ.

Зв'язок лекції:

Ключові слова: тверді горючі матеріали ТГМ, летючі продукти розкладання ЛПР, твердий вуглецевий залишок ТВЗ, ПНБ, ДЗ.

#### **1. КЛАСИФІКАЦІЯ ТГМ**

Твердими називаються матеріали, температура плавлення або розкладання яких перевищує  $50^\circ\text{C}$  та ті, що не мають температуру плавлення (деревина, тканини).

1. За хімічним складом ТГМ поділяють на органічні та неорганічні:

Органічні ТГМ поділяють на: 1. Вуглеводні, які містять однорідні полімери, 2. Целюлозовмістні ТГМ, які є сумішшю природних полімерів, 3. Елементоорганічні, які містять сірку, фосфор, кремній, галоїди і метали.

2. За поведінкою при нагріві розрізняють.

*Безгазові* ТГМ при горінні не переходять у газову фазу, горять гетерогенно.

*ТГМ, що газифікуються* при нагріві випаровують, сублімують або розкладаються, переходять у газову фазу, горять гомогенно.

Якщо ТГМ при нагріві спочатку плавиться, а потім газифікується, – це ТГМ першого роду. ТГМ-1 горять як рідини – гомогенно, при горінні розтікаються.

Якщо ТГМ відразу переходить у газову фазу шляхом сублімації або розкладання молекул – це ТГМ другого роду. ЛПР горять в гомогенно, ТВЗ - гетерогенно.

#### **2. ГОРІННЯ ТГМ**

**Займання ТГМ** відбувається при контакті з ДЗ по стадіях:

1. Нагрів поверхні, сушка.
2. Зміни фізичної і хімічної структури.

3. Утворення горючої пароповітряної суміші з  $\Phi_{\text{ЛПР}} > \Phi_n$ .
4. Нагрів суміші до температури запалювання  $T_{\text{зап}}$ .
5. Займання і гомогенне горіння суміші.

**Час займання** – це час від початку дії ДЗ на ТГМ до появи горіння, за який відбувається нагрів, плавлення або розкладання, випаровування, нагрів до температури запалювання:

$$\text{Для ТГМ 1: } q_{\text{ДЗ}} = v_m [c_p^{\text{ТВ}} (T_{\text{пл}} - T_0) + H_{\text{пл}} + c_p^{\text{рід}} (T_{\text{кип, (розкл.)}} - T_{\text{пл}}) + H_{\text{вип(розкл)}} + c_p^{\text{газ}} (T_{\text{зап}} - T_{\text{кип, (розкл.)}})], \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2};$$

де  $c_p^{\text{ТВ}}, c_p^{\text{рід}}, c_p^{\text{газ}}$  – теплоємність ТГМ, його розплаву і ЛПР,  $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ;

$H_{\text{пл}}, H_{\text{вип}}, H_{\text{розкл}}$  – теплоти плавлення, випаровування і розкладання,  $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ .

**Поширення горіння по поверхні ТГМ** відбувається з **лінійною швидкістю  $V_l$**  за рахунок передачі тепла від полум'я до сусідніх ділянок матеріалу конвекцією, теплопровідністю, випромінюванням.  $V_l$  залежить від виду ТГМ і умов горіння:

1. вид ТГМ (швидкість прогріву, розкладання)  $\mu \uparrow V_l \downarrow$ ;
2. вологість ТГМ  $W \uparrow H_{\text{прогр}} \uparrow V_l \downarrow$ ;
3. орієнтація зразка в просторі  $\alpha \rightarrow 90$  (вертикально)  $V_l \uparrow$ ; (збільшується частка випромінювання і конвекційний прогрів ТГМ гарячими ПГ).
4. вітер; а) в напрямку руху полум'я  $V_l \uparrow$ . б) проти руху полум'я – слабкий вітер додає повітря,  $V_l \uparrow$ , сильний вітер ( $> 4 \text{ м/с}$ ) охолоджує ТГМ,  $V_l \downarrow$ .
5. То ТГМ;
6. Розміри та форма зразка. Існує **термічна товщина** зразка  $h_{\text{терм}}$  - прогрітий шар ТГМ на момент поширення горіння на цю ділянку. Якщо фізична товщина  $h_{\text{фіз.}} > h_{\text{терм.}}$ , то зразок називається **термічно товстим** (не встигає прогріватись), при  $h_{\text{фіз.}} \uparrow V_l = \text{const}$ , якщо  $h_{\text{фіз.}} < h_{\text{терм.}}$  - **термічно тонким** (встигає прогріватись), при  $h_{\text{фіз.}} \uparrow V_l \downarrow$ .

**Вигорання ТГМ** відбувається у дифузійному режимі. **Лінійна масова швидкість вигорання  $V_h$**  та **масова швидкість вигорання  $V_m$**  пов'язані зі швидкістю розкладання матеріалу під впливом теплового потоку.

**ТГМ 1** – прогривається і газифікується у вузькому поверхневому шарі без утворення ТВЗ, вигоряє з постійною швидкістю, це розподіл температур 1-го роду, який не змінюється з часом.

**ТГМ 2 при вигоранні** утворює на поверхні ТВЗ з однаковою температурою усього шару, це розподіл температур 2-го роду, який змінюється з часом. Шар ТВЗ при досягненні товщини 15-20 мм гальмує прогрів ТГМ вглиб та утворення ЛПР і полум'яне горіння припиняється. Тому на пожежі товсті дерев'яні балки довше зберігають несучу спроможність, ніж металеві.

### 3. ГОРІННЯ ЦВМ

ЦВМ це рослинні матеріали - деревина, бавовна, злаки та ін. Складаються з природних полімерів (целюлоза до 50 %, геміцелюлоза до 25%, лігнін до 25%), вологи до 7%, містять елементи С- 40 – 50 %, Н - 5-6 %, О 39 – 47 %, мікроелементи до 5 %, азот до 1,5 %. Найменш термостійка - геміцелюлоза, найбільш - лігнін. Пори у деревині до 75% її об'єму.

Целюлоза - це полісахарид з формулою  $(C_6H_{10}O_5)_m$  та  $\mu > 1500 \text{ 000 г/моль}$ .

Всі ЦВМ це ТГМ-2, отже при нагріві розкладаються на ЛПР і ТВЗ. Доля ТВЗ при спаленні бавовни - 5%, деревини - 15-25%, віскозного волокна - 40%.

Фази горіння деревини:

**I. Гомогенне (полум'яне) горіння ЛПР:**

1. До  $130^\circ\text{C}$  – сушка.
2.  $150-200^\circ\text{C}$  - піроліз з виділенням негорючих ЛПР ( $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$ ).
3.  $t = 250-450^\circ\text{C}$  - піроліз з виділенням горючих ЛПР ( $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$  і т.п.).

Полум'яне дифузійне горіння виникне за умов  $\Phi_{\text{гор ЛПР}} = \Phi_n$  та дії ДЗ.

4.  $>300^\circ\text{C}$  накопичується шар ТВЗ - вугілля подібне до графіту. ЛПР, що горять, заважають підведенню кисню до ТВЗ і ТВЗ ще не горить.

5.  $t = 500-600^{\circ}\text{C}$ , шар ТВЗ захищає деревину від термічного впливу полум'я і заважає виходу ЛПР з глибини. При  $\phi_{\text{ЛПР}} < \phi_{\text{н}}$  полум'яне горіння зникає.

#### II. Гетерогенне горіння ТВЗ, перевуглення.

До ТВЗ з  $t = 600^{\circ}\text{C}$  доходить повітря починається окислення, вигорання та заглиблення шару ТВЗ - перевуглення зі швидкістю до  $0,2 \text{ мм}\cdot\text{хв}^{-1}$ .  $t \uparrow$  до  $750-850^{\circ}\text{C}$ . Вітер прискорює гетерогенне горіння. Кисень реагує в порах ТВЗ з утворенням  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  та виділенням тепла. Продукти горіння у товщі гарячого ТВЗ реагують з утворенням  $\text{CO}$  та поглинанням тепла. ЛПР ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) над поверхнею ТВЗ догоряють у гомогенному режимі (блакитне полум'я).

### 4. ТЛІННЯ

Тління це безполум'яне горіння волокнистих і пористих матеріалів, які при нагріві утворюють ТВЗ. Матеріали, що плавляться і утворюють мало ТВЗ до тління не здатні. ЛПР при тлінні не горять, оскільки не вистачає кисню, ЛПР або ДЗ. Горіння ТВЗ поширюється шляхом прогріву холодного матеріалу перед зоною тління теплопровідністю та, при тлінні вгору, конвекцією. Тління може перейти в гомогенне кінетичне горіння (вибух) при накопиченні ЛПР у закритому об'ємі до  $\phi_{\text{н}}$ , появи ДЗ, збільшенні надходження повітря до осередку тління.

### 5. ГОРІННЯ ПОЛІМЕРІВ.

Пластмаси містять полімери, наповнювачі, пластифікатори, стабілізатори.

Полімери це високомолекулярні ТГМ-1 або ТГМ-2 з  $M > 5000$  а.о.д., які складаються з ланцюгів, що багато разів повторюються (мономерів).

Полімери класифікують:

1. За структурою:

лінійні (нерозгалужені) мають лінійне повторення ланцюга **-А-**.

розгалужені мають з бокові ланцюги (**-Б-**).

просторові (сітчасті) мають каркас з поперечних зв'язків (**-Б-**) між ланцюгами

2. За поведінкою при нагріві:

Термопласти, ТГМ -1, лінійні або розгалужені. При нагріві плавляться без хімічних змін, утворюють рідкий шар на горизонтальній поверхні - 10 - 20 мм, на вертикальній - 1-2мм.. При перегріві розкладаються з утворенням ЛПР.

Реопласти, ТГМ -2, - просторові або розгалужені - при нагріві їх властивості змінюються безповоротно, вони не плавляться, а тільки розкладаються на ЛПР та ТВЗ.

Особливостями горіння полімерів:

1. полімери не випаровують, а розкладаються.

2. велика щільність та токсичність диму (ЛПР+ПГ) - синильна кислота  $\text{HCN}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$  і  $\text{NO}_2$ ,  $\text{HCl}$  і інші.

3. Велика теплота згоряння і температура горіння;  $T_{\text{гор}} = \text{до } 1200 \text{ C}$ .

4. розтікання та краплепадіння при горінні термопластів збільшує площу пожежі.

5. Полімери погано змочуються водою, тому гасити їх потрібно водою зі змочувачем, або піною, і застосовувати ізолюючі протигази.

### 6. ГОРІННЯ МЕТАЛІВ

Летючі метали (лужні і лужноземельні) -  $T_{\text{пл Me}} < 1000 \text{ K}$ ,  $T_{\text{кип Me}} < 1500 \text{ K}$ .  $T_{\text{кип Me}} \leq T_{\text{пл. оксидів}}$ . При нагріві метал плавиться, закипає. Пара металу розриває оксидну плівку і при  $\phi_{\text{Me}} = \phi_{\text{н}}$  запалюється. Встановлюється гомогенне горіння. Продукти горіння (оксиди металів) утворюють щільний білий дим.

Нелетючі метали (Al, Be, Ti, Zr).  $T_{\text{пл Me}} > 1000\text{K}$ ,  $T_{\text{кип Me}} > 2500\text{K}$ ,  $T_{\text{кип Me}} > T_{\text{пл. оксидів}}$ . Оксидна плівка плавиться раніше ніж метал закипить і розчиняється у розплаві металу. Метал починає окислюватись киснем повітря по поверхні частки (гетерогенне горіння). Такі метали горять у вигляді стружки, порошоків і аерозолів.

Особливості горіння: 1. Горіння металів можливе в продуктах горіння, без кисню: 2. Метали горять з виділенням великої кількості енергії і випромінювання.  $T_{\text{гор}} = 2500 - 3500 \text{ K}$ .

**ЗАВДАННЯ НА САМОПОДГОТОВКУ:**

1. П.Г.Демідов, В.А.Шандиба, П.П.Щеглов. Горіння і властивості горючих речовин, стор. 148-158, 235-245.
  2. П.Г.Демідов, В.С.Саушев. Горіння і св-ва горючих речовин, стор. 225-234.
  3. Д.Драйздейл. Введення в динаміку пожеж, стор. 10-21, 169-180.
  4. Баратов, Корольченко- Пожаровзривоопасность веществ материалов стор. 20-21
- II. Скласти порівняльну таблицю горіння газів, рідин, ТГМ.

### **Р.3. Л.12. ОСОБЛИВОСТІ ГОРІННЯ ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ**

**План лекції** Загальна характеристика, властивості. Запалювання. Особливості горіння. Пожежна небезпека пилу.

**Ключові слова:** АГ - аерогель, АЗ – аерозоль, ЛПР, ТГМ, ЦВМ, ТВЗ, СС, СЗ

*В 1906 р. при вибуху вугільного пилу на шахті у Франції загинуло 1100 чоловік. У сімдесятих - вісімдесятих роках 20-го сторіччя в США річний збиток від пожеж і вибухів пилу пластмас складав 5,6 млн. дол.*

*Ще 20 років тому кінетичне, тобто вибухове, горіння пилу у завислому стані не враховувалося в нормах будівельного проектування.*

*Почастішали вибухи пило-газо-повітряних сумішей. Так, в квітні 1998 року в Донецьку на шахті ім. Скочинського при вибуху суміші метану з вугільним пилом загинуло більше за 60 осіб, а в березні 1993 року в Туреччині на одній з шахт такий вибух уніс життя 263 осіб.*

#### **1. ХАРАКТЕРИСТИКА І ВЛАСТИВОСТІ ПИЛУ.**

**Пил** це колоїдна система з твердої дисперсної фази у газовому дисперсійному середовищі.

**Класифікації пилу:**

**За видом дисперсної фази:** 1. *монодисперсний* пил має частки однакового розміру. 2. *полідисперсний* пил має частки різного розміру (промисловий пил).

**За станом:** 1. *аерозоль* - це пил, завислий у повітрі. 2. *аерогель* – це пил осілий з повітря, але кожна частка пилу все одно оточена повітрям.

**За дисперсністю:** 1. Дрібнодисперсний пил,  $d < 10^{-7}$  м, не осаджується з повітря, має велику реакційну поверхню, хімічну активність, адсорбційну здатність, схильність до електризації, ПНБ. 2. Крупнодисперсний пил,  $d > 10^{-4}$  м, - навпаки. 3. Середньодисперсний пил  $4 \cdot 10^{-5}$  м краще поширює горіння.

**Властивості пилу:**

1. **Дисперсність**  $a=1/d_c$  - міра подрібнення матеріалу (пил з часток великого діаметру  $d_c$  має малу **дисперсність** і питому поверхню  $S_{\text{пит}}$ ).
2. **Хімічна активність** – це здатність пилу вступати в хімічні реакції. Дрібнодисперсний пил має більшу реакційну поверхню і хімічну активність. Тому важкогорючі матеріали у стані пилу здатні до СЗ (Fe, Al, Zn).
3. **Адсорбційна здатність** – це поглинання газів мікропорами пилу з виділенням тепла. Поглинання кисню інтенсифікує окиснення і збільшує ПНБ пилу. При поглинанні негорючих газів ПНБ пилу ↓.
4. **Електризація** – це здатність поверхні часток пилу набувати електричний заряд шляхом адсорбції іонів, при терті, подрібненні, контакті з зарядженою поверхнею. Електризація підвищує стійкість хмари пилу і створює загрозу іскрового розряду з запалюванням пилу. Для захисту від вибуху заземлюють всі металеві частини пристроїв. (При подрібненні зерна в муку виникає електрична напруга  $> 10$  кВ.)

## 2. ЗАПАЛЮВАННЯ ПИЛУ

### 2.1. Виникнення горіння пилу

При впливі ДЗ частка пилу нагрівається до температури фазового переходу ТГМ (плавлення, сублімація, розкладання), утворюється тверда частка ТВЗ і парогазова хмара ЛПР, яка запалюється від ДЗ при  $\phi_{\text{ЛПР}} = \phi_n$  у вигляді «**вогненної сфери**». Для аерогелю можливі всі види виникнення горіння: 1.СС, 2.СЗ, 3.ВЗ від ДЗ.

1. **Мінімальна енергія запалювання пилу**  $E_{\text{min}}$  – це найменша енергія електричної іскри, за якої пил запалюється. Ця енергія витрачається на нагрів, фазовий перехід ТГМ та нагрів ЛПР до запалювання.

$$E_{\text{min}} = Q_{\text{нагр}} + Q_{\text{ф.п.}} + Q_{\text{зап}} = \frac{4}{3} \pi r_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ТВ}} \left[ c_{\text{рТВ}} (T_{\text{фп(розкл)}} - T_0) + H_{\text{фп(розкл)}} \right] + \frac{4}{3} \pi r_{\text{гс кр}}^3 \rho_{\text{гс}} c_{\text{ргс}} (T_{\text{гор}} - T_{\text{фп(розкл)}})$$

де  $T_0, T_{\text{фп.}}, T_{\text{гор}}$  - температури початкова, фазового переходу і горіння, К;  $H_{\text{ф.п.}}$  - теплота фазового переходу, Дж·кг<sup>-1</sup>;  $c_{\text{рТВ}}, c_{\text{рГ}}$  - теплоємність ТГМ та газової сфери, кДж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>.

2. **Температура запалювання пилу**  $T_{\text{зап}}$  – це найменша температура, за якої пил розкладається і виділяє ЛПР у кількості  $\phi_{\text{ЛПР}} = \phi$ ,  $T_{\text{зап аг}} < T_{\text{зап аз}}$ .

3. **Температура СС пилу**  $T_{\text{сс}}$  - найменша температура самоспалахування його ЛПР,  $T_{\text{сс аз}} > T_{\text{сс аг}}$  оскільки  $q(-)аз \gg q(-)аг$

4. СЗ характерне лише для АГ.

Пил полімерів (2го роду) - **теплове СЗ**: розкладання ТГМ - окислення ЛПР - СН - обуглення - СН – окислення ТВЗ – тління - полум'яне горіння.

Вугільний пил - **фізичне СЗ**.

Пил ЦВМ - **мікробіологічного СЗ**.

Металеві порошки - **хімічне СЗ**, є максимальний розмір часток, які СЗ.

## 3. ОСОБЛИВОСТІ ГОРІННЯ ПИЛУ

### 3.1 Горіння АГ

1. Оскільки АГ має меншу теплопровідність ніж ТГМ, більшу  $S_{\text{пит}}$  то окислення, адсорбція, швидкості розкладання та **поширення горіння** більші,

$T_{\text{зап АГ}} < T_{\text{зап ТГМ}}, t_{\text{зап АГ}} < t_{\text{зап ТГМ}}$ .

2. АГ більш **схилен до СЗ** ніж цільний ТГМ, бо має більшу поверхню окислення і гірші умовам тепловіддачі у товщі пилу.

3. АГ окислюється і по поверхні пилового шару, і в глибині. Окислення під шаром пилу **може перейти в тління**. Тління може викликати вибух при накопиченні ЛПР або через приток кисню при струшуванні.

4. АГ може **переходити у завислий стан** (у АЗ) при струшуванні, дії повітря, потоку ПГ, при цьому горіння переходить у кінетичне (вибух).

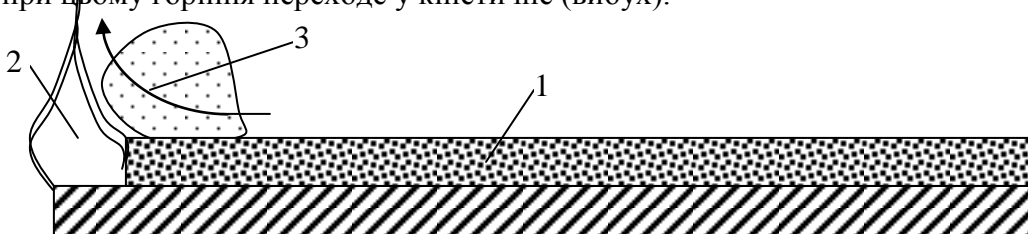


Схема поширення полум'я над поверхнею аерогелю  
 1 - аерогель; 2 - фронт полум'я; 3 - зона потоку повітря перед полум'ям.

### 3.2 Горіння АЗ

Параметри ПНБ пилу: КМПП, Езап min, Pmax, Тсс.

Різниця горіння АЗ і газів.

1) Езап АЗ >> Езап газів, бо потрібна енергія на фазовий перехід ТГМ.

2) Для АЗ існують КМПП, але на практиці  $\phi_v$  не досягається, бо частки пилу злипаються і осаджуються, тому ПНБ пилу характеризують за  $\phi_n$ .

3. Полум'я в АЗ поширюється при передачі тепла *за естафетним механізмом* від частки що горить до холодної частки випромінюванням (у газах працює механізм теплопровідності). Тому *швидкість поширення полум'я в АЗ на порядок вище ніж у газах*. У частки, що горить, існує зона теплового впливу - «вогнена сфера», в межах якої  $l \leq R_{BC}$  холодна частка підпалиться.

4. Стадії запалювання АЗ: 1. Попередній нагрів. 2. ф-х перетворення, 3. Утворення ТВЗ та ЛПР, 4. Нагрів АЗ до  $T_{зап}$ , досягнення  $\phi_n$ , швидке окислення. 5. Виникнення горіння.

5. *Режими горіння АЗ:*

1. Гомогенне горіння АЗ спостерігається, коли горять ЛПР ТГМ-1, який не утворює ТВЗ. 2. Квазігомогенне горіння АЗ спостерігається, коли горять частки безгазових ТГМ гетерогенно, але горіння виглядає як гомогенне. 3. Змішане горіння АЗ спостерігається для ТГМ 2, коли ЛПР горять гомогенно, а ТВЗ – гетерогенно.

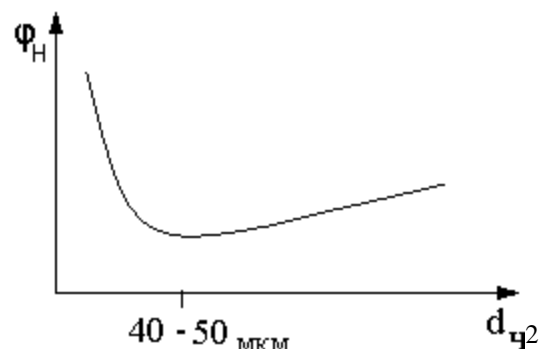
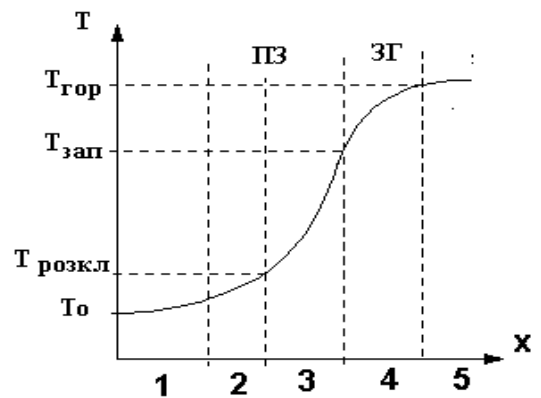
6. *Поетанні вибухи* відбуваються при швидкому згорянні аерозолу, що створює підвищений тиск. Первинний вибух за  $\phi_{пилу} = \phi_n$  відносно слабкий, але його ударна хвиля підіймає в повітря аерогель в більшій концентрації і подальші вибухи більш сильні.

### 3.3. Фактори, що впливають на вибухонебезпеку АЗ

фактор	$\phi_n$	$T_{зап}$
1. волога $W, \% \uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$
2. Вміст летючих компонентів пилу, $V \uparrow$	$\downarrow$	$\downarrow$
3. Зольність (тверді негорючі компоненти), $A \uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$
4. $\phi_{нг} \uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$
5. Едз; $\uparrow$	$\downarrow$	$\downarrow$
6. $T_0 \uparrow$ спочатку втрата кисню з пилу, далі $q(-) \downarrow$	спочатку $\uparrow$ , далі $\downarrow$	$\downarrow$
7. $P \uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$
8. $\phi_{O_2} \uparrow$ (існує $\phi_{МВКК}$ – коли вибуху не буде)	$\downarrow$	$\downarrow$
9. <b>Вміст горючих газів (<math>\phi_{гг}</math>) <math>\uparrow</math></b>	$\downarrow$	$\downarrow$

*Дисперсність:* Дрібнодисперсний пил швидше запалюється, але має малу вогнену сферу. Крупнодисперсний пил довго запалюється, але має велику вогнену сферу. Тому запалюється за менших концентрацій середньодисперсний пил 40 – 50 мкм.

*Вміст горючих газів  $\phi_{гг}$ :* Аерозолі у суміші з горючими газами і повітрям називають *гібридними сумішами*, вони мають особливості горіння:





1. Важкогорючий пил горить; 2. тиск вибуху такої суміші підвищується. 3. пил і газ, взяті у безпечній концентрації, разом можуть горіти;

#### 4. КЛАСИФІКАЦІЯ ПИЛУ ЗА ПНБ

I - вибухонебезпечний (ВНБ) пил  $\varphi_n < 65 \text{ г/м}^3$  та  $\Delta P > 5 \text{ к Па}$ .

1 клас - найбільш ВНБ пил  $\varphi_n < 15 \text{ г/м}^3$ ;

2 клас - ВНБ пил  $\varphi_n = 16 - 65 \text{ г/м}^3$ .

II - пожежонебезпечний пил (ПНБ)

3 клас - найбільш ПНБ пил,  $T_{cc} < 250^\circ\text{C}$ ;

4 клас - ПНБ пил із  $T_{cc} > 250^\circ\text{C}$ .

#### *Завдання на самопідготовку:*

Проробити літературу: Демидов, Шандиба, Щеглов - Горіння і властивості горючих речовин стор. 129-148.

### Р.3. Л.13. ПОЖЕЖІ

План лекції: 1. Поняття про пожежу. 2. Основи запобігання горіння. 3. Фізико-хімічні основи припинення горіння. 4. Способи припинення горіння.

#### 1. ПОНЯТТЯ ПРО ПОЖЕЖУ

**Пожежа** – це неконтрольоване горіння поза спеціального осередку, що розвивається в просторі і часі та завдає матеріальні, моральні, екологічні збитки.

**Загальні** явища властиві кожній пожежі: 1. *Горіння*. 2. *Масообмін* шляхом конвекції. 3. *Теплообмін* – нагрів за рахунок тепла пожежі ГР, БК.

Опіки шкіри виникають за густини теплового потоку  $1,4 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$ .

**Критичний час розвитку пожежі** в огороженні для людей визначається часом, за який  $\varphi_{\text{O}_2} = 16 \%$  або  $t_{\text{кр}} = 70^\circ\text{C}$ .

**Другорядні** явища властиві конкретній пожежі і виникають внаслідок дії загальних явищ: радіоактивне забруднення. Вибух балонів або вибухових речовин. Руйнування БК. ударна хвиля; отруйні, агресивні та вогнегасні речовини; електричний струм. Скипання або викид. Гибель людей, тварин.

Зони пожежі: 1. Горіння. 2. Теплового впливу. 3. Задимлення.

Пожежна навантага – кількість тепла, що виділяється з одиниці площі пожежі.

*Стадії розвитку пожежі:*

1. **Початкова** – вигоряє 20 % ПН. Триває до 30 хв, на 10 хв руйнуються вікна. 1 фаза - перехід загоряння в пожежу до 5 хв, 2 фаза - об'ємний розвиток пожежі, 3 фаза - параметри пожежі досягають максимуму.

2. **Основна** – температура спочатку максимальна і починає знижуватись на 20 %. Вигоряє 80 % ПН. Руйнуються БК.

3. **Кінцева** – догоряння,  $v_m \downarrow$   $T_{\text{пож}} \downarrow$ . Перехід гомогенного горіння в гетерогенне.

**Температурний режим пожежі** в огороженні - це зміна температури пожежі в часі.

*Періоди гасіння:*

1. вільний розвиток,  $\tau_{віль}$ , від початку пожежі до введення вогнегасних речовин.
2. локалізація,  $\tau_{лок}$ , до стабілізації площі пожежі
3. ліквідація,  $\tau_{лікв.}$ , до моменту неможливості відновлення пожежі.

## 2. КЛАСИФІКАЦІЯ ПОЖЕЖ

### 2.1. За умовами газообміну:

1. *Пожежі на відкритому просторі мають газообмін не обмежений БК.*  
- Окремі, Суцільні, Масові.  
- Вогневий шторм – великий факел з потужною конвекційною колонкою до 5 км висотою, яка втягує повітря зі швидкістю  $15 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ . Виникає при сухому повітрі, великому ПН,  $S_{пож} > 2,5 \text{ км}^2$ ,  $0 < v_{вітр} < 5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ .

2. *Пожежі в огороженні мають газообмін обмежений БК.*

Пожежі регулюються вентиляцією, якщо є нестача кисню і надлишок ГР.

Пожежі регулюються пожежною навантагою, якщо є надлишок кисню, мала ПН.

Відкриті і закриті пожежі – є або немає газообміну з навколишнім середовищем.

### 2.2 за зміною площі горіння

*Пожежі, що поширюються; та пожежі, що не поширюються, коли ЗГ обмежена площею розташування ГР (рідини).*

### 2.3. Класи пожеж за видом ГР

**A** – горіння ТГМ. **A1** – ТГМ 2. **A2** – ТГМ 1, що розкладаються.

**B** – горіння рідин. **B1** – водонерозчинні рідини та ТГМ 1, що плавляться. **B2** – водорозчинні рідини.

**C** горіння газів і газо-нафтових фонтанів.

**D** горіння металів. **D1** - метали з високою Тгор - Mg, Al, Sr, Ba, Ti, Zr -. **D2** - лужні метали, що реагують з водою. **D3** - металоорганічні сполуки.

**E** – горіння електроустановок під напругою.

## 3. ПОЖЕЖІ КЛАСУ “А”

1. *Коефіцієнт поверхні горіння  $K_{п}$  показує во скільки разів поверхня горіння ТГМ  $S_{гор}$  більша  $S_{пож}$ .*

2.  *$P_{кА}$  відносяться до тих, що поширюються*

3.  *$V_1$  та радіус розвитку пожежі  $R$  залежать від  $\tau_{пож}$ .*

*вільний розвиток  $\tau_{віль} < 10 \text{ хв}$  –  $v_1 = 0,5 v_1^0$      $R = 0,5 v_1^0 \tau$  ( $v_1^0$  - за довідником)*

*$\tau > 10 \text{ хв}$      $v_1 = v_1^0$      $R = 0,5 v_1^0 10 + v_1^0 (\tau - 10)$*

*локалізація     $v_{1лок} = 0,5 v_1^0$*

*ліквідація     $v_1 = 0$*

4. Спрощення при розрахунку **ЗГ ПкА**: ПН і поширення пожежі рівномірні; форми пожежі - коло, півколо, чвертьколо, сектор та прямокутна; БК затримують пожежу на час їх вогнестійкості;

5. **ЗТВ і ЗЗ ПкА** в огороженні мають накопичення тепла і диму, що збільшує температуру і викликає можливість вибуху.

## 4. ПКА НА ВІДКРИТОМУ ПРОСТОРИ –

Це зовнішні пожежі споруд, складів ТГМ, лісів та степу, коли не обмежений тепло і масообмін, з'являється *конвекційна колонка*, яка розносить ТГМ, що горять.

**ЗГ** -  $v_{вітр} < 5 \text{ м/с}$  - форма пожежі кругова.

$v_{вітр} > 5 \text{ м/с}$  – сектор з кутом

поширення  $\alpha = (65 - 2,6 v_{вітру}) / 57$

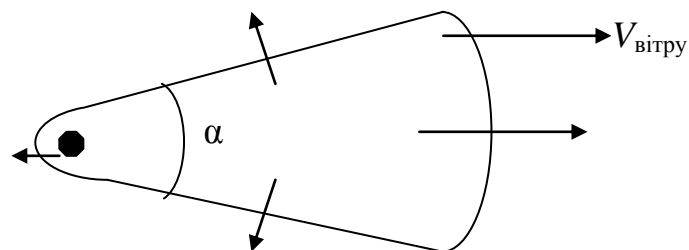
та площею  $S_{пож} = 0,5 \alpha R^2$

**ЗТВ** – тепло не накопичується, межі **ЗТВ** визначається променистим теплообміном.

**ЗЗ** –  $v_{вітр} < 5 \text{ м/с}$  - дим підіймається вгору;

$v_{вітр} 5 - 12 \text{ м/с}$  - дим притискається до землі,

$> 12 \text{ м/с}$  - дим розвіюється.



## 5. ПОЖЕЖІ КЛАСУ В

Пожежа класу **В** виникає при запалюванні пари над рідиною у технологічному обладнанні або над аварійним розливом. Над резервуаром існує "Мале дихання" при зростанні температури рідини, "Велике дихання" - при заповненні резервуару.

В газовому просторі апарату можливість запалювання пари оцінюється за ТМПП. У зовнішньому просторі при виході пари з апарату або при аварійному розливі рідин можливість запалювання визначають за КМПП. Над рідиною з достатньою температурою - пожежонебезпечні концентрації пари ПНК, при деякому віддаленні – вибухонебезпечні ВБК, ще далі – безпечні. Зона ВНК при запалюванні вибухає і створює ударну хвилю, після цього зона ПНК догоряє у вигляді великої вогненої сфери за 1 – 2 с.

**ДЗ ПкВ:** 1. удари блискавки; 2. електростатичні розряди; 3. фрикційні іскри; 4. samozаймання сульфідів заліза.

Види пожеж рідин в резервуарах: 1. **внутрішня пожежа** – вибух пари всередині резервуару; 2. **пожежа на дихальних пристроях** – на отворах резервуару; 3. **зовнішня пожежа** - в обвалуванні при аварійному витіканні або викиді рідини з резервуару.

## 6. ПОЖЕЖІ КЛАСУ С

Схема розвитку: 1. Первинний вихід газу. 2. Утворення газоповітряної хмари. 3. Запалювання і вибух газової хмари при  $\varphi_n \leq \varphi_f \leq \varphi_v$ . 4. Руйнування під впливом ударної хвилі. 5. У місцях руйнувань - нові осередки вибухів і пожеж. 6. Виникнення вогненої сфери в області ПНК.

**Горіння газових та нафтових фонтанів** є дифузійним з турбулентним режимом витікання. Газонафтові фонтани - газу > 50 % і нафти < 50 % - найбільш високі, бо більш компактні. Якщо факел розпилений – він має розвинену поверхню і більш інтенсивне випромінювання:

**Небезпечні фактори ПкВ та С:** 1. відкритий вогонь; 2. теплове випромінювання; 3. токсичні ПГ; 4. фактори вибуху (ударна хвиля; уламки); 5. при горінні фонтанів низькочастотні коливання створюють відчуття жаху; випадання газового конденсату з нафтового фонтану ускладнює гасіння. 6. Спінювання або викид нафти.

(Час до викиду нафти з резервуару що горить).

## 6. ГАЗООБМІН ПОЖЕЖІ В ОГОРОДЖЕННІ

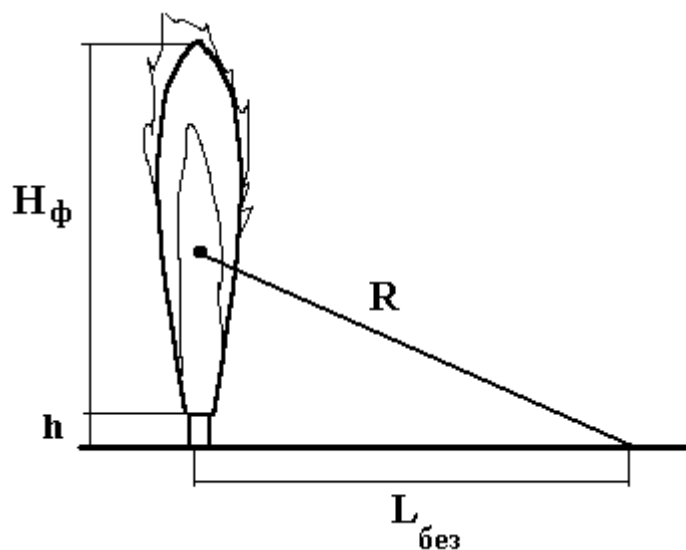
**Газообмін** – це рух конвекційних газових потоків внаслідок градієнту тиску за наявності різниці температур; штучної вентиляції; вітру, пожежі та за висотою будівлі.

Гарячий дим має збільшений тиск, розширюється, має меншу густину ніж повітря, підіймається вгору і витискається через відкриті отвори назовні.

**Якщо приміщення ізольовано від НС** - все приміщення задимлене.

**Газообмін через один отвір** – відбувається якщо всі отвори знаходяться на одному рівні і працюють водночас на вихід диму у верхній частині та на приток повітря у нижній. Приток повітря зумовлений зменшенням тиску при пожежі біля підлоги. Приблизно посередині висоти отвору знаходиться нейтральна зона – площа паралельна підлозі, в кожній точці якої тиск дорівнює атмосферному. Дим нижче нейтральної зони не опускається.

**Газообмін через два отвори** – верхні отвори працюють на вихід ПГ, нижні – на приток зовнішнього повітря. Вихід ПГ через верхній отвір зменшує тиск під стелею, тому висота НЗ збільшується і знаходяться між центрами верхнього та нижнього отворів.



Методи регулювання газообміну на пожежі зменшують тиск ПГ під стелею і збільшують тиск повітря біля підлоги:

1. відкачка ПГ димососами в верхніх отворах.
2. розкриття верхніх отворів, закриття нижніх.
4. осадження та охолодження ПГ розпиленою водою.
- 5- нагнітання повітря в нижню частину приміщення.
6. Перепони для поширення диму з повітряно-механічної піни, протипожежні завіси.

#### **Завдання на самопідготовку:**

1. И.М. Абдурагимов, В.Ю. Говоров, В.Е. Макаров - Фізико-хімічні основи розвитку і гасіння пожеж, стор. 75 -145.
2. Підготуватися до розрахунку температур пожежі та висоти НЗ.

## **Р.4. ЗАПОБІГАННЯ ТА ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ**

### **Л.14. ОСНОВИ ЗАПОБІГАННЯ ТА ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ.**

План лекції: 1. Поняття про пожежу. 2. Основи запобігання горіння. 3. Фізико-хімічні основи припинення горіння. 4. Способи припинення горіння.

#### **1. ПОНЯТТЯ ПРО ПОЖЕЖУ**

**Пожежа** – це неконтрольоване горіння поза спеціального осередку, що розвивається в просторі і часі та завдає матеріальні, моральні, екологічні збитки.

**Загальні** явища властиві кожній пожежі: 1. *Горіння*. 2. *Масообмін* шляхом конвекції. 3. *Теплообмін* – нагрів за рахунок тепла пожежі ГР, БК.

Критична температура вологого повітря для людини  $T_{кр} = 70^{\circ}\text{C}$ . Критичний вміст кисню у задимленому повітрі для людини 15-16 %. Опіки шкіри виникають за густини теплового потоку  $1,4 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$ .

**Другорядні** явища властиві конкретній пожежі і виникають внаслідок дії загальних явищ: радіоактивне забруднення. Вибух балонів або вибухових речовин. Руйнування БК. ударна хвиля; отруйні, агресивні та вогнегасні речовини; електричний струм. Скипання або викид. Гибель людей, тварин.

Зони пожежі: 1. Горіння. 2. Теплового впливу. 3. Задимлення.

*Стадії розвитку пожежі:*

1. **Початкова** – вигоряє 20 % ГР. Триває до 10 хв, потім руйнуються вікна.
2. **Основна** – температура спочатку максимальна і починає знижуватись на 20 %. Вигоряє 80 % ГР. Руйнуються БК.
3. **Кінцева** – догоряння,  $v_m \downarrow$   $T_{пож} \downarrow$ . Перехід гомогенного горіння в гетерогенне.

*Періоди гасіння:*

1. вільний розвиток,  $\tau_{вил}$ , від початку пожежі до введення вогнегасних речовин.
2. локалізація,  $\tau_{лок}$ , до стабілізації площі пожежі
3. ліквідація,  $\tau_{лікв.}$ , до моменту неможливості відновлення пожежі.

## 2. ЗАПОБІГАННЯ ГОРІННЯ

### 2.1. Горючість речовин і матеріалів

Речовини та матеріали, властивості яких сприяють виникненню та розвитку пожежі, відносять до пожежонебезпечних.

ПНБ рідин та газів визначають за: КМПП,  $R_{мах}$ ,  $T_{сс}$ ,  $E_{мін}$ ,  $u_n$ ,  $\phi_{МВВК}$ . Для рідин крім цього визначають:  $T_{сп}$ ,  $T_{займ}$ ,  $T_{МПП}$ ,  $u_m$ ,  $u_h$ , групу горючості.

ПНБ твердих речовин визначають за:  $T_{займ}$ ,  $u_l$ ,  $u_m$ , групу горючості. Для ТГМ, що плавляться, додатково визначають  $T_{МПП}$  та  $T_{сп}$ . Для волокнистих, сипучих, поруватих -  $T_{сн}$ . Для пилю - НКМПП,  $R_{мах}$ ,  $E_{мін}$ ,  $T_{сс}$ .

Горіння існує коли є горюче середовище та ДЗ, з достатньою енергією, тобто:  $q(+)$  =  $q(-)$ ,  $\phi_n < \phi_\phi < \phi_v$ ,  $t_n < t_\phi < t_v$ ,  $E_{дз\ мин}$ ,  $V_1\ мин$   $V_m\ мин$ ,  $T_{зг\ мин}$ . Нижче граничних значень цих параметрів процес горіння не існує.

За групою горючості розрізняють негорючі, важкогорючі, та горючі речовини.

Негорючі речовини не горять у повітрі за  $T = 900\ C$ , їх  $T_{ад} < 1373K$ . Серед них є пожежонебезпечні: це окисники та речовини, що розкладаються на горючі або вибухають.

Важкогорючі запалюються, але самостійно не горять.

Горючі речовини можуть самозайматися, самоспалахувати, запалюватися від джерел запалення і самостійно підтримувати горіння. В них  $Q''_n > 1830\ кДж \cdot м^{-3}$ , та  $T_{ад} > 2000\ K$ . Горючі рідини поділяють за  $T_{сп}$  на – ГР та ЛВЖ.

### 3.2. Запобігання виникнення горючого середовища

Для цього підтримують концентрацію ГР, кисню або негорючого газу в повітряному просторі апаратів у безпечних концентраціях:

$$\begin{aligned} \text{Безпечні КМПП газів і парів: } \phi_{нб} > \phi_\phi > \phi_{вб}. \phi_{н. без} &= 0,9(\phi_n - 0,21) \\ \phi_{в. без} &= 1,1(\phi_v + 0,42). \end{aligned}$$

$$\text{Для пилю } \phi_\phi < \phi_{н. без} = 0,54\phi'_n.$$

Безпечні температури горючих рідин у відкритих апаратах  $t_\phi < t_{без} = t_{сн} - 35, ^\circ C$ ; у закритих  $t_{нб} > t_\phi > t_{вб}$ ,  $t_{н без} = 0,9(t_n - K_6)$ ,

$$t_{в без} = 1,1(t_v + K_6),$$

Безпечні концентрації негорючих газів та кисню.

$$\phi_{\phi, л}^0 = 100 - \frac{477,4 \cdot \phi_{O_2}}{100 - \phi_{H_2O}}; \phi_{\min\ \phi, л} \geq 1,1(\phi_{\phi, л} + 0,7R), R = 0,6$$

$$\phi_{O_2\ МВВК} = \frac{100 - \phi_{\phi, л}}{4,76}, \%$$

$$\phi_{O_2\ безп} \leq 0,9(\phi_{O_2\ МВВК} - 0,7R), R = 0,3$$

*Поділення горючої системи на малі об'єми вогнеперешкоджувачами підвищує  $T_{сс}$  і поширення горіння стає неможливим.*

### 3.3. Запобігання виникнення джерел запалювання

Можливість запалювання відсутня, якщо

- температура нагрітого тіла  $t_{без} \leq 0,8 t_{сс}$ , - **неможливе СС**
- запас енергії електричного розряду  $E_{без} \leq 0,4 E_{\min}$  - **неможливе ВЗ**
- температура середовища менша, ніж температура самонагріву, а час нагріву менше, ніж період індукції при самозайманні.

### 3.4. Способи зниження горючості матеріалів.

**Фізичні: 1.** Зменшення підводу окислювача, та відводу ЛПР для ТГМ. Негорючі покриття, гелі. Наповнювач у пластмасі, що при нагріві утворює склоподібну плівку.

2. Зменшення тепло підводу до ТГМ. Покриття, що слухуються за високих температур

виділяють ЛПР, утворюється піна, що твердне. Цей шар має низьку теплопровідність і захищає ТГМ від впливу полум'я.

**Хімічні: 1.** Зменшення розкладання ТГМ і кількості ЛПР.

а) Введення негорючого наповнювача у полімер.

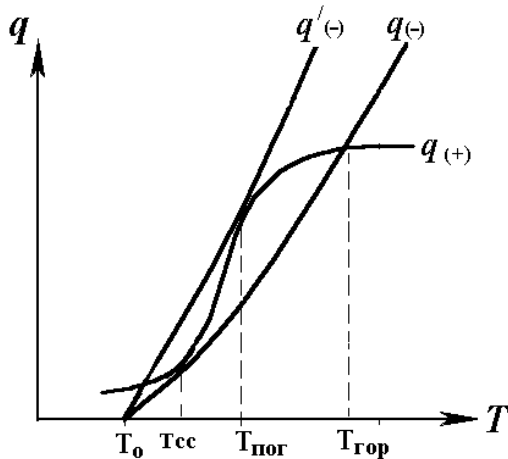
б) Модифікація ТГМ для сповільнення розкладання і горіння.

2. Введення антипіренів для зміни реакцій розкладання у напрямку утворення негорючих ЛПР ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $HCl$  і ін.).

3. Для рідин та газів – розбавлення негорючою рідиною або газом.

### 3. ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ

Якщо створити умову  $q(+) < q(-)$ ,  $T_{3Г} \downarrow$  до **температури погасання**  $T_{пог}$ , нижче якої горіння неможливе. Її досягають методами: 1.  $q(+)\downarrow$  2.  $q(-)\uparrow$



. За  $T_{пог}$  виконуються умови:  $q(+) = q(-)$ ;

$$\left. \frac{dq(+)}{dT} \right|_{T_{пог}} = \left. \frac{dq(-)}{dT} \right|_{T_{пог}}; \quad \left. \frac{d^2q(+)}{dT^2} \right|_{T_{пог}} < 0$$

Для досягнення критичної умови  $q(+) = q(-)$  та  $T = T_{пог}$  необхідно знизити температуру ЗГ на  $\Delta T = T_{гор} - T_{пог}$ , коли система переходить в область повільного окиснення.  $T_{пог} > T_{сс}$ . Для дифузійного

полум'я:  $\Delta T = \frac{3RT_{ад}^2}{E_{акт}}$ , для кінетичного полум'я:

$$\Delta T = \frac{RT_{ад}^2}{E_{акт}}$$

де  $T_{ад}$  - адіабатична температура полум'я;  $E_{акт}$  - енергія активації.

Для вуглеводнів приблизно  $T_{ад\text{сер теор}} = 2000-2500$  К,  $E_{акт\text{сер}} = 125\,000$  Дж/моль.

$$T_{пог} = T_{ад} - \Delta T = 2400 - \frac{3 \cdot 8,314 \cdot 2400^2}{125000} \approx 1250\text{К}$$

$T_{гор}$  газів = 1600-1800К,  $T_{гор}$  рідин = 1500-1600К і  $T_{гор}$  ТГМ = 1400-1500К. Тобто, для погасання достатньо знизити  $T_{гор} \downarrow$  на 20 %.

### 4. СПОСОБИ ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ

Використовують способи подачі ВГЗ в об'єм або на поверхню ГР.

Використовують прийоми подачі ВГЗ:

1. Охолодження водою або твердим  $CO_2$  для зменшення швидкості реакцій розкладання та окислення ГР.
2. Розбавлення негорючим газом горючої суміші азотом або  $CO_2$  для зменшення концентрацій горючої речовини та окисника.
3. Ізоляція: виключення однієї з умов виникнення горіння (горючої речовини або окисника або ДЗ) коврою, порошками загального призначення, гелями, піною.
4. Інгібування - це гальмування хімічної реакції окиснення введенням у ЗГ інгібіторів (хладони, порошки спеціального призначення, аерозолі), які збільшують втрати на початок хімічної реакції.

*Вибір засобів припинення горіння проводять за класом пожежі:*

Клас А (ТГМ) – краще вода або водні розчини, для запобігання – покриття що спучуються, гелі.

Клас В (рідкі речовини) – краще ізоляція піною. Для запобігання – флегматизація пароповітряного простору негорючим газом.

Клас С (горючі гази) – розбавлення зони горіння негорючим газом або інгібування.

Клас Д (метали) – краще ізоляція порошками спеціального призначення.

Клас Е (електроустаткування під напругою) – краще твердим  $\text{CO}_2$ , інгібуванням, порошками, розбавленням негорючими газами.

*Дану вогнегасну речовину не застосовують, якщо вона:*

1. реагує з горючою речовиною і підтримує горіння. Так,  $\text{CO}_2$  підтримує горіння металів.
2. реагує з горючою речовиною з утворенням горючих речовин. Так, азот з металами утворює вибухонебезпечні азиди.
3. реагує з негорючими речовинами з утворенням горючих речовин. Так, карбід кальція реагує з водою з утворенням горючого газу ацетилену.

#### Завдання на самопідготовку:

3. И.М. Абдурагимов, В.Ю. Говоров, В.Е. Макаров - Фізико-хімічні основи розвитку і гасіння пожеж, стор. 123-145.
4. Підготуватися до розрахунку температур погасання, мінімальної флегматизуючої концентрації та МВВК.

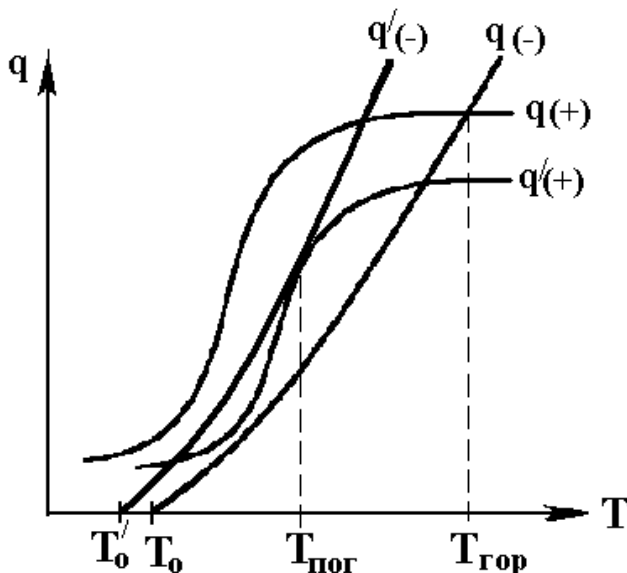
## Р.4. Л.15. ЗАПОБІГАННЯ ГОРІННЯ ОХОЛОДЖЕННЯМ ТА ІЗОЛЯЦІЄЮ

**План лекції.** 1. Механізм припинення горіння охолодженням 2. Теоретична інтенсивність подачі води на гасіння пожежі 3. Методи підвищення вогнегасної ефективності води. 4. Механізм припинення горіння ізоляцією. Утворення і властивості вогнегасних пін.

Зв'язок лекції: Пожежна тактика.

Ключові слова: ВГЗ,  $T_{\text{пог}}$ , ЗГ, ПАР, піноутворювач ПУ, піна, ГР, ОК

### 1. МЕХАНІЗМ ВПЛИВУ НА ГОРІННЯ ЗАСОБІВ ОХОЛОДЖЕННЯ



Припинення горіння охолодженням збільшує тепловтрати при горінні  $q(-)$ , знижує температуру ЗГ до  $T_{\text{пог}}$ , а це знижує  $\omega_{\text{хр}} \downarrow$  при охолодженні поверхні, зони горіння та розбавлення газового простору негорючим газом або паром.

На нагрів до  $T_{\text{гор}}$  затрачується 60%  $Q_{\text{н}}$ , 40% - тепловтрати. Приймаємо  $T_{\text{гор}}(\text{CnHm}) \approx 1400 \text{ K}$ ,  $T_0 = 300 \text{ K}$ ,  $\Delta T_{\text{нагріву}} = 1200 \text{ K}$ ,  $T_{\text{пог}}(\text{CnHm}) \approx 1200 \text{ K}$ , тобто  $\Delta T_{\text{пог}} = 200^\circ\text{C}$ , або  $200/1200 = 0,17$ . Тому потрібно відвести від ЗГ  $0,17 \cdot 0,6Q_{\text{н}} = 0,1Q_{\text{н}}$ . Оскільки  $Q_{\text{н}}(\text{CnHm}) \approx (45) \cdot 10^3 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ :

$$q(-) \approx 0,1Q'_{\text{н}} = 0,1(45000) = 4500, \text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

Вода забирає тепло від зони горіння в

три стадії:  $Q_{\text{нагр}1}$  - нагрів до  $T_{\text{кип}}$  відповідно її теплоємності,  $Q_{\text{ф.п}}$  – випаровування відповідно високій теплоті випаровування  $\Delta H_{\text{вип.}}$ ,  $Q_{\text{нагр}2}$  - нагрів до  $T_{\text{гор}}$ :  $Q_{\text{погл}} = Q_{\text{нагр}1} + Q_{\text{ф.п}} + Q_{\text{нагр}2}$ , кДж/кг. З врахуванням втрат води її нагрів та випаровування не повні:  

$$q_{\text{погл}} = 0,7C_p^{\text{рід}}(t_{\text{кип}} - t_0) + 0,55\Delta H_{\text{вип.}} + 0,4C_p^{\text{пар}}(t_{\text{гор}} - t_{\text{кип}}).$$

Для запобігання горіння конденсованих речовин необхідно охолоджувати їх поверхню, до температури нижче критичної  $T_{\text{кр}}$ . Для рідин – до  $T_{\text{пов}} < T_{\text{сп}}$ , тоді  $\phi_{\text{пари}} < \phi_{\text{н}}$   $q(+)$ ↓. Для ТГМ до  $T_{\text{пов}} < T_{\text{пір}}$ , тоді  $\phi_{\text{лпр}} < \phi_{\text{н}}$   $q(+)$ ↓.

## 2. ОХОЛОДЖУЮЧІ ЗАСОБИ

Вогнегасна речовина охолоджуючої дії повинна мати високу теплоємність, низьку  $T_{\text{кип}}$ , велику теплоту фазових переходів і термічну стійкість за  $T_{\text{гор}}$ . Цим вимогам відповідають вода, твердий  $\text{CO}_2$ , рідкий азот.

**Вода, як охолоджуючий засіб.** Вода охолоджує зону горіння та поверхню горючої речовини, випаровується, розбавляє газовий простір та ізолює поверхню при розтіканні. Вода безпечна для природи та людини, доступна і недорога, стійка при зберіганні, зручно транспортується і подається; поглинає теплове випромінювання; здатна до димоосадження. Вод має і недоліки: висока **реакційна здатність**; **електропровідність**, **мала в'язкість** - тому швидко стікає з поверхонь, **високий коефіцієнт поверхневого натягнення** – тому вода погано просочує матеріали, псує матеріали, **замерзає взимку**, тоне у нафтопродуктах. Для підвищення вогнегасної ефективності води використовують методи:

1. зміна фізичних характеристик водяних струменів: **розпилений струмень** має більшу поверхню контакту з полум'ям, тому вода швидше випаровується; і осаджує дим
2. хімічна модифікація фізичних і хімічних властивостей водних розчинів:
  - **змочувачі** (поверхово активні речовини - ПУ) підвищують здатності води проникати в шари матеріалу, що горить.
  - **загущувачі** запобігають стіканню води і збільшенню дальності польоту струменів.
  - **антифрїзи** знижують температуру замерзання ( $\text{NaCl}$ , гліколи).
  - **$\text{NaCl}$**  створює також ефект інгібування. Краплі води випаровуються, кристали солі утворюють вогнегасячий порошок.

**Твердий діоксид карбону** використовують, коли застосування води неможливе, він не проводить електричний струм; має температуру  $-78,4^\circ\text{C}$ ; не тоне в рідинах; повністю переходить в газову фазу; не змочує матеріали (сублимує); флегматизує газовий простір.

## 3. ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ МЕТОДОМ ІЗОЛЯЦІЇ

Ізоляція відокремлює від одну з умов, необхідних для горіння. При цьому концентрація продуктів випаровування, сублимації або розкладання у ЗГ -  $\phi_{\text{гр}} \downarrow < \phi_{\text{н}}$  або  $\phi_{\text{ок}} \downarrow < \phi_{\text{МВВК}}$ .  $q(+)$ ↓ <  $q(-)$   $T \downarrow$  до  $T_{\text{пог}}$ . **Види ізолюючих речовин:**

1. рідкі (піна, інколи вода, гелі);
2. газоподібні (продукти вибуху ізолюють ЗГ від ГР);
3. тверді листові (азбоцементні листи, покривала з негорючих тканин, покриття);
4. тверді сипучі (пісок, вогнегасні порошки спеціального призначення).

**Вогнегасні порошки спеціального призначення** – використовують для ізоляції від ОК осередків гетерогенного горіння – тління та горіння металів. Порошок плавиться і покриває поверхню ГР плівкою, яка не пропускає ГР або ОК у ЗГ.

## 4. ПІНИ

**Піна** це ячеїсто-плівкова система, де в рідкому середовищі диспергована газова фаза – бульбашки. Піну використовують при подачі на поверхню рідини. Скрізь піну погано проникає пара, тому зменшується кількість пари над по верхньою піною. Піною перекривають коридор і запобігають розповсюдження диму.

Вода здатна пінитись при додаванні поверхнево-активних речовин, які зменшують поверхневе натягнення на кордоні з газом. Такі молекули накопичуються на поверхні води і утворюють мономолекулярний шар-плівку. Тому повітряна бульбашка біля поверхні оточується подвійним шаром молекул ПАВ з прошарком розчину.

**Піноутворювачі** містять ПАВ, стабілізатори, згушувачі, інші добавки.



### Класифікація вогнегасних пін:

**1. Хімічна піна.** "Мокрий" спосіб - змішують лужний і кислотний розчини перед подачею у осередок пожежі, при реакції виділяється газ  $\text{CO}_2$ , який разом з ПУ утворює піну.

"Сухой" спосіб - у піногенераторі з потоком води змішують порошок, що складається з лужних та кислотних солей і ПУ. Далі - як і при "мокрому" способі.

**Піни, що піняться при нагріві.** Подають розчин з речовинами-пропілентами, які у факелі полум'я або на нагрітій поверхні розкладаються і спінують розчин ПУ.

**Піни, що швидко тверднуть.** У розчині є органічні формальдегідні смоли і отверджувач, які утворюють полімерну речовину, що швидко застигає і замість піни утворює губчасту масу, яка запобігає виникненню і поширенню горіння.

**Повітряно-механічну піну** отримують у **повітряно-пінних стволах і піногенераторах.**

У **повітряно-пінних стволах** струмені розчину піноутворювача подають під тиском, вони дробляться і захоплюють повітря.

У **піногенераторах** розчин ПУ і повітря подають у генератор піни. Краплі розчину попадають на клітинки сітки і видуються повітрям у вигляді пухирців.

Вогнегасні властивості повітряно-механічних пін визначаються їх кратністю, дисперсністю, стійкістю, ізолюючою здатністю, в'язкістю.

**Кратність** це відношення об'єму піни до об'єму утворюючої рідини. Піни низької кратності ( $K_n < 20$ ), середньої - ( $K_n = 20-200$ ), високої - ( $K_n > 200$ ). При  $K_n > 500$  низька вогнегасна здатність та стійкість, піна здувається вітром.

**Стійкість** це опір піни руйнуванню, визначається часом напіврозпаду піни, коли з піни виділиться половина рідини. Стійкість піни найбільша за  $K_n = 80-150$ .

**Ізолююча здатність** – здатність піни гальмувати випаровування горючої рідини, виражається часом, за який пара пройде крізь піну у кількості  $\varphi_{гр} = \varphi_n$ , або мінімальною товщиною шару піни  $H_{min}$ , що забезпечує  $\varphi_{гр} = \varphi_n$ .

### ЗАВДАННЯ НА САМОПІДГОТОВКУ

1. Підготуватися до виконання лабораторної роботи 2. Вивчити матеріал по учбових посібниках: І.М. Абдурагимов, В.Ю. Говоров, В.Е. Макаров. Фізико-хімічні основи розвитку і гасіння пожеж. З. 146-149; 182-199; 158-172.

В.І. Іванников, П.П. Ключ. Довідник керівника гасіння пожежі. З. 37-44.

## Р 4. Л.16. ЗАПОБІГАННЯ ГОРІННЯ ВОГНЕГАСНИМИ ЗАСОБАМИ, ЩО РОЗБАВЛЮЮТЬ ТА ІНГІБІРУЮТЬ

План лекції: Механізм припинення горіння інертними розріджувачами. Флегматизація.

Розрахунок параметрів пожежегасіння

Зв'язок лекції: пожежна автоматика

Ключові слова: негорючий газ НГ,  $\varphi_{фл}^0$  флегматизуюча концентрація, вогнегасна концентрація  $\varphi_{вогн}^0$ , теплоємність  $C_p$ , теплопровідність  $\lambda$ , ГС, ГР, ОК.

### 1. ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ ПОЛУМ'Я МЕТОДОМ РОЗБАВЛЕННЯ

Якщо у ГС (ГР + ОК) додати НГ ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ , Ar, пара  $\text{H}_2\text{O}$ , димові і вихлопні гази), то  $\varphi_{гр} \downarrow$ ,  $\varphi_{ок} \downarrow$ ,  $\omega_{хр} \downarrow$ ,  $q(+)\downarrow$  і суміш стає негорючою, а за умови  $T \downarrow$  до  $T_{пог}$  можна припинити горіння.  $q_{ТВ} = V_{см} Q_n \omega_{хр}$ .

Теплофізичні параметри НГ (теплоємність  $C_p$  і теплопровідність  $\lambda$ ) визначають, яка частина тепла ЗГ ( $Q_{втр}$ ) втратиться на нагрів НГ від  $T_0$  до  $T_{зг}$ .  $Q_{втр} = V_{нг} \rho_{нг} c_{p,нг} (T_{гор} - T_0)$

Якщо  $C_p$  НГ велика, він "поглинає" багато тепла і меншу витрату для запобігання або гасіння пожежі. Якщо  $\lambda$  НГ велика збільшується тепловідвод від ЗГ (**He**), це прискорює охолодження ЗГ, але інтенсифікує розповсюджує горіння. Чим вище **показник ефективності** негорючого газу  $N_{ef} = C_p / \lambda$ , тим вище його ефективність.

НГ	$\lambda$ , Вт/м К	$C_{pк}$ Дж/кг К	$N_{ef}$	$\Phi_{вогн}$
$\text{CO}_2$	13,6	0,91	0,0669	27%
Ar	16,6	0,53	0,0319	53%

Газ-флегматизатор повинен мати також густину близьку до густини повітря і безпечність. Так, багатоатомні гази,  $C_2F_6$ ,  $C_3F_8$  – ефективні (велика  $C_p$ ), але є дорогими та мають високу густину, тому погано розбавляють об'єм. Водяна пара та  $CO_2$  завдають шкоди матеріалам і устаткуванню. *Гази подають* :

1. В об'єм апаратів і приміщень середніх об'ємів для припинення горіння або запобігання вибуху. 2. У ЗГ для гасіння речовин, що горять на відкритому просторі. 3. У горючі рідини для зниження інтенсивності і температури її горіння або для зниження їх горючості.

*Не застосовують* негорючі гази для волокнистих, сипучих і пористих матеріалів, які можуть тліти; хімічних речовин, що окислюються без доступу повітря; пірофорних матеріалів. Висока температура горіння металів (ПкД) не дозволяє використовувати воду,  $CO_2$  та  $N_2$ . Азот з металами утворює вибухонебезпечні нітриди, азиди.

## 2. ФЛЕГМАТИЗАЦІЯ ГОРЮЧИХ СУМІШЕЙ НЕГОРЮЧИМИ ГАЗАМИ

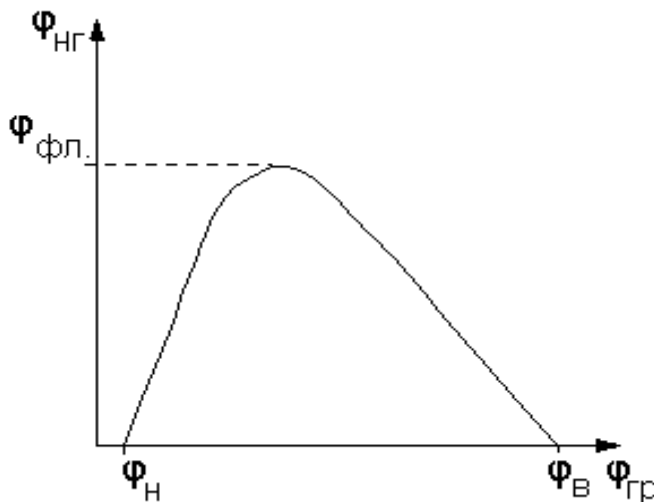
*Флегматизація* це запобігання утворення горючого середовища в газовому просторі апаратів або приміщень шляхом введення в горючу суміш НГ-флегматизаторів, при цьому область запалювання зменшується -  $\varphi_H \uparrow$ ,  $\varphi_B \downarrow$ . Точка у якій  $\varphi_H$  та  $\varphi_B$  сходяться, є точкою флегматизації,  $\varphi_{фл. \min}$ . *Мінімальна флегматизуюча концентрація*  $\varphi_{фл}$  це найменша концентрація НГ в стехіометричній суміші ГР + ОК, за якої суміш нездатна до поширення полум'я.

Флегматизуючій концентрації відповідає мінімальна вибухонебезпечна концентрація кисню:

$$\varphi_{МВКК}^0 = \frac{100 - \varphi_{фл}^0}{4,84}, \%$$

Пожежовибухобезпека гарантована при безпечній концентрації кисню:

$$\varphi_{без}^0 = 1,2\varphi_{МВКК}^0 - 4,2 \%,$$



## 3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ФЛЕГМАТИЗАЦІЇ

Два типа задач: 1. за відомим допустимим часом гасіння визначають необхідну витрату НГ; 2. за відомою витратою НГ визначають час гасіння пожежі.

*Загальна витрата вогнегасного засобу*  $G$  повинна бути мінімальною, *час подачі*  $\tau$  - не більш допустимого, а *інтенсивність подачі*  $I$  - оптимальною.

Для створення  $\varphi_{фл}^0$  при відсутності втрат необхідні:

$$\text{Об'єм НГ: } V_{НГ} = \frac{V_{\text{прим}} \varphi_{\text{вогн}}^0}{100}; \text{ м}^3$$

*Загальна кількість* НГ для припинення горіння:

$$m_{НГ} = V_{НГ} \rho_{НГ} = \frac{V_{\text{прим}} \varphi_{\text{вогн}}^0 \rho_{НГ}}{100}; \text{ кг}$$

При газообміні через наявні отвори необхідна додаткова кількість НГ, яка компенсує втрати НГ:

$$\Delta g_{НГ} = g_{НГ}^{\text{под.}} - g_{НГ}^{\text{вит}} = g_{НГ}^{\text{под.}} - g_{\text{сум}}^{\text{вит}} \varphi_{НГ}(\tau_i)$$

$$\Delta g_{НГ} = g_{НГ}^{\text{под.}} [1 - \varphi_{\text{вогн}}(\tau_i)]$$

Подача  $\Delta g_{НГ}$  підвищує концентрацію НГ в приміщенні до  $\varphi_{фл}$ .

## 4. ЗАПОБІГАННЯ ПОЖЕЖ МЕТОДОМ ІНГІБІРУВАННЯ

*Інгібування запобігає горінню речовин по розгалужено-ланцюговому механізму, через утворення проміжних активних радикалів АЦП. Так горять вуглеводні. Метали горять шляхом прямого окиснення, тому інгібування не впливає на їх горіння. Інгібуючі засоби містять галогени та лужні метали: наприклад хладони, порошки, аерозолеутворюючі склади, а також для зниження горючості ТГМ їх просочують антипіренами.*

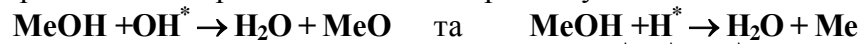
Радикали інгібітору  $R^*$  спричиняють загибель АЦП, тобто збільшують **Еакт** процесу горіння. Але існують і зворотні реакції. Розгалуження реакції:  $R^* + B \rightarrow x^* + y^*$

Загибель АЦП:  $R^* + \text{стінка} \rightarrow \text{обрив ланцюга}$ ;  $R^* + B + \text{тв. частка} \rightarrow AB + \text{тв. частка}$   
 $R^* + In \rightarrow \text{обрив ланцюга}$

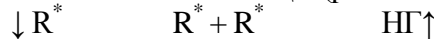
Існує концентрація інгібітора, яка робить горючу суміш негорючою.

**Гомогенне інгібування** - це взаємодія газоподібних молекул або радикалів з АЦП. Атоми лужного металу у складі порошку утворюють гидроперекис:  $Me + OH^* \rightarrow MeOH$

який видаляє із зони реакції активні радикали водню і гідроксилу:



**Гетерогенне інгібування** - це взаємодія АЦП (радикалів  $H^*$ ,  $O^*$ ,  $OH^*$ ) з поверхнею частки порошку по механізму:



**адсорбція - рекомбінація - десорбція.** Активний радикал реагує на поверхні частки порошку з іншим радикалом і утворенням нейтральної молекули. Це приводить до різького зменшення тепловиділення внаслідок миттєвої загибелі великої кількості АЦП. Для гасіння необхідно, щоб загибель більшої частини АЦП відбулось одночасно по всьому об'єму полум'я.

**Вогнегасні порошки** це тонко подрібнені мінеральні солі. **Порошки загального призначення** подають у вигляді аерозолі. **Порошки спеціального призначення** на поверхню металів та осередків тління, де вони плавляться.

АУС це вогнегасний порошок високої дисперсності, який отримують шляхом спалювання твердопаливної піротехнічної композиції, що містить солі і окисли лужних і лужноземельних металів. Димові гази при цьому містять інгібітор.

#### **ЗАВДАННЯ НА САМОПІДГОТОВКУ:**

1. Підготуватися до виконання лабораторної роботи

Я.С. Повзик, П.П. Ключ, А.М. Матвейкин. Пожежна тактика. С. 16-24; 28-30.

И.М. Абдурагимов, В.Ю. Говоров, В.Е. Макаров. Фізико-хімічні основи розвитку і гасіння пожеж. С. 149-152; 199-208; 158-172.