

РОЗДІЛ III РОЗВИТОК ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ

Лекція

ЗАГАЛЬНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ГОРІННЯ ГАЗОПОВІТРЯНИХ СИСТЕМ.

План лекції

1. Загальні закономірності горіння газових сумішей.
2. Закономірності поширення горіння в газових сумішах
 - 2.1. Структура дефлаграційного фронту полум'я.
 - 2.2. Поширення дефлаграційного горіння.
 - 2.3. Перехід дефлаграції в детонацію.

1. Загальні закономірності горіння газів

- Горіння газів завжди є гомогенним.
- Горіння газів може виникнути внаслідок самоспалахування або вимушеного запалювання.
- Горіння виникає, якщо концентрація ГР в суміші з окисником перевищує НКМПП ϕ_n .
- Залежно від газодинамічного режиму натікання газів в зону горіння, горіння може бути ламінарним або турбулентним.
- Залежно від способу сумішоутворення, горіння газів може бути кінетичним (якщо $\phi_{гг}$ лежить в межах від ϕ_n до ϕ_v) або дифузійним (якщо $\phi_{гг}$ більше ϕ_v).
- Залежно від механізму поширення горіння газів може бути дефлаграційним або детонаційним.

Залежно від об'єму горючої суміші може виділятися різна кількість енергії, що зумовлює різний тиск продуктів згоряння. Залежно від тиску продуктів згоряння розрізняють *види кінетичного горіння*:

- **Спалах** — швидке згоряння газової суміші, яке відбувається в відкритому просторі й не супроводжується збільшенням тиску продуктів згоряння.
- **Хлопок** — швидке згоряння газової суміші, яке відбувається в закритому просторі, супроводжується незначним підвищенням тиску, яке викликає лише звукові ефекти, але руйнування конструкцій при цьому не відбувається.
- **Вибух** — швидке згоряння газової суміші, яке супроводжується різким виділенням значної кількості енергії і утворенням стислих газів, здатних виконувати роботу.

ВИЗНАЧЕННЯ ТИСКУ ПРОДУКТІВ ВИБУХУ

Горіння під час вибуху відбувається дуже швидко, і гази, які утворюються, не встигають розширитися, отже вважають $V_{\text{гс}} = V_{\text{виб}}$.

$$P_{\text{гс}} V_{\text{гс}} = n_{\text{гс}} R T_{\text{гс}}$$

$$P_{\text{виб}} V_{\text{виб}} = n_{\text{пг}} R T_{\text{виб}}$$

де $T_{\text{гс}}$, $P_{\text{гс}}$, $V_{\text{гс}}$ - температура, тиск і об'єм початкової ГС,
 $T_{\text{виб}}$, $P_{\text{виб}}$, $V_{\text{виб}}$ - температура, тиск і об'єм ПГ,
 $n_{\text{гс}}$ - число молів початкової горючої суміші,
 $n_{\text{пг}}$ - число молів продуктів горіння,
 R - універсальна газова стала.

$$P_{\text{виб}} = P_{\text{гс}} \frac{n_{\text{пг}} T_{\text{виб}}}{n_{\text{гс}} T_{\text{гс}}}$$

Визначення температури продуктів вибуху

Перший закон термодинаміки:

$$H = U + PV; \quad U = H - PV; \quad PV = nRT.$$

Внутрішня енергія продуктів горіння за певної температури T дорівнює:

$$U^T = \sum (H_{\text{пг } i}^T \cdot n_{\text{пг } i}) - RT \sum n_{\text{пг } i},$$

Енергія вибуху — це зміна внутрішньої енергії системи між кінцевим і початковим станом.

$$Q_{\text{виб.}} = |U_{\text{пг}} - U_{\text{гс}}|$$
$$Q_{\text{виб.}} = Q_{\text{н}} + RT_{\text{гс}} (\sum n_{\text{пг } i} - n_{\text{гс}})$$

Температуру вибуху розраховують за формулою:

$$T_{\text{виб}} = T_1 + \frac{(T_2 - T_1) \cdot (Q_{\text{виб}} - Q_{\text{пг}}^{T_1})}{(Q_{\text{пг}}^{T_2} - Q_{\text{пг}}^{T_1})}$$

Фактори, що впливають на тиск при вибуху

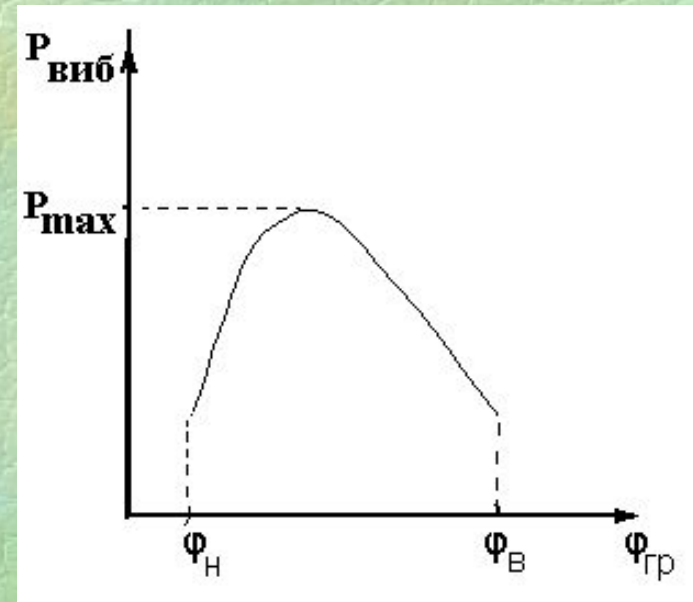
1) вид горючої речовини

$$Q_n \uparrow \quad T_{\text{гор}} \uparrow \quad P_{\text{виб}} \uparrow$$

2) склад горючої суміші;

$$\begin{array}{ccc} \varphi_{\text{O}_2} \uparrow & T_{\text{гор}} \uparrow & P_{\text{виб}} \uparrow \\ \varphi_{\text{нг}} \uparrow & T_{\text{гор}} \downarrow & P_{\text{виб}} \downarrow \end{array}$$

$$\varphi_{\text{гр}} = \varphi_{\text{стм}} \quad T_{\text{гор}} = \max \quad P_{\text{виб}} = \max$$



3) умови, в яких знаходиться горюча суміш

$$\begin{array}{ccc} T_0 \uparrow & q(-) \downarrow & T_{\text{гор}} \uparrow & P_{\text{виб}} \uparrow \\ P_0 \uparrow & q(+) \uparrow & T_{\text{гор}} \uparrow & P_{\text{виб}} \uparrow \end{array}$$

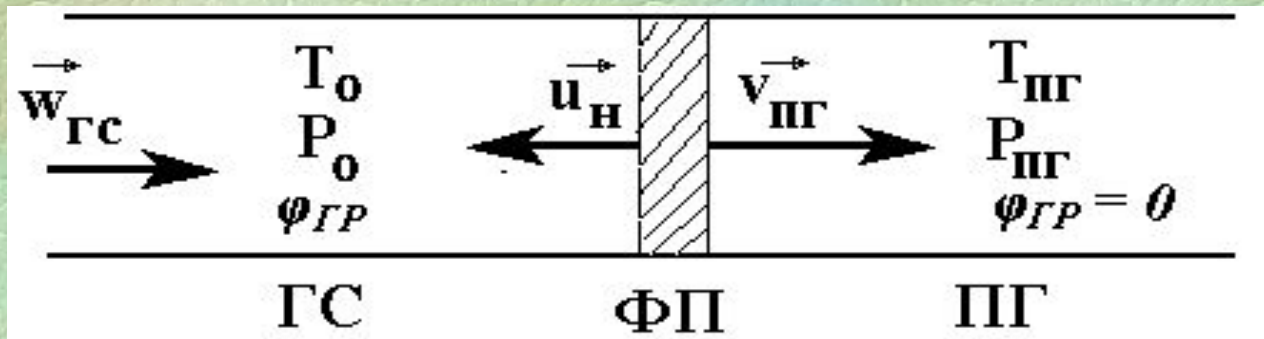
2. ЗАКОНОМІРНОСТІ ПОШИРЕННЯ ГОРІННЯ В ГАЗОВИХ СУМІШАХ

Дефлаграційне горіння обумовлено передачею тепла, що виділилося в зоні горіння при хімічній реакції, теплопровідністю в сусідні шари газу, який ще не прореагував. При цьому відбувається нагрів газу до критичної температури та ініціювання швидкої хімічної реакції.

Детонаційне горіння обумовлено швидким стисненням горючої речовини в ударній хвилі. Різке підвищення тиску в ударній хвилі забезпечує необхідне нагрівання речовини для того, щоб реакція окислення пішла зі значною швидкістю.

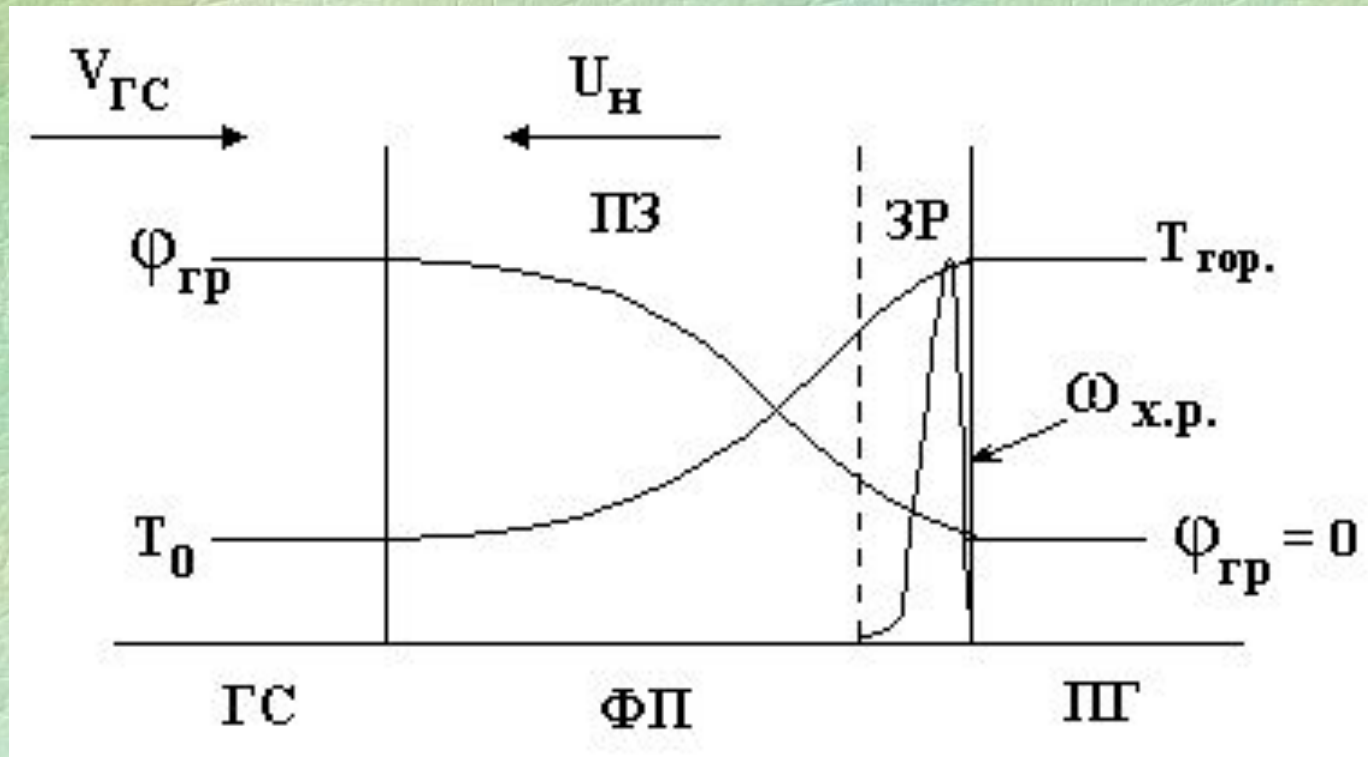
2.1. Структура дефлаграційного фронту полум'я

Фронт полум'я - об'єм системи, в якому відбуваються підготовчі процеси та протікає хімічна реакція взаємодії ГР з окисником, утворюються продукти горіння, виділяється теплота згоряння і температура підвищується від початкової до температури горіння.



Нормальна швидкість поширення горіння u_n - швидкість, з якою рухається фронт полум'я відносно нерухомого газового середовища по нормалі до поверхні фронту полум'я.

Всередині ФП відбувається прогрівання горючої суміші та протікає хімічна реакція окислення, яка супроводжується виділенням тепла. Хімічна реакція усередині ФП протікає нерівномірно через різку залежність швидкості реакції від температури. ФП умовно поділяють на *підготовчу зону (ПЗ)* і *зону реакції (ЗР)*.



У підготовчій зоні відбувається найбільша зміна температури внаслідок передачі тепла із зони реакції теплопровідністю, відбувається підігрівання газу до критичної температури. Концентрація ГР зменшується за рахунок дифузії речовини в зону реакції. Швидкість реакції окислення невелика.

У зоні реакції протікає реакція горіння, виділяється основна частка енергії, яка передається в підготовчу зону. Температура збільшується до $T_{гор}$. Концентрація ГР зменшується за рахунок протікання реакції. Швидкість реакції окислення велика.

Товщина фронту полум'я дорівнює сумі товщини підготовчої зони і зони реакції.

$$\delta_{\text{ф.п}} = \delta_{\text{пз}} + \delta_{\text{зр}} \quad \delta_{\text{ф.п}} \sim a_t / u_n$$

Енергетичний баланс у фронті полум'я:

$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} - c_p \rho u_n \frac{dT}{dx} + Q_n w_{xp} = 0$$

$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2}$$

- віддача тепла теплопровідністю

$$c_p \rho u_n \frac{dT}{dx}$$

- передача тепла конвекцією

$$Q_n w_{xp}$$

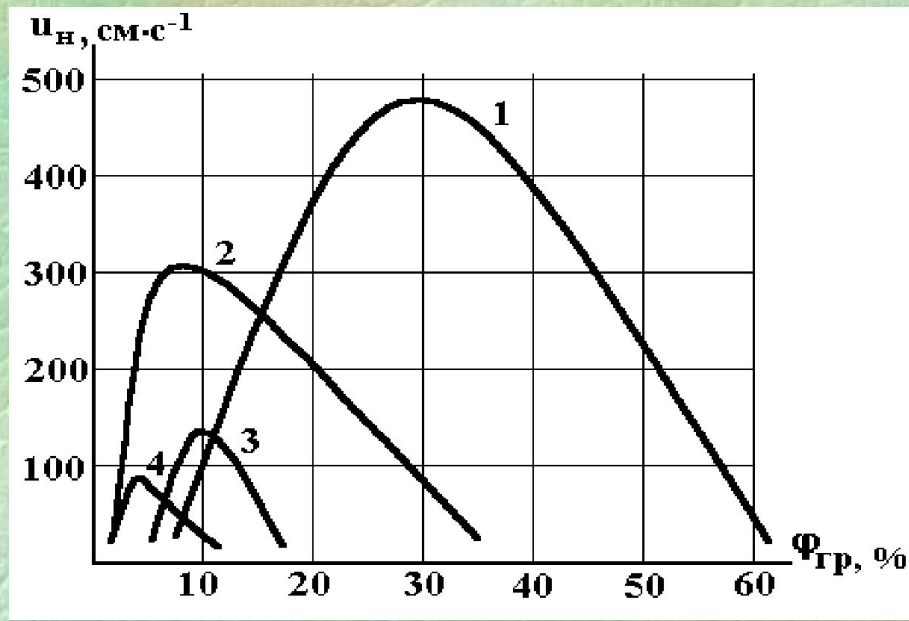
- тепловиділення хімічної реакції

$$u_n = \frac{\sqrt{2Q_n w_{xp} \lambda R T_{\Gamma}^2 / E_{\text{акт}}}}{c_p \rho (T_{\Gamma} - T_o)}$$

u_n залежить від:

- 1) виду горючої речовини;
- 2) складу горючої суміші;
- 3) умов, в яких знаходиться горюча суміш

При збільшенні *молекулярної маси* вуглеводнів концентраційні межі кривих швидкостей звужуються, а максимальна швидкість поширення полум'я знижується.



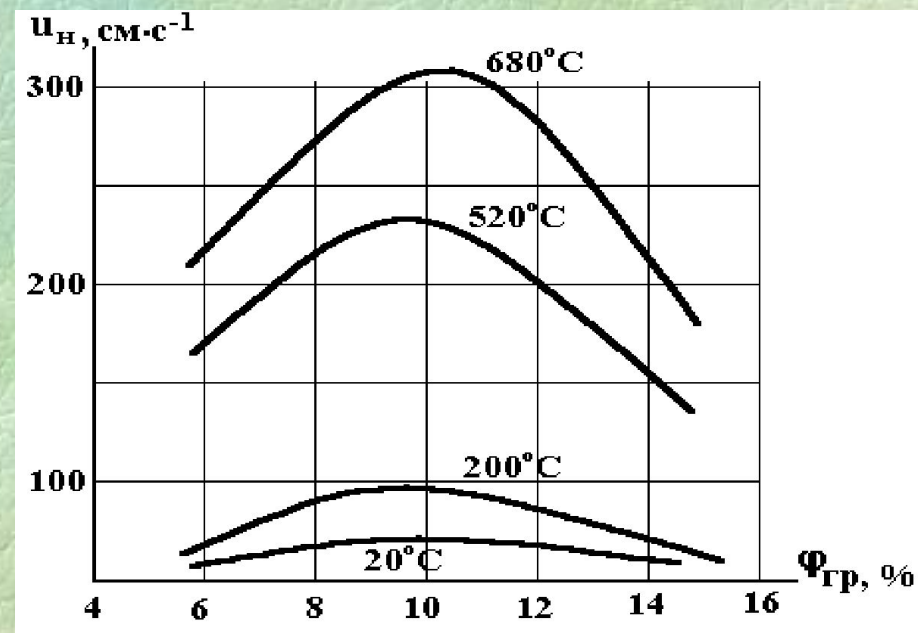
$$\mu \uparrow \quad \rho \uparrow, \lambda \downarrow \Rightarrow u_n \downarrow$$

тен,
І,
Н.

Значення u_n залежить тільки від *концентрації компонента, що знаходиться в нестачі*. В міру наближення складу суміші до граничного складу, u_n ніколи не досягає нульових значень.

$$\begin{array}{ll} \varphi_{O_2} \uparrow u_n \uparrow & \varphi_{нг} \uparrow u_n \downarrow \\ \varphi_{гр} = \varphi_{стм} & u_n = \max \end{array}$$

Значення u_n збільшується при підвищенні *початкової температури* вихідної горючої суміші.



2.2. Поширення дефлаграційного горіння

ФП може бути нерухомим (стаціонарне полум'я) або рухомим (нестаціонарне полум'я).

Стаціонарне полум'я встановлюється за умови, що швидкість руху горючої суміші дорівнює швидкості зустрічного переміщення ФП.

$$\vec{V}_{\text{фп}} = -\vec{w}_{\text{гс}}$$

Нестаціонарне полум'я виникає при горінні в нерухомій ГС або у випадку, коли швидкість руху горючого газу відрізняється від швидкості поширення горіння.

$V_{\text{фп}} > w_{\text{гс}}$ – проскок полум'я

$w_{\text{гс}} \gg V_{\text{фп}}$ – зрив полум'я

На швидкість поширення фронту полум'я $v_{\text{фп}}$ впливають:

- швидкість руху потоку горючої суміші $w_{\text{гс}}$,
- нормальна швидкість поширення горіння, яка характерна для даної горючої речовини $u_{\text{н}}$.

$$\vec{v}_{\text{фп}} = \vec{u}_{\text{н}} + \vec{w}_{\text{гс}}$$

Розширення гарячих ПГ, що утворилися, зумовлює додаткове зміщення поверхні горіння, тому $v_{\text{фп}}$ буде більшою, ніж нормальна швидкість горіння:

$$v_{\text{фп}} = u_{\text{н}} \varepsilon,$$

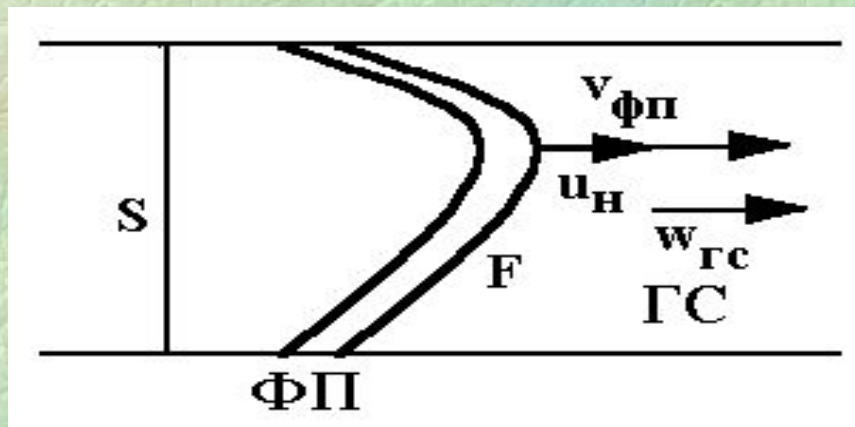
де ε – коефіцієнт розширення, рівний $T_{\text{гор}}/T_{\text{о}}$.

При викривленні ФП і збільшенні його поверхні збільшується об'єм газу, який згоряє. При цьому збільшується кількість тепла, що виділяється при горінні і передається у вихідну холодну суміш, отже $v_{\text{фп}}$ зростає.

$$v_{\text{фп}} = u_{\text{н}} F/S,$$

де F – поверхня фронту полум'я,

S – площа поперечного перетину потоку.



При турбулізації газового потоку поверхня фронту полум'я зростає, отже швидкість поширення горіння збільшується.

2.3. Перехід дефлаграції в детонацію

Детонація може виникнути у вибуховому середовищі у разі його попереднього стиснення досить сильною ударною хвилею, яка утворюється внаслідок горіння вибухових речовин або за певних газодинамічних умов внаслідок прискорення дефлаграційного фронту полум'я.

Детонація – це вибух стиснутої горючої суміші.

Ударне стиснення сильно нагріває газ (близько 1500-1700 К) і вибухове середовище, нагріте сильною ударною хвилею, самоспалахує. При цьому температура ПГ досягає 4000 – 6000°C, а період індукції скорочується до 10^{-5} - 10^{-7} с.

При поширенні дефлаграційного ФП в кінетичній суміші, яка знаходиться в довгих трубах, відбувається *витягування ФП*.

Зі збільшенням площі ФП збільшується тепловиділення і швидкість поширення $v_{\text{фп}}$.

Газоподібні продукти горіння збільшуються в об'ємі і починають грати роль поршня: надлишковим тиском виштовхують холодну горючу суміш. Перед фронтом полум'я відбувається *стиснення початкової газової суміші* (підвищення тиску).

Утворюється *хвиля стиснення*.

Виникає *турбулізація газового потоку*, що, в свою чергу, знову збільшує поверхню зони горіння, а отже тепловиділення і швидкість поширення фронту полум'я.

Нова хвиля стиснення поширюється по вже стиснутому і нагрітому попередньою хвилею газу з більшою швидкістю. На певній відстані більш швидка хвиля стиснення наздожене першу, вони зіллються, їхні амплітуди складуться, у результаті виникне нова більш потужна *ударна хвиля*, яка призводить до появи *детонаційного горіння*.

Потрібне для виникнення детонації прискорення горіння відбувається після проходження полум'ям певного шляху, тобто необхідний відповідний *переддетонаційний розгін* від точки запалювання.

Чим сильніший початковий тиск, нормальна швидкість горіння тим коротше

Завдання на самопідготовку:

- 1. Проробити літературу:
Демидов, Шандиба, Щеглов- стор. 85-104,
Демидов, Саушев- стор. 152-181
- 2. Підготуватися до практичного заняття і лабораторної роботи.