

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**  
з дисципліни  
**«Паливо та основи теорії горіння»**

для студентів спеціальності 144  
«Теплоенергетика»  
(освітня програма «Промислова і комунальна теплоенергетика»)  
усіх форм навчання  
Частина 2

2023

Конспект лекцій з дисципліни «Паливо та основи теорії горіння» для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» (освітня програма «Промислова і комунальна теплоенергетика») усіх форм навчання. Частина 2/ Укл.: Чепрасов О.І., Кузьменко А.А., Назаренко І.А., Каюков Ю.М. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2023. 66 с.

Укладачі: Чепрасов О.І., доц. канд. техн. наук;  
Кузьменко А.А., ст. викладач;  
Назаренко І.А., доц. канд. техн. наук;  
Каюков Ю.М., доц. канд. техн. наук.

Рецензент Назаренко О.М., доц. канд. техн. наук.

Відповідальний за випуск Лапкіна С.О., асист.

Затверджено  
на засіданні кафедри  
«Електричні машини»  
Протокол №  
від 16.02.2023 р.

Рекомендовано до видання  
НМК Електротехнічного факультету  
Протокол № 6  
від 23.02.2023 р.

## ЗМІСТ

Вступ.....	83
Лекція 10. Кінетика хімічних реакцій горіння.....	84
10.1 Закон діючих мас.....	85
10.2 Хімічна рівновага реакцій горіння, принцип Ле-Шательє-Брауна.....	87
10.3 Закон Гесса.....	89
10.4 Закон Кірхгофа.....	90
Лекція 11. Кінетика ланцюгових реакцій.....	91
11.1 Теорія ланцюгових реакцій.....	91
11.2 Горіння водню.....	92
11.3 Горіння оксиду вуглецю.....	95
11.4 Горіння метану.....	96
12. Займання газоповітряних сумішей.....	98
12.1 Самозаймання.....	98
12.2 Вимушене запалення.....	100
12.3 Межі вибуховості газів.....	101
12.4 Межі вибуховості суміші газів.....	103
Лекція 13. Поширення полум'я.....	104
13.1 Нормальне поширення полум'я.....	104
13.2 Визначення нормальної швидкості поширення полум'я методом Гюї-Міхельсона.....	106
13.3 Метод визначення нормальної швидкості поширення полум'я в трубах.....	109
13.4 Поширення полум'я в турбулентному потоці.....	109
13.5 Стійкість полум'я в ламінарному потоці.....	111
Лекція 14. Методи спалювання газу.....	115
14.1 Процес спалювання газу.....	115
14.2 Класифікація пальників.....	117
14.3 Пальники з незавершеним повним попереднім змішанням газу з повітрям.....	120
Лекція 15. Спалювання рідкого палива.....	126
15.1 Особливості горіння рідкого палива.....	126
15.2 Механізм горіння рідкої краплі.....	127
15.3 Форсунки для розпилювання мазуту.....	127
15.4 Особливості спалювання мазуту з ванадієвими і сірчистими домішками.....	131

Лекція 16. Горіння твердого палива.....	132
16.1 Схема горіння вуглецю.....	132
Лекція 17. Схеми організації топкового процесу.....	137
17.1 Основні схеми організації топкового процесу.....	137
17.2 Аналіз шарового процесу горіння.....	137
17.3 Аналіз процесу горіння в киплячому шарі.....	139
17.4 Аналіз циклонного процесу горіння.....	140
17.5 Аналіз факельного процесу горіння.....	141
Перелік посилань.....	143

## ВСТУП

В навчальній літературі відома велика кількість підручників по курсу «Паливо та основи теорії горіння». У зв'язку з цим виникають певні труднощі при рекомендації підручників, а тим більше складнощі самостійної підготовки студентів, оскільки в підручниках не однаково пропрацьовано і викладено аспекти використання палива, особливо, що стосується специфічних особливостей професії. Це пояснюється багатогранністю цих процесів в задоволенні насущних питань технологій в галузях промисловостей.

Проте, як відомо, дисципліна «Паливо та основи теорії горіння» є теоретичною основою теплоенергетики, тому вибірки з підручників, найбільш наближені до спеціальності «Теплоенергетика» представляються доцільними, з погляду допомоги студентам - теплоенергетикам в оволодінні теоретичними основами своєї професії.

Метою написання конспекту лекцій є систематизація і цілеспрямованість самостійної роботи студентів, поглиблення теоретичних знань по дисципліні, яка є однією з основоположних в підготовці фахівців з теплоенергетики.

Матеріал, що запропоновано в конспекті курсу лекцій з дисципліни «Паливо та основи теорії горіння», відповідає учбовим планам Міністерства освіти і науки України по підготовці фахівців даного профілю.

В конспекті лекцій з курсу «Паливо та основи теорії горіння» увесь текстовий матеріал, рівняння, формули, висновки і визначення повністю взяті з підручників по курсу «Паливо та основи теорії горіння», представлених у списку використаної літератури, і не є авторськими.

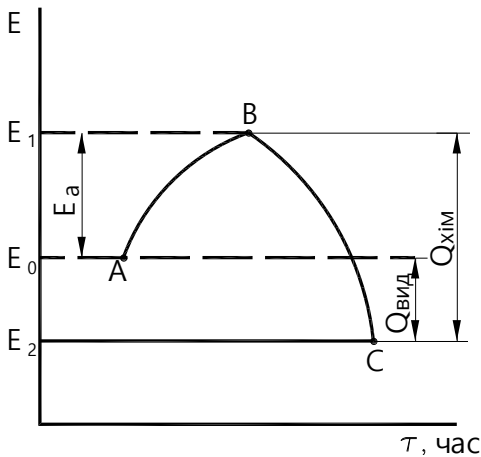
## ЛЕКЦІЯ 10. КІНЕТИКА ХІМІЧНИХ РЕАКЦІЙ ГОРІННЯ

### 10.1 Закон діючих мас

Розглянуті раніше стехеометричні рівняння горіння є спрощеним виглядом процесів горіння. Насправді, горіння - це складний фізико-хімічний процес, для здійснення якого необхідне здійснення двох етапів:

- **фізичний етап** - це створення молекулярного контакту між паливом і окислювачем;

- **хімічний етап** - це здійснення хімічної взаємодії молекул з утворенням продуктів реакції (або продуктів горіння).



$Q_{\text{хим}} > E_a$  - екзотермічна

Рисунок 10.1 - Графік екзотермічної реакції

Хімічна взаємодія між молекулами пального і окислювача може настати в тому випадку, якщо молекули знаходяться в особливому збудженому енергетичному або кінетичному стані і володіють деяким запасом енергії, достатньої для руйнування існуючих внутрішньомолекулярних зв'язків атомів. Отже, реакція можлива, якщо внутрішньомолекулярні зв'язки атомів розірвані. На розрив

зв'язку потрібна додаткова енергія. Додаткова кількість енергії, яку необхідно витратити для підвищення енергетичного рівня молекул, при якому можлива хімічна реакція, називається **енергією активації**  $E_a$ , Дж/моль.

Після розриву старих зв'язків відбувається утворення нових з виділенням енергії. Якщо енергія, що виділилася, більше витраченої, тоді тепловий ефект позитивний і реакція **екзотермічна**, якщо енергія, що виділилася, менше витраченої, то реакція протікає з поглинанням теплоти і називається **ендотермічною**

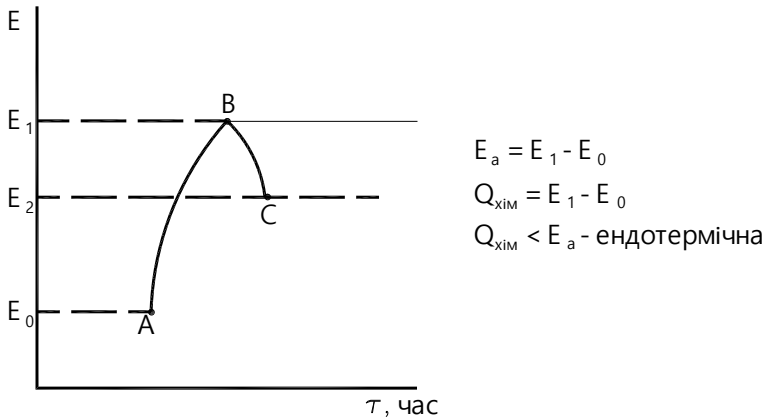
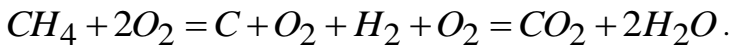


Рисунок 10.2 - Графік ендотермічної реакції

В процесах горіння реакції, що протікають, супроводжуються спадом внутрішньої хімічної енергії реагуючих тіл. В реакціях горіння палив тепловий ефект реакції називають **теплотою згорання палива** або його теплотворною здатністю. Величина теплового ефекту хімічної реакції залежить від параметрів стану: температури, тиску і об'єму

$$Q_V = Q_P + l,$$

де  $Q_V$  - тепловий ефект хімічної реакції при  $V = \text{const}$ ;

$Q_P$  - тепловий ефект хімічної реакції при  $P = \text{const}$ ;

$l$  - зовнішня робота.

Хімічні реакції взаємодії речовин підкорюються закону діючих мас, тобто *при постійній температурі швидкість реакції в гомогенній системі пропорційна добутку концентрацій реагуючих речовин*

$$W = K C_A^m \cdot C_B^n,$$

де  $C_A$  і  $C_B$  - концентрації реагуючих речовин;

$m$  і  $n$  - число молей реагуючих речовин;

$K$  - константа швидкості реакції, яка згідно закону Арреніуса

$$K = K_0 e^{-\frac{E}{RT}},$$

де  $K_0$  - передекспоненціальний множник;

$E$  - енергія активації;

$e$  - основа натурального логарифма;

$R$  - універсальна газова стала  $R=8314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot ^\circ\text{C}}$ ;

$T$  - температура реагуючих речовин.

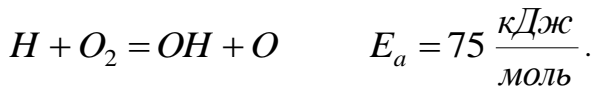
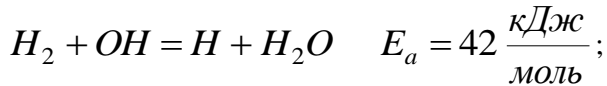
Реакції, які зустрічаються в топкових процесах, протікають при температурах до точки перегину наступного графіка

Тому швидкості реакцій різко зростають із збільшенням температури.



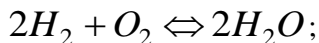
Рисунок 10.3 – Реакції в топкових процесах

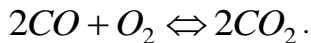
Зразкові величини енергій активації наступні:



## 10.2 Хімічна рівновага реакцій горіння, принцип Ле-Шательє-Брауна

Хімічні реакції йдуть в протилежні сторони - одночасно з утворенням продуктів реакції відбувається їх розпад з утворенням вихідних речовин





Якщо компоненти реагуючих речовин довгий час знаходяться в контакті, то настає динамічна рівновага, і швидкості прямої і зворотної реакцій рівні  $W_1 = W_2$ ,

де

$$W_1 = K_1 C_{A_1}^{m_{A_1}} \cdot C_{A_2}^{n_{A_2}}; \quad W_2 = K_2 C_{B_1}^{m_{B_1}} \cdot C_{B_2}^{n_{B_2}}; \quad ;$$

$$K = \frac{K_1}{K_2} = \frac{C_{B_1}^{m_{B_1}} \cdot C_{B_2}^{n_{B_2}}}{C_{A_1}^{m_{A_1}} \cdot C_{A_2}^{n_{A_2}}},$$

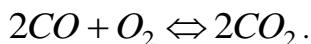
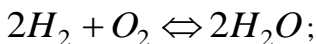
де  $K$  - константа рівноваги.

Залежно від температури і тиску, реакція може бути зрушена у бік продуктів реакції або у бік вихідних речовин. Спостереження за хімічними реакціями привели до висновку, що отримав назву принципу Ле-Шательє-Брауна:

*При зміні зовнішніх умов рівновага в різного роду процесах, у тому числі і рівновага в хімічних реакціях, зміщується так, щоб протидіяти зовнішнім умовам.*

Це означає, що при реакціях горіння з підвищенням температури реакція зміщується у бік вихідних речовин і тепловиділення зменшується. При пониженні температури реакція зміщується у бік продуктів реакції з виділенням максимальної кількості теплоти.

Тиск на положенні реакції позначається тоді, коли реакція протікає із зміною об'єму газів, тобто при зменшенні тиску рівновага зміщується у бік збільшення об'єму, при збільшенні тиску - у бік зменшення об'єму.



Із зростанням тиску повнота реакції водню і кисню збільшується, а із зменшенням тиску - збільшується розпад молекул  $H_2O$ .

### 10.3 Закон Гесса

У 1840 році академік Гесс Г.І. сформулював закон збереження енергії стосовно хімічних реакцій: *величина теплового ефекту хімічної реакції не залежить від проміжних її станів і визначається лише початковими і кінцевими станами вихідних і кінцевих речовин.*

Цей закон має практичне значення, оскільки дає можливість обчислити тепловий ефект реакцій, практичне здійснення яких утруднено.

Так, наприклад, здійснити окремо реакцію отримання  $CO$  при горінні вуглецю важко, оскільки при цьому виходить і  $CO_2$ , а спалити  $CO$  в практичних умовах труднощів не представляє.

При горінні вуглецю

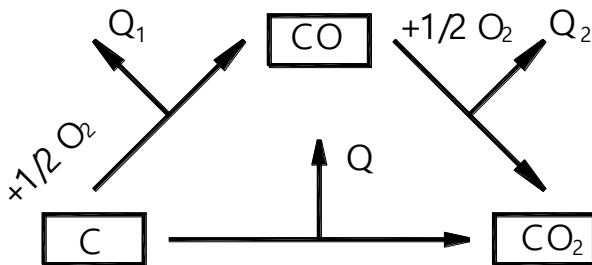
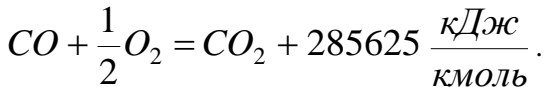
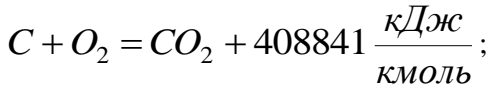


Рисунок 10.4 – Схема горіння вуглецю

$$Q = Q_1 + Q_2 \Rightarrow Q_1 = Q - Q_2 = 408841 - 285625 = 123218 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}} .$$

Таким чином, ми бачимо, що теплота згоряння вуглецю до  $CO$  при  $V = const = 123218 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}} .$

#### 10.4 Закон Кірхгофа

Величина теплового ефекту хімічної реакції залежить від температури, при якій протікає хімічна реакція або здійснюється процес горіння. Залежність теплового ефекту реакції від температури встановлюється законом Кірхгофа, згідно якого, *тепловий ефект реакції визначається різницею теплоємностей вихідних і кінцевих продуктів реакції або горіння*

$$\frac{dQ}{dT} = C_1 - C_2 ,$$

де  $\frac{dQ}{dT}$  - температурний коефіцієнт теплоти реакції;

$C_1$  - сумарна дійсна молярна теплоємність продуктів, що вступають в реакцію;

$C_2$  - сумарна дійсна молярна теплоємність продуктів реакції.

## ЛЕКЦІЯ 11. КІНЕТИКА ЛАНЦЮГОВИХ РЕАКЦІЙ

### 11.1 Теорія ланцюгових реакцій

Розглянуті питання кінетики реакцій горіння складають основи класичної кінетики, що базується на законі діючих мас і законі Арреніуса. Механізм реакцій представляється чисто молекулярним і описується стехеометричними співвідношеннями.

Проте, при горінні деяких газів вони не цілком точно описують процес горіння і експериментально доказано, що швидкість їх горіння не підкоряється законам класичної кінетики.

Пояснити хід таких реакцій стало можливим на підставі теорії ланцюгових реакцій. Теорія ланцюгових реакцій розглядає дійсний процес перебігу реакцій, а стехеометричні рівняння вважаються лише підсумковою рівністю матеріального балансу.

*По ланцюговій теорії механізм реакції представляється як ланцюг послідовних ланок, а кожна ланка складається з сукупності елементарних реакцій між атомами, радикалами і молекулами. Ланцюг починається з активного центру, який в кінці кожної ланки регенерується; початком кожної ланки служить активний центр.*

Активними центрами можуть бути атомарні  $H$ ,  $O$ , група  $OH$ . Якщо в кінці кожної ланки регенерується (утворюється) лише один активний центр, реакція називається **нерозгалуженим** ланцюгом.

Якщо кожна ланка породжує декілька активних центрів, реакція є **розгалуженим** ланцюгом.

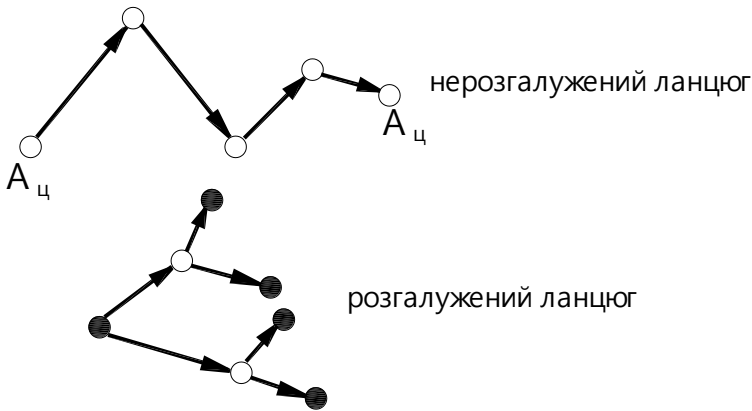
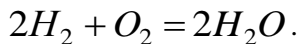


Рисунок 11.1 – Схема ланцюгових реакцій

Первинне виникнення активних центрів може бути в результаті теплового руху реагуючих молекул і їх взаємних зіткнень. Інтенсивність перебігу ланцюгової реакції визначається також концентрацією реагуючих речовин, зовнішніми режимними умовами і наявністю каталізаторів. Прикладом нерозгалуженої ланцюгової реакції є реакція утворення хлористого водню. Більшість горючих газів окислюються за схемами розгалуженої ланцюгової реакції.

## 11.2 Горіння водню



Горіння  $H_2$  є розгалуженою ланцюговою реакцією. Хід її представляється наступним чином. Початок ланцюга реакції представляє дисоціацію водню з утворенням двох активних центрів, тобто здійснюється первинна активація водню





Таким чином, ланка реакції горіння водню складається з трьох елементарних реакцій:

1.  $H + O_2 = OH + O$  . Має велику енергію активації-

$$E_a = 18000 \frac{\text{ккал}}{\text{кмоль}} \times 4,19 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}} \quad \text{і тому протікає}$$

повільно.

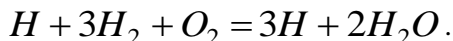
2.  $O + H_2 = OH + H$  .  $E_a = 6000 \frac{\text{ккал}}{\text{кмоль}} \times 4,19$

$\frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$  . Реакція швидка.

3.  $OH + H_2 = H_2O + H$  . Протікає двічі.

$E_a = 10000 \frac{\text{ккал}}{\text{кмоль}}$  . Реакція швидка.

Оскільки перша реакція найповільніша, то вона визначає швидкість перебігу ланцюгового процесу. Підсумкове рівняння



З моменту виникнення реакції, концентрація атомарного водню безперервно збільшується. і після закінчення деякого часу може досягнути величини, при якій швидкість реакції стає помітною. Цей період накопичення називається **періодом індукції**, а графічне зображення швидкості реакції представляється таким чином.

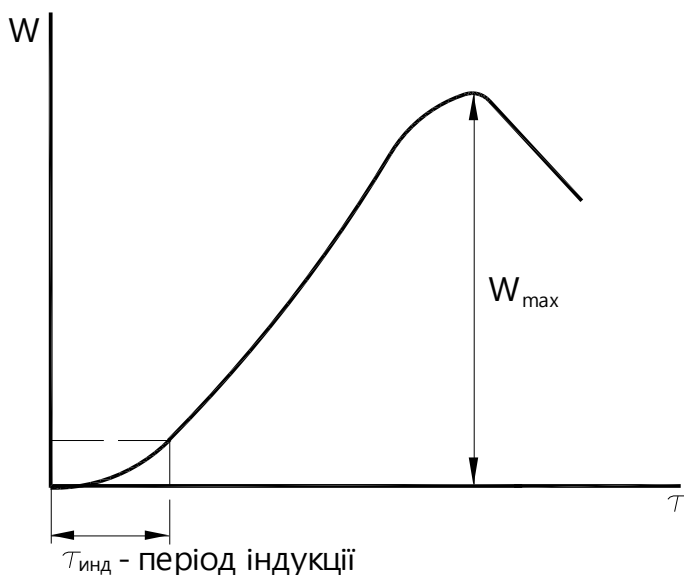
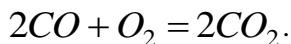


Рисунок 11.3 - Графічне зображення швидкості реакції

Спад швидкості реакції визначається зменшенням концентрації реагуючих речовин.

### 11.3 Горіння оксиду вуглецю

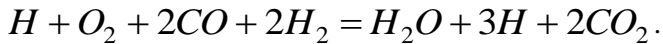
Стехеометричне рівняння горіння



Суха суміш оксиду вуглецю  $CO$  не реагує з киснем, якщо температура менша  $700^\circ C$ . Для активного горіння  $CO$  необхідна присутність невеликої кількості води або атомарного водню. Експериментальні дослідження показали, що в реакції горіння бере участь атомарний кисень і  $OH$ . Академіки Семенов М.М. і Зельдович Я.Б. запропонували наступний механізм горіння:

1.  $H + O_2 = OH + O$ ;
2.  $OH + CO = CO_2 + H$ ;  $O + CO = CO_2$ ;
3.  $OH + H_2 = OH + H$ ;  $OH + H_2 = H_2O + H$ .

Балансове (підсумкове) рівняння



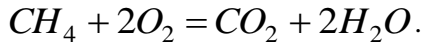
Швидкість горіння  $CO$

$$W = KC_{CO}C_{H_2O}.$$

Швидкість горіння пропорційна концентрації  $CO$  в зоні горіння і початковій концентрації водяної пари в суміші.

#### 11.4 Горіння метану

Стехеометричне рівняння горіння метану



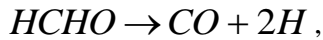
При горінні метану можливий наступний механізм процесу - при нагріванні  $CH_4$  до високої температури відбувається дисоціація метану з утворенням метильних радикалів і атомарного водню



Метильний радикал  $CH_3$ , взаємодіючи з киснем, утворює формальдегід

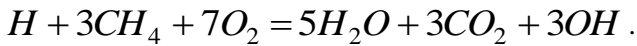


Формальдегід може розкладатися з утворенням оксиду вуглецю і атомарного водню



або згоряти з утворенням  $CO_2$  і водяної пари.

Підсумкова реакція



Введення в метаноповітряну суміш атомарного водню або гідроксилів обумовлює різке збільшення швидкості горіння. Так, при введенні атомарного водню, швидкість поширення полум'я збільшилася з 35  $см/с$  до 250  $см/с$ . При спалюванні метану в зоні горіння містяться активні частки. Це атомарні гази (гідроксил, метил та ін.). В холодній вихідній газоповітряній суміші ці частки відсутні. Проте роль їх дуже велика в початковій стадії процесу для забезпечення початку ланцюгової реакції і займання. Тому при створенні пристроїв газопальників прагнуть здійснити спалювання газу так, щоб підмішувати високотемпературні продукти горіння холодній газоповітряній суміші.

## 12. ЗАЙМАННЯ ГАЗОПОВІТРЯНИХ СУМІШЕЙ

### 12.1 Самозаймання

Аби газоповітряна суміш почала горіти, її необхідно запалити. Існують два способи займання газоповітряної суміші: самозаймання і вимушене запалення. При самозайманні вся суміш доводиться до такої температури, при якій вона сама займається.

Під самозайманням розуміється границя переходу стаціонарного перебігу реакції окислення горючої суміші в істотно нестаціонарне, коли швидкість реакції різко зростає, і суміш спалахує відразу по всьому об'єму.

Реакція носитиме стаціонарний характер у тому випадку, коли збільшення активних центрів буде супроводжуватися їх знищенням.

При окисленні горючих компонентів суміші відбувається виділення теплоти, яка визначається

$$Q_{\text{вид}} = WqV = K_0 e^{-\frac{E}{RT}} f(C)qV \text{ - крива}$$

де  $W$  - швидкість хімічної реакції;

$q$  - тепловий ефект реакції;

$V$  - об'єм судини;

$R$  - газова стала;

$E$  - енергія активації;

$T$  - температура;

$f(C)$  - функція концентрації пального.

$$Q_{\text{потерь}} = \alpha F_{\text{ст}} (T - T_0) = B(T - T_0) \text{ - пряма}$$

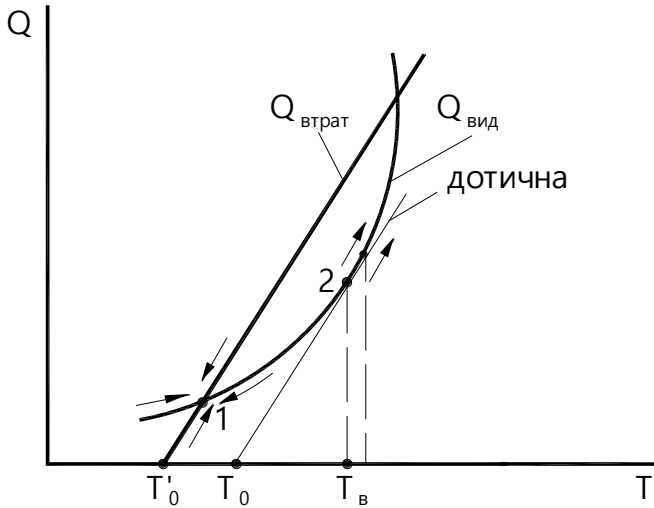


Рисунок 12.1 - Зміна тепловтрат і тепловиділення паливоповітряної суміші, що поміщена в замкнуту судину при його нагріві

При невеликій температурі  $T'_0$  лінія тепловтрат пересікає лінію тепловиділення в точці 1. Температура суміші  $T_0$ , при якій система здібна до самоприскорення реакції, називається **температурою самозаймання** суміші. Ця температура залежить від умов відведення теплоти, а, отже, не є фізико-хімічною константою суміші.

По тепловій теорії академіка Семенова М.М.

$$T_0 \cong T'_0 + \frac{RT'_0}{E}.$$

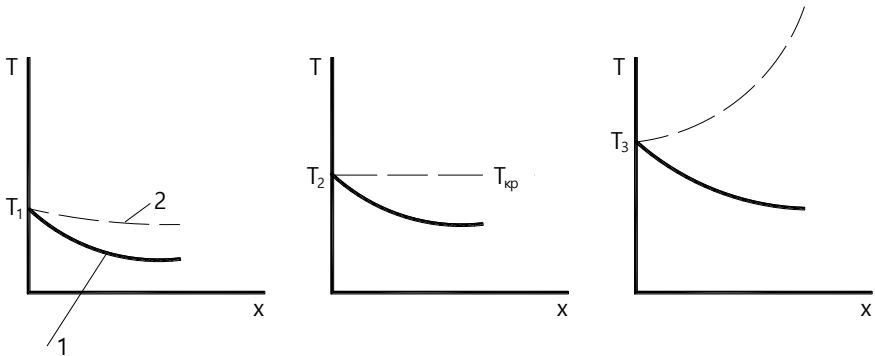
З формули виходить, що передвибуховий період визначається

$$T_g - T_0 = \frac{RT_0}{E}.$$

При великих енергіях активації  $E = 50000 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$  і  $T_0 = 1000^\circ\text{C}$  передвибуховий період  $T_g - T_0 = \Delta T \approx 40^\circ\text{C}$ . Тому, часто замість  $T_g$  користуються температурою стінки, при якій можливий вибух.

## 12.2 Вимушене запалення

Вимушене запалення характеризується тим, що холодна газоповітряна суміш підпалюється в одному місці стороннім джерелом теплоти і виникле полум'я поширюється в об'ємі, залучаючи все нові об'єми газоповітряної суміші. В техніці знайшли вживання обидва методи, але в газопальникових і топкових пристроях запалення здійснюється другим способом.



1 - холодна суміш; 2 - температура вище за рахунок активності суміші.  $T_{кр}$  - критична температура суміші.

Рисунок 12.2 - Фізична картина займання газоповітряної суміші

Фізична картина займання газоповітряної суміші другим способом може бути представлена наступним чином. Допустимо, що запалення здійснюється від розжареної стінки.

При незначній зміні  $T$  почнеться бурхливий процес реагування. При  $T_3 > T_{кр}$  температура суміші в міру віддалення від стінки зростатиме, тобто настане нестационарний процес тепловиділення суміші і вона спалахне.

### 12.3 Межі вибуховості газів

Газоповітряну суміш можна запалити лише при певних співвідношеннях газу і повітря. Дуже багаті (по горючому вмісту) і дуже бідні суміші не горять.

Найменша концентрація горючого компонента суміші, при якій газ запалюється, називається **нижньою межею займання**.

Найбільша концентрація пального, при якій суміш можна запалити, називається **верхньою межею займання**.

Якщо суміш підігріти, то межі займання зміняться. Газоповітряна суміш вибухонебезпечна при вмісті в ній горючих компонентів в межах займистості - від верхнього до нижнього, тому межі займистості називаються ще **межами вибуховості**.

Виявлення вибухонебезпечної концентрації газу в повітрі в приміщенні забезпечується тим, що газу додають неприємний запах, тобто газ одориують (підмішують етимеркаптан  $C_2H_5SH$ ). Мінімальну міру одоризації визначають «сигнальною» нормою, яку встановлюють залежно від НПВ. Міра одоризації має бути такою, аби при вмісті газу в повітрі в кількості, відповідній «сигнальній» нормі, відчувався різкий запах одоранту.



Рисунок 12.3 - Межі займистості газоповітряної суміші

Таблиця 12.1 - Межі займистості газоповітряної суміші [4]

Газ	Хімічний символ	Межі займистості, % за об'ємом	
		нижній	верхній
водень	$H_2$	4,1	74
оксид вуглецю	$CO$	12,5	74
метан	$CH_4$	5,3	13,4
пропан	$C_3H_8$	2,4	9,5
етан	$C_2H_6$	3,1	12,5
бутан	$C_4H_{10}$	1,9	8,4
етилен	$C_2H_4$	3	28,6
сірководень	$H_2S$	4,5	45
водяний газ		6	70
коковий газ		7	21
природний газ		4,5	13,5
доменний газ		35	75

### 12.4 Межі вибуховості суміші газів

За правилом Ле-Шательє:

- суміш не містить негорючих домішок

$$L^{\Gamma} = \frac{100}{\sum r_i / l_i} \text{ - межа займання суміші,}$$

де  $r$  - об'ємна доля компонента суміші;

$l$  - НПВ або ВПВ компонента суміші.

-за наявності домішок

$$L^{\delta} = L^{\Gamma} \frac{\left(1 + \frac{\delta}{1 - \delta}\right)}{100 + L^{\Gamma} \frac{\delta}{1 - \delta}} \cdot 100,$$

де  $\delta$  - вміст баластів в долях одиниці.

## Лекція 13. ПОШИРЕННЯ ПОЛУМ'Я

### 13.1 Нормальне поширення полум'я

При вимушеному запаленні суміші виникає полум'я, яке поширюється з певною швидкістю. **Полум'ям** називається зона, в якій протікають реакції горіння. Отже, полум'я відділяє ще не згорілу суміш від продуктів згорання. Характерною властивістю полум'я є його **світіння**. Це дає можливість оглядово вивчати його форму та інші характеристики.

Існують два випадки поширення полум'я: нормальне (або повільне) горіння і детонаційне горіння. Нормальне поширення полум'я має місце або в нерухомому газоповітряному середовищі, або в ламінарному потоці суміші. Воно характеризується нормальною швидкістю поширення полум'я, а нормальною швидкістю поширення полум'я називається швидкість руху фронту полум'я в напрямі, нормальному його поверхні.

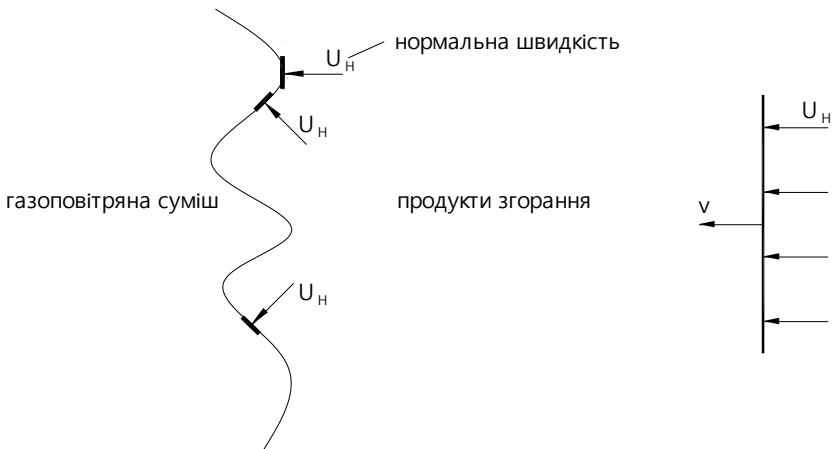


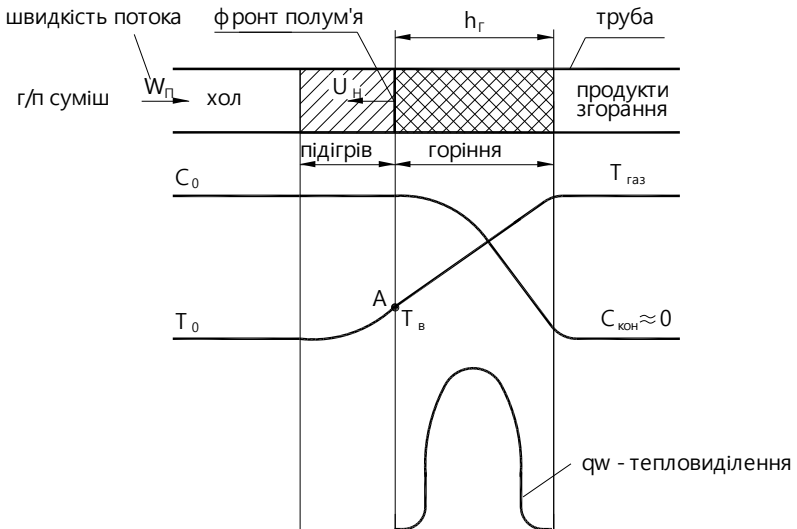
Рисунок 13.1 - Схема нормального горіння

Існує ще швидкість рівномірного поширення полум'я, під якою розуміють лінійну швидкість поступальної ходи фронту полум'я.

Ці швидкості будуть рівні, коли напрям руху полум'я збігатиметься з рухом фронту полум'я в кожній його точці.

Нормальна швидкість поширення полум'я визначається фізико-хімічними властивостями суміші і є фізико-хімічною константою.

Поширення полум'я графічно можна представити таким чином.



$C$  - концентрація пального в суміші.

Рисунок 13.2 - Поширення полум'я

Це говорить про те, що основна маса газу вигоряє у вузькій зоні, яка має температуру, що мало відрізняється від температури горіння  $T_2$ .

Розглянемо випадок, якщо  $W_{\Pi} = U_H$  - маємо встановлений фронт полум'я;  $W_{\Pi} > U_H$  - фронт зміщується вправо;  $W_{\Pi} < U_H$  - рух фронту полум'я вліво.

Недотримання цих співвідношень приводить до відриву або проскакування полум'я в пристроях газових пальників

$$[U_H] = \left[ \frac{см}{с} \right].$$

### 13.2 Визначення нормальної швидкості поширення полум'я методом Гюї-Міхельсона

В цьому випадку вивчається полум'я Бунзеновське на пальнику Бунзена.

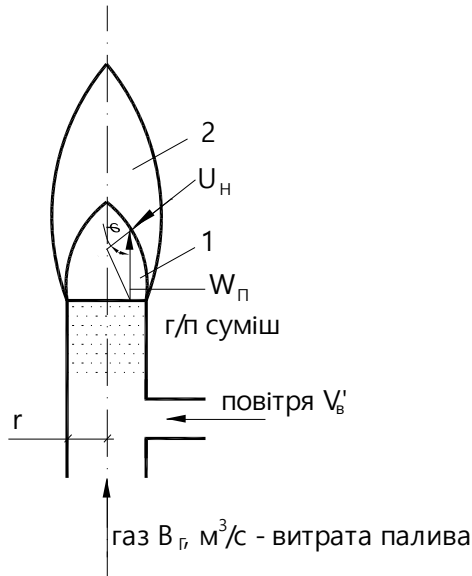


Рисунок 13.3 - Полум'я Бунзеновське на пальнику Бунзена

$$\alpha'_g = \frac{V'_g}{V_g^0} = 0,5 \dots 0,6.$$

Конус 1 - яскраво виражене блакитне полум'я. Вигорання газу здійснюється на його поверхні в кількості, що визначена кількістю

повітря, підведеного в суміш. Повітря, підведене заздалегідь в суміш до зони горіння, називається первинним повітрям. Оскільки вигорання в цьому конусі здійснюється з  $\alpha = 1$ , то швидкість горіння визначається кінетикою горіння, що визначена законом діючих мас і законом Арреніуса. Тому такий вид горіння називається **кінетичним**.

Конус 2 - розмите полум'я, слабосвітне. У цьому конусі відбувається догорання того газу, який не догорів в конусі 1. Швидкість горіння газу в цій зоні визначається швидкістю дифузії кисню довоколишнього повітря в зону горіння. Тому такий вид горіння називається **дифузійним**.

$$U_H = W_H$$

$$W_H = W_{II} \cos \varphi \Rightarrow U_H = W_{II} \cos \varphi, \quad (13.1)$$

де  $W_{II}$  - швидкість руху газоповітряної суміші в трубі;

$\varphi$  - кут між швидкістю потоку і нормаллю до фронту полум'я.

Виразення (13.1) носить назву **закону косинусів** або закону Міхельсона.

Для визначення  $U_H$  користуються спрощеною формою внутрішнього конуса. Його представляють у вигляді рівнобедреного трикутника (дивись рисунок 13.4).

$$\cos \varphi = \frac{R}{l} = \frac{R}{\sqrt{h^2 + R^2}}; U_H = W_{II} \frac{R}{\sqrt{h^2 + R^2}};$$

$$W_{II} = \frac{Q_{2/6}}{f_{сопла}} = \frac{Q_{2/6}}{\pi R^2},$$

де  $Q_{2/6}$  - об'ємна витрата газоповітряної суміші, тоді

$$Q_{2/6} = B_{\Gamma} + B_{\Gamma} \alpha' V_{\epsilon}^0 = B_{\Gamma} (1 + \alpha' V_{\epsilon}^0) = B_{\Gamma} (1 + V_{\epsilon}');$$

$$U_H \cdot F = W_{II} f,$$

де  $F = \pi R \sqrt{h^2 + R^2}$  - поверхня конуса.

108

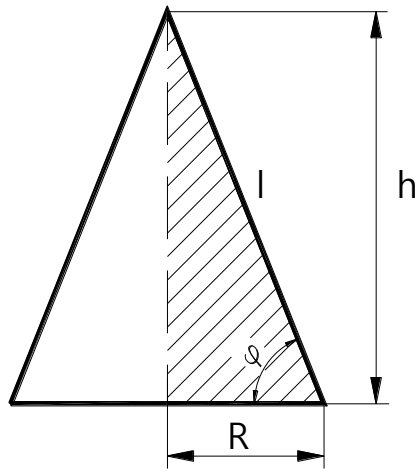


Рисунок 13.4 – Метод конуса

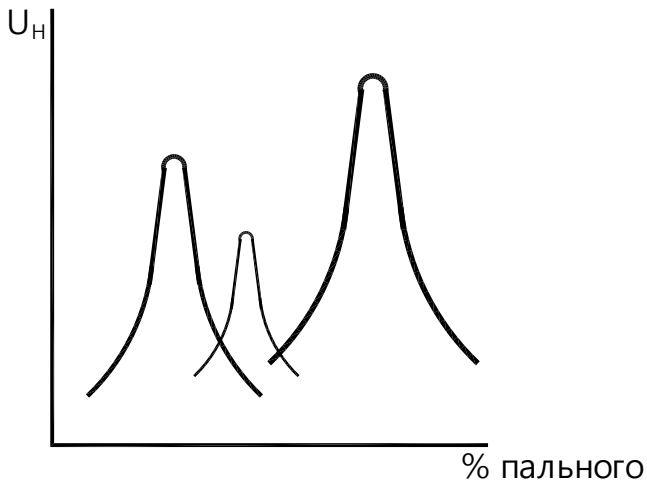


Рисунок 13.5 - Зміна нормальної швидкості поширення полум'я різних газів від вмісту пального в паливоповітряній суміші

### 13.3 Метод визначення нормальної швидкості поширення полум'я в трубах

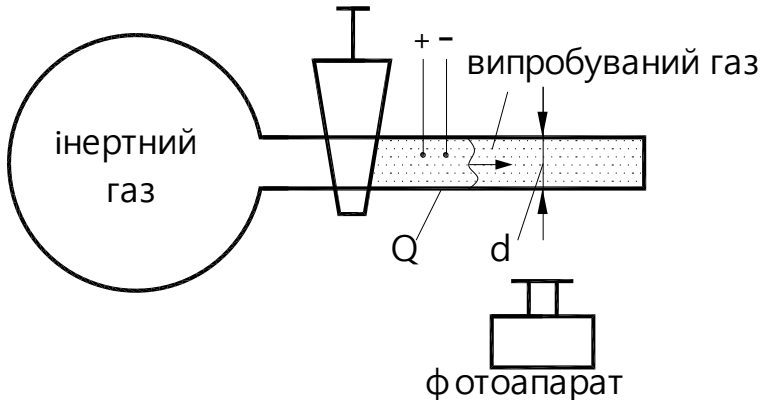


Рисунок 13.6 - Установка для визначення середньої швидкості горіння газу

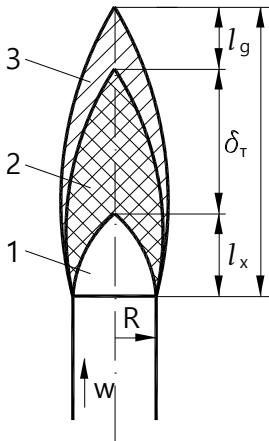
Визначається  $\vartheta$  - середня швидкість руху полум'я  $\vartheta = f(d)$ .

Існують діаметри, в яких газоповітряна суміш не може горіти. Це **критичні діаметри**: для водню - 0,9 мм; для метану - 3,5 мм.

### 13.4 Поширення полум'я в турбулентному потоці

Поширення полум'я в турбулентному потоці можна спостерігати при виході з пальника газоповітряної суміші, коли швидкість її виділення відповідає турбулентному режиму течії. В цьому випадку виниклий фронт полум'я має розмиті контури і значну товщину. Полум'я нестійке, легко відривається від пальника і для його підтримки доводиться суміш безперервно підпалювати з периферії. Турбулентний факел у вільному просторі має наступний вигляд і складається з:

- 1 - зона холодної суміші, що ще не запалала (ядро факела);
- 2 - видимий турбулентний фронт горіння;
- 3 - зона догорання.



$$l_{\phi} = l_x + \delta_{\tau} + l_g$$

$l_x$  - довжина холодного ядра

$\delta_{\tau}$  - товщина фронту горіння по осі струменя

$l_g$  - товщина зони догорання по осі струменя

Рисунок 13.7 - Схематичне зображення турбулентного факела

Змінювати довжину факела можна шляхом зміни його холодного ядра, довжина якого оцінюється по наступній наближеній формулі

$$l_x = \frac{W \cdot R}{U_T}, \text{ де } U_T \text{ — турбулентна швидкість поширення полум'я.}$$

$$Re = \frac{W \cdot d}{\nu}$$

У турбулентному режимі на підставі дослідних даних

$$U_T = 0,18 U_H d^{0,26} \cdot Re^{0,24}, \text{ см/с.}$$

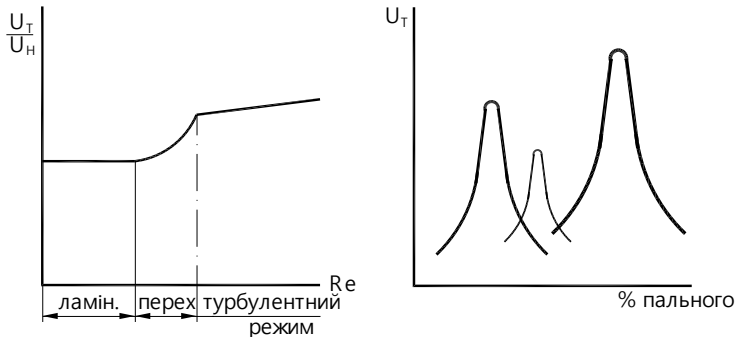


Рисунок 13.8 - Зміна турбулентної швидкості поширення полум'я при зміні числа Рейнольдса і вмісту пального різних газів в паливоповітряній суміші

### 13.5 Стійкість полум'я в ламінарному потоці

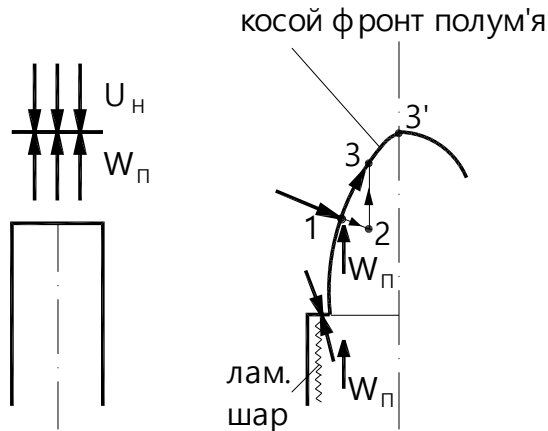
Фронт полум'я стабілізується в тій області простору, де швидкість руху потоку компенсується зустрічною швидкістю руху фронту полум'я.

Якби з гирла пальника виходила газоповітряна суміш у вигляді площини зі швидкістю  $W_{II}$ , то фронт полум'я встановився б на тій частині простору, де  $W_{II} = U_H$  - стійкий фронт полум'я. У косому фронті полум'я нестійке.

Факторами, що впливають на співвідношення швидкостей, можуть бути наступні:

- зміна швидкості в пограничному шарі за рахунок зміни швидкості виділення суміші з гирла пальника;

- зміна нормальної швидкості поширення полум'я в зоні пограничного шару за рахунок відведення або підведення тепла до стінок гирла пальника, маючи на увазі, що охолодження суміші призводить до зменшення нормальної швидкості поширення полум'я, а підвищення температури - до збільшення  $U_H$ .



$W_{П} = U_{H}$  — стійкий фронт;  $W_{П} > U_{H}$  — відрив полум'я;

$W_{П} < U_{H}$  — проскакування полум'я.

Рисунок 13.9 - Схеми прямого і косоного фронтів полум'я

З розглянутого виходить, що полум'я може бути стійким у вузькому діапазоні швидкостей. Для стабілізації полум'я існують прийоми його штучної стабілізації. Всі ці заходи зводяться до створення стійкого поясу запалення. Їм може бути стороннє джерело запалення (черговий вогонь); запалення від власних гарячих газів, як наприклад, в тунельних пальниках і пальниках з установкою стабілізаторів V- подібної форми.

Перед розпалюванням топка вентилюється, після чого підводиться в пальник газ і повітря, а розпалювання здійснюється або від газового факела, або від газового факела.

Перед розпалюванням здійснюється продування газопроводу від повітря не менше 15 хвилин через свічку. Зупинка здійснюється із скиданням газу через свічку. Вживаються камерні топки без пристрою для видалення газу.

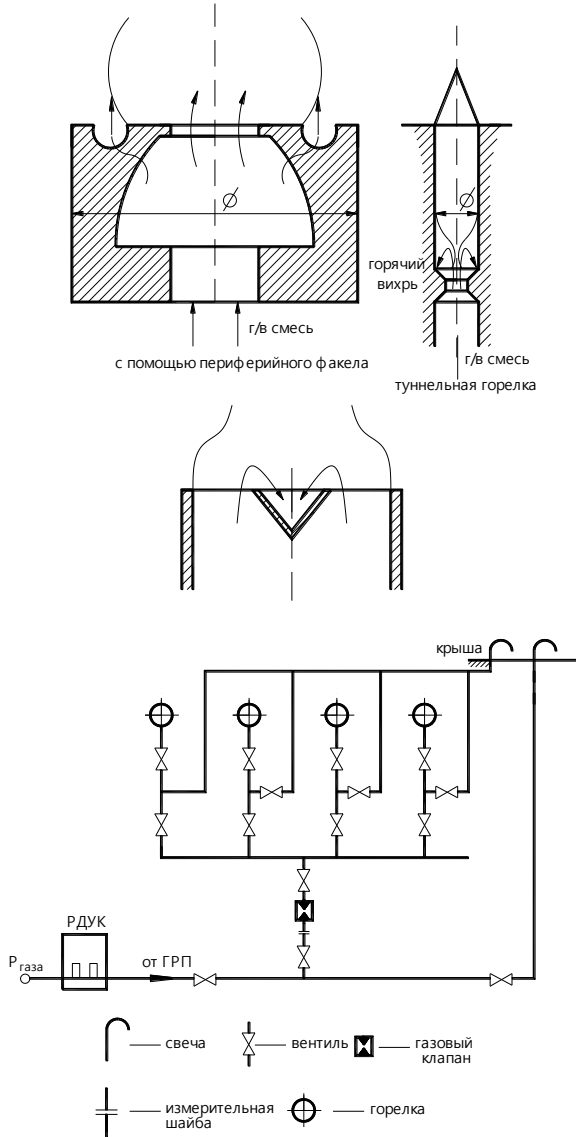


Рисунок 13.10 – Схема підведення газу до пальників котла

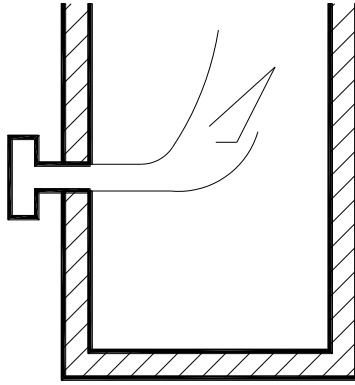


Рисунок 13.11 - Камерні топки без пристрою для видалення газу

## ЛЕКЦІЯ 14. МЕТОДИ СПАЛЮВАННЯ ГАЗУ

### 14.1 Процес спалювання газу

Процес спалювання газу складається з трьох послідовних стадій:

- сумішоутворення;
- підігрів суміші до температури займання;
- хімічна стадія.

В результаті сумішоутворення забезпечується контакт між паливом і окислювачем, і чим повніше забезпечується цей контакт, тим повніше здійснюється горіння.

Хімічна стадія характеризується горінням, тобто окисненням горючих компонентів киснем повітря. Залежно від того, де у просторі та часі здійснюється сумішоутворення, розрізняють кінетичний і дифузійний принципи горіння.

Якщо сумішоутворення здійснюється заздалегідь до виходу її в топкову камеру, то процес горіння - **кінетичний**. Якщо процес сумішоутворення здійснюється в зоні горіння топкової камери - **дифузійний**.

Кінетичне горіння здійснюється з великою швидкістю. Полум'я нестійке, тому при такому методі спалювання газу необхідно передбачити заходи стабілізації полум'я. Швидкість горіння лімітується швидкістю хімічної реакції, оскільки в цьому випадку кисню буває в достатній кількості, необхідній для повного згорання газів суміші.

При дифузійному спалюванні сумішоутворення протікає одночасно з горінням і швидкість горіння визначається величиною подачі повітря в зону горіння. Однією із переваг дифузійного методу є можливість регулювання процесу горіння в широкому діапазоні, оскільки процес горіння визначається інтенсивністю сумішоутворення, а сумішоутворенням легко управляти шляхом зміни конструкції пальника, або ввівши в неї регулюючі елементи. Для підвищення інтенсивності процесу дифузійного горіння і отримання компактного полум'я необхідно максимально інтенсифікувати процес сумішоутворення. Це досягається чисто механічними прийомами:

- дробленням потоків газу і повітря;

- напрямом струменів газу і повітря під різними кутами зустрічі;

- вживанням закручених потоків повітря завихрювачами лопаток і безлопаткових.

В топковій техніці знаходить вживання змішаний метод спалювання газу, коли в газовому пальнику відбувається змішання газу з частиною повітря, теоретично необхідного для спалювання газу, а останнє повітря подається в топку до кореню факела. В цьому випадку задалегідь змішаний газ з повітрям згоряє по кінетичному методу, а решта - по дифузійному.

Факельне горіння легко регулюється зміною кількості первинного повітря.

$$\alpha' = \frac{V_{\epsilon}^{cm}}{V^0}, \quad 1 > \alpha' > 0.$$

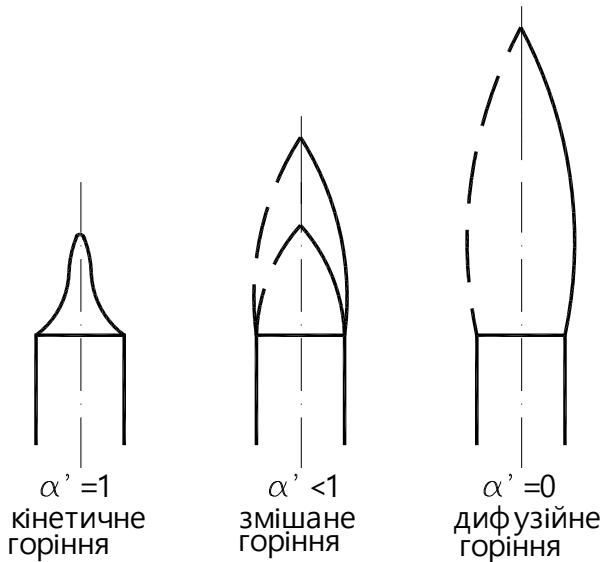


Рисунок 14.1 - Методи спалювання газу

Для змішання газу з повітрям пальник має пристрій змішувача. Якщо горіння здійснюється за кінетичним принципом, то змішувач є самостійним елементом, де готується однорідна газоповітряна суміш. Якщо згорання здійснюється за дифузійним типом, то змішувач створює необхідні умови для сумішоутворення в зоні горіння.

Другий елемент пальника - її голівка. Вона забезпечує вихід газоповітряної суміші в топковий простір і служить для стабілізації фронту полум'я і запобігання його просакування всередину пальника.

Третій елемент пальника - її вогнева частина, що є амбразурою або тунелем. Тут відбувається повне або часткове протікання реакцій горіння. Пальник може і не мати вогневого пристрою. В цьому випадку стійкість полум'я повністю забезпечується голівкою пальника.

## 14.2 Класифікація пальників

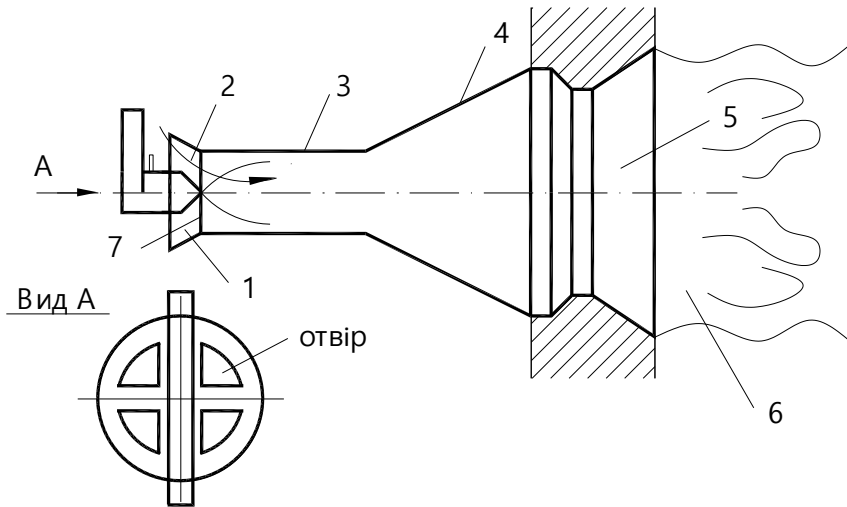
До цих пір ще не встановлена єдина класифікація пальників, оскільки ознак, по яких це можна зробити, безліч.

По методу спалювання газу пальники можна розділити на групи:

- пальники повного попереднього змішання газу з повітрям  $\alpha' = 1$ ;
- пальники попереднього змішання газу з частиною повітря  $\alpha' < 1$ ;
- пальники з незавершеним повним попереднім змішанням газу з повітрям. В цьому випадку в пальник подається все повітря, необхідне для спалювання газу, але в межах пальника повітря не встигає перемішатися з газом і процес змішання продовжується у факелі  $\alpha' \geq 1$ ;
- пальники без попереднього змішання газу з повітрям - дифузійні пальники  $\alpha' = 0$ .

За способом подачі повітря пальники поділяються на:

- ежекційні, в яких повітря засмоктується в пальник енергією газового струменя (рис. 14.2);
- бездутьові, в яких повітря поступає до пальника внаслідок розрідження в топці (14.3);
- дутьові, з подачею повітря в топку за допомогою вентилятора.



1 - газове сопло; 2 - повітрязабірник (конфузор); 3 - змішувач;  
4 - дифузор; 5 - амбразура; 6 - полум'я; 7- реєстр. Реєстром  
регулюється  $\alpha'$ .

Рисунок 14.2 - Ежекційні пальники

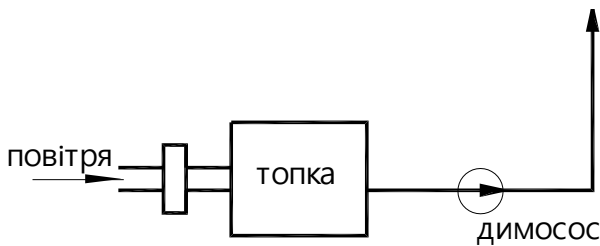


Рисунок 14.3 - Бездутьові пальники

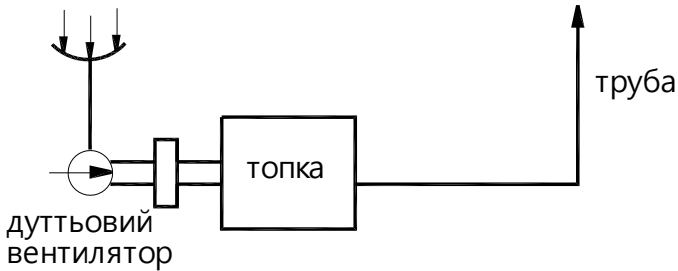


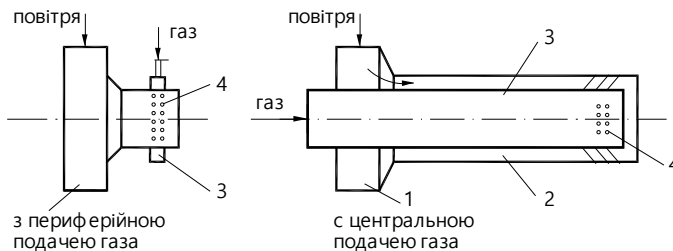
Рисунок 14.4 - Пальники дутьові

По тиску газу пальники поділяються на:

- пальники низького тиску - до 500 мм вод. ст. =  $5000\text{Па}$  ;
- пальники середнього тиску від 500 мм вод.ст. до 3 атм ( $5000\text{Па} \dots 0,3\text{МПа}$ ).

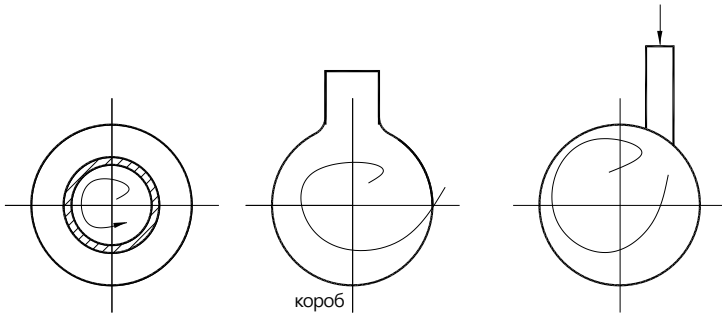
Пальники більш високого тиску не застосовуються.

За способом подачі газу в пальник пальники бувають з периферійною і центральною подачею газу.



- 1 - повітряний короб; 2 - канал первинного повітря; 3 - газовий колектор; 4 - газовипускні отвори; 5 - газові цівки.

Рисунок 14.5 - Види пальників залежно від подачі газу



завихорювачі

Рисунок 14.6 - Види завихорювачів

### 14.3 Пальники з незавершеним повним попереднім змішанням газу з повітрям

В пальниках цього типу все повітря, необхідне для спалювання газу, подається в пальник. В межах пальника здійснюється часткове змішання газу з повітрям, процес змішання закінчується в топці. Тому суміш, що приготовлена в пальнику, згоряє за кінетичним принципом, а суміш, що приготовлена в топці, - по дифузійному. Тому ці пальники відносяться до пальників, в яких газ згоряє за змішаним принципом.

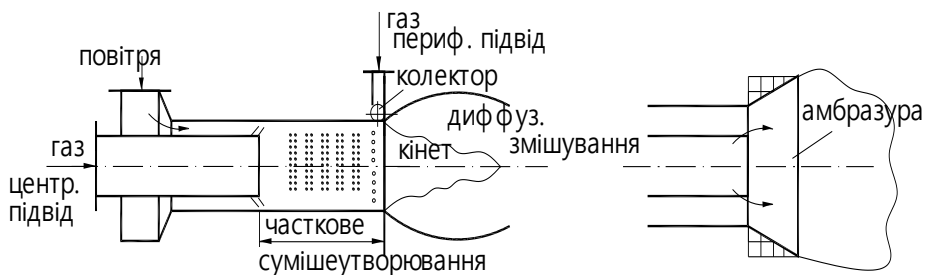


Рисунок 14.7 – Пальники з незавершеним повним попереднім змішанням газу з повітрям

Для інтенсифікації процесів сумішоутворення застосовують закручений потік повітря, в який впорскується газ. Закручування повітря здійснюється завихрювачами, а такі пальники називаються **турбулентними** або **вихровими**. В якості завихрювачів застосовуються лопаточні завихрювачі і безлопаткові. До безлопаткових відносяться равлики і тангенціальні.

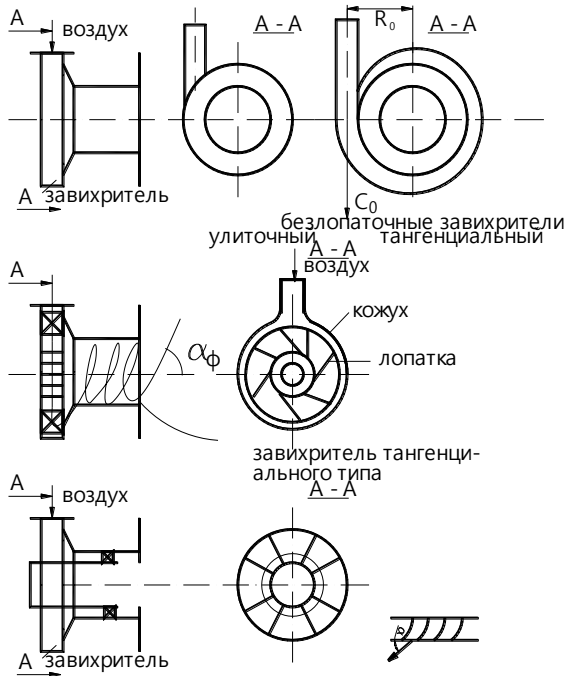


Рисунок 14.8 - Турбулентні (вихрові) пальники

Основними параметрами, що впливають на аеродинаміку закручування потоку, є наступні:

- $D_{II}$  - діаметр пережиму;
- $D_{ц}$  - діаметр циклонної камери;
- $W_{1a}$  - витратна складова вектора абсолютної швидкості  $W_1$ ;

- $W_{1u}$  - окружна складова  $W_1$  - вона крутить факел;
- $\alpha_1$  - кут сукання між абсолютною швидкістю  $W_1$  і її окружним напрямом  $W_{1u}$ ;
- $R_B$  - розмір зони зворотних струменів (розмір внутрішнього вихору).

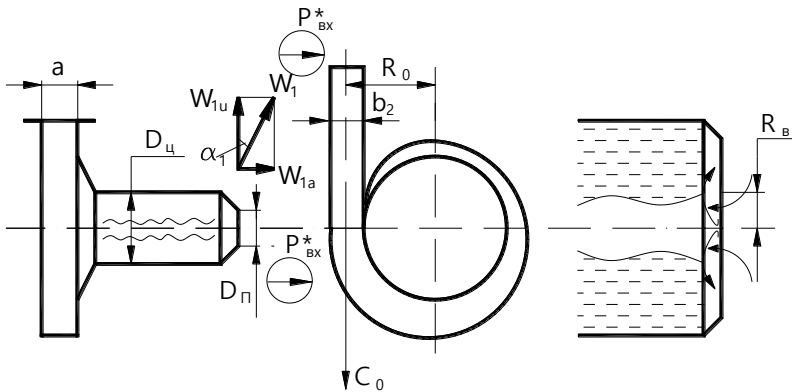


Рисунок 14.9 – Основні параметри аеродинаміки закручування потоку

Площа входу складає

$$\sum f = a \cdot b \cdot z, \text{ де } z - \text{число патрубків.}$$

Площа вихідного перетину пальника (амбразури) визначається через питому теплову напругу вихідного перетину

$$F_{\text{вих}} = \frac{\pi}{4} D_n^2 = \frac{B_{\text{газ}} \cdot Q_n^c}{Q/F},$$

де  $Q_n^c$  - теплотворна здатність газу;

$Q/F$  - теплова напруга вихідного перетину, приймається

$$(0,35\dots 0,41) \frac{Вт}{м^2}.$$

Задається кут сукання. Вважаємо, що  $\alpha_{\phi}^0 = 90 - \alpha_1^0$ .

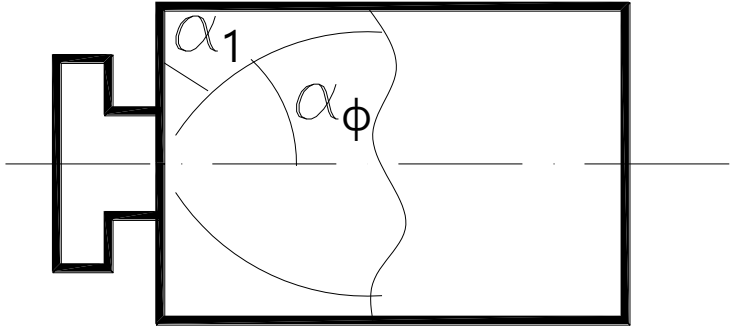


Рисунок 14.10 – Кути сукання

Задавшись  $\alpha_1$ , визначаються геометричні розміри пальника, виходячи з того, що

$$\frac{\sin^3 \alpha_1}{(1 + \sin \alpha_1) \cos \alpha_1} \cdot 4\varepsilon = \frac{\sum f}{\pi R_0 R_n} = A \text{ — геометричний комплекс,}$$

де  $\varepsilon$  - коефіцієнт зменшення початкового моменту кількості руху

$$\varepsilon = \frac{M_1}{M_0};$$

$M_1$  - момент кількості руху на виході з пальника;

$M_0$  - момент кількості руху на вході в пальник.

Параметр сукання пов'язаний із розміром зони зворотних струменів або втулковим відношенням наступною залежністю

$$\frac{\sum f}{\pi R_0 R_n} = \varepsilon \sqrt{\frac{2 - 2m^4 + 4m^3 - 4m}{m^2 + m}},$$

де  $m = \frac{R_\varepsilon}{R_n}$  - відносний розмір зворотних струменів.

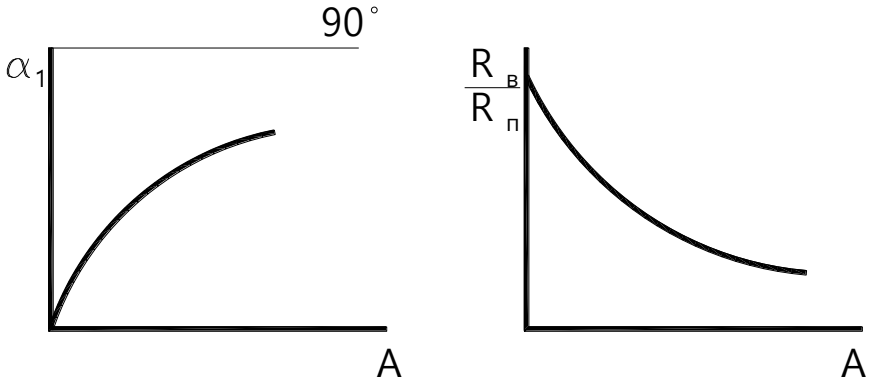


Рисунок 14.11 - Зміна кута сукання на виході з пальника і розміру зони зворотних струменів із зміною параметра сукання  $A = \frac{\sum f}{\pi R_0 R_n}$

Зміна коефіцієнту опору при зміні параметра сукання представлена наступним графіком

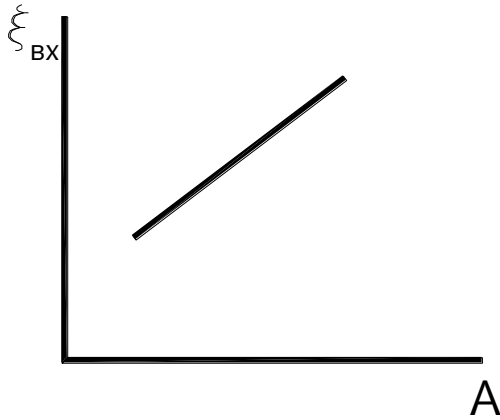


Рисунок 14.12 - Залежність коефіцієнту опору від параметра сукання

$$\Delta P = P_{\text{вх}}^* - P_1;$$

де  $P_1$  — статичний тиск на зрізі сопла.

$$Q = \sum f \cdot W_0 \Rightarrow \sum f = \frac{Q}{W_0},$$

де  $W_0 = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\xi_{\text{вх}} \cdot \rho}}$  — швидкість на вході;

$$\frac{\sum f}{\pi R_0 R_n} = A \Rightarrow \sum f = A \cdot \pi R_0 R_n.$$

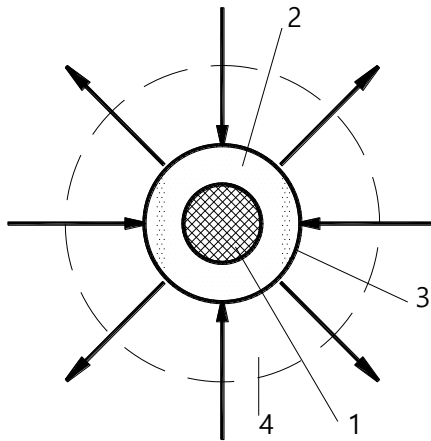
## Лекція 15. СПАЛЮВАННЯ РІДКОГО ПАЛИВА

### 15.1 Особливості горіння рідкого палива

Рідким паливом в котельних агрегатах є мазут.

Процес спалювання складається з наступних етапів:

- розпил (або пульверизація);
- утворення горючої суміші з окислювача і продуктів випару і розкладання вуглеводнів;
- займання горючої суміші;
- горіння горючої суміші.



1 - рідина (рідка крапля); 2 - пари палива; 3 - зона горіння; 4 - область дифузії окислювача в зону горіння і відведення продуктів згоряння.

Рисунок 15.1 - Схема згоряння окремої краплі в нерухомих середовищі

Характерною особливістю горіння рідкого палива є те, що воно горить в парогазовій фазі, оскільки температура кипіння рідких палив набагато нижча за температуру їх займання. Інтенсивність випару залежить від поверхні випару і кількості підведеного тепла. Тепло утворюється при підпалі суміші і потім при горінні палива.

Для збільшення поверхонь випару палива здійснюється його розпилювання у форсунках. Збільшення поверхонь випару приводить

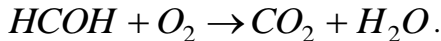
до інтенсифікації випару вуглеводнів і до збільшення швидкості згоряння палива. Розпилювання палива здійснюється з різною величиною крапель, тобто утворюється різний дисперсний склад, тобто є краплі крупних і дрібних розмірів. Дрібні краплі згорають швидше, і теплота, що утворилася при цьому, передається крупним краплям, тим самим сприяючи їх випару і згорянню. Схема згоряння окремої краплі в нерухомому середовищі представляється наступним рисунком (рис. 15.1).

### 15.2 Механізм горіння рідкої краплі

При підігріванні краплі палива виділяються пари, які займають зону 2 (рис. 15.1). При займанні утворюється зона горіння 3 (рис. 15.1), яка представляє фронт полум'я краплі. До фронту горіння безперервно дифундує кисень через зону 4 (рис. 15.1) і відводяться продукти згоряння.

Інтенсивність випару пального з поверхні краплі визначається тепломасообміном між зоною горіння і поверхнею краплі.

Згідно кінетиці горіння розкладання вуглеводнів відбувається з утворенням формальдегіду  $НСОН$ , який згоряє з утворенням  $СО_2$  і водяної пари



При нестачі кисню згоряння рідкого палива може відбуватися з утворенням сажі, яка не горить і викликає світіння факела, тобто факел стає жовтим. Тому, для забезпечення кращого згоряння палива повітря підводиться в корінь факела, аби інтенсифікувати реакцію горіння. Зона горіння у факелі встановлюється в тій області топкового простору, де швидкість поширення полум'я компенсується швидкістю руху мазутного струменя. Форма факела визначається типом форсунки, а його довжина - швидкістю виділення рідкого палива з форсунки.

### 15.3 Форсунки для розпилювання мазуту

Для розпилювання мазуту застосовується 2 види (типи) форсунок:

- механічні;

- форсунки з розпилюючим середовищем.

**Механічні** форсунки бувають струменеві і центробіжні. Струменеві вдають із себе трубу з отвором малого діаметру (2...3)мм.

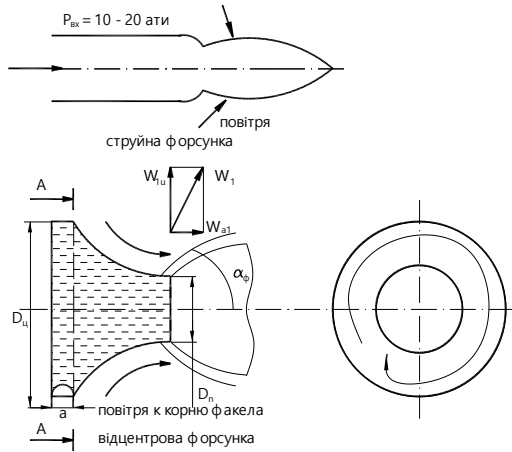


Рисунок 15.2 – Механічні форсунки

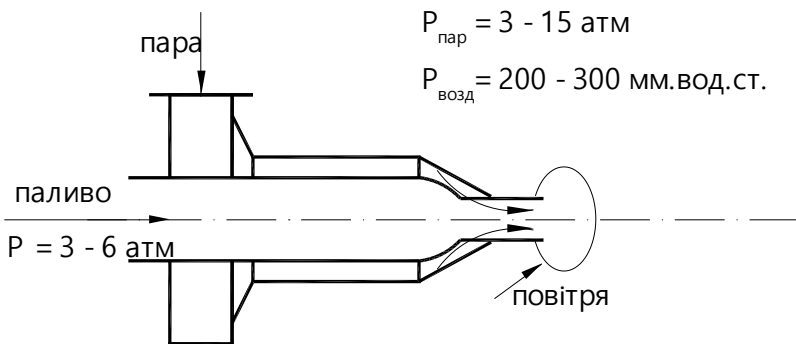


Рисунок 15.3 – Форсунки з розпилюючим середовищем

Форсунки з **розпилюючим середовищем**. В цих форсунках розпилювання рідкого палива (мазуту) здійснюється парою або повітрям. При розпилюванні повітрям форсунки бувають високого і низького тиску. Для здобуття повітрям високого тиску використовуються компресори, низького тиску - вентилятори.

При розпилюванні мазуту, аби не засмітити сопло, мазут підігрівають і фільтрують. Тому мазутне господарство котельні з використанням розпилюючих форсунок повинно виглядати наступним чином.

Частково підігрітий мазут з мазутосховища насосами - 1 через фільтри - 2 і підігрівач - 3 подається до форсунок - 4 (рис. 15.4 ). У підігрівачі мазут нагрівається до температури (80...90)°С . Зазвичай встановлюються два насоси, один з яких повинен мати паровий привід. Для проведення ремонту і чищення фільтрів без припинення подачі мазуту влаштовується обвідна лінія - байпас.

Для запобігання застою мазуту на ділянці непрацюючого трубопроводу магістраль мазуту замикається на мазутосховищі.

Часто для того, щоб мазут не застигав, прокладка мазутопроводів і паропроводів здійснюється разом

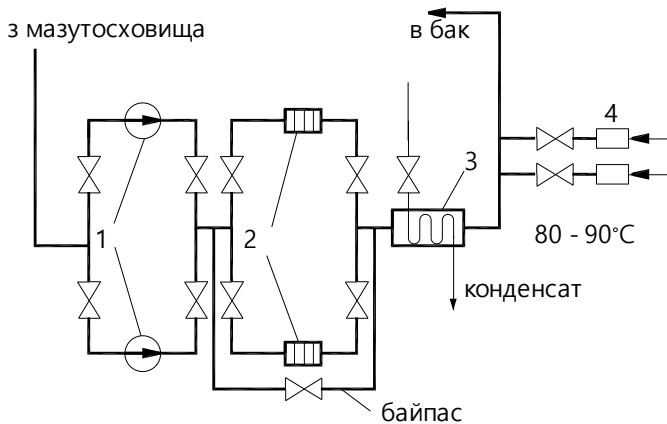


Рисунок 15.4 – Мазутне господарство котельні з використанням розпилюючих форсунок

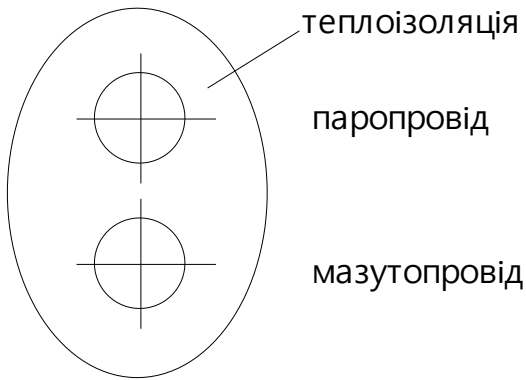


Рисунок 15.5- Прокладка мазутопроводів разом з паропроводами

Оскільки мазут є малозольним паливом, то для його спалювання використовуються закриті камерні топки, які мають форму паралелепіпеда з екрануванням всіх їх поверхонь.

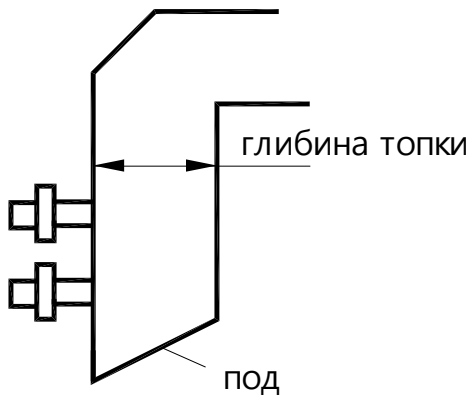


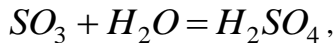
Рисунок 15.6 - Розміщення форсунок

Форсунки розміщуються на фронтівій стіні в один або два ряди в шаховому порядку на відстані  $(1...1,2)_m$  одна від одної. Подовий похилий екран закривається шамотом для поліпшення умов спалювання мазуту і запобігання перепалу екрану. Глибина топки залежить від довжини факела і складає  $(3...4)_m$ .

#### 15.4 Особливості спалювання мазуту з ванадієвими і сірчистими домішками

Якщо в мазуті є ванадій, то при горінні утворюється  $V_2O_5$ , який має низьку температуру плавлення. Тоді зола, що містить багато ванадію, на трубах пароперегрівача утворює тверді відкладення, які не піддаються обдуванню. При високій температурі стін труб ці відкладення плавляться, руйнують захисну окисну плівку металу і приводять до високотемпературної корозії. Значні відкладення дають золи з вмістом  $Na$ , наприклад  $Na_2SO_4$ , який має температуру плавлення  $840^\circ C$ , а в з'єднанні з ванадієм  $-(630...650)^\circ C$ . Ці відкладення також не піддаються обдуванню і видаляються механічним способом.

Окрім цього, при горінні сірки може утворитися  $SO_3$



А  $H_2SO_4$  роз'їдає поверхні нагріву.

Для боротьби з цими недоліками в мазут додають  $(0,2...0,3)\%$  від ваги мазуту порошок доломіту.

## ЛЕКЦІЯ 16. ГОРІННЯ ТВЕРДОГО ПАЛИВА

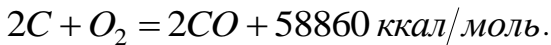
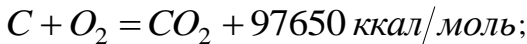
### 16.1 Схема горіння вуглецю

На відміну від горіння газу, горіння вуглецю є **гетерогенним** процесом, оскільки тут горюче і окислювач знаходяться в різних агрегатних станах.

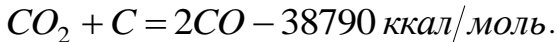
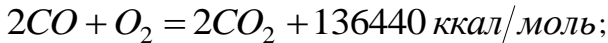
Механізм горіння твердого палива визначається горінням вуглецю, оскільки вуглець в твердому паливі знаходиться в значній кількості. Так антрацит має  $C^P = (93...95)\%$ , а дрова  $(50...60)\%$ .

Вивченням процесу горіння вуглецю займалися ряд дослідників, які пропонували свої схеми горіння вуглецю. Так з'явилася редуційна теорія, первинна теорія, комплексна теорія.

У сучасних уявленнях існують наступні схеми горіння вуглецю



Вторинні хімічні реакції



Схему гетерогенного горіння можна представити наступним рисунком.

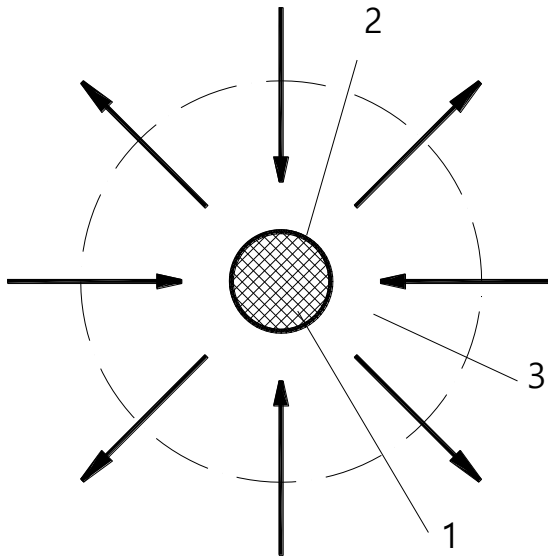
Горіння здійснюється на поверхні - 2. Швидкість горіння визначається з одного боку швидкістю сумішоутворення, тобто швидкістю дифузії кисню повітря до частки, а з іншого - швидкістю хімічної реакції.

Залежно від того, що визначає швидкість горіння, розрізняють кінетичну і дифузійну області горіння.

Якщо швидкість горіння визначається швидкістю хімічної реакції, то область горіння називається **кінетичною**. В цьому випадку в зоні горіння знаходиться велика кількість окислювача, а швидкість

горіння лімітується швидкістю хімічної реакції. Ця область горіння відповідає низьким температурам, менш  $(900...1100)^{\circ}\text{C}$ .

Із збільшенням температури, швидкість хімічної реакції збільшується, вжиток кисню збільшується. Настане такий момент, коли його не вистачатиме для здійснення хімічної реакції, і вона цілком визначатиметься дифузією кисню в зону горіння. Ця область називається **дифузійною**.



1 - частка вуглецю; 2 - поверхня горіння; 3 - зона дифузії окислювача до частки і відведення горючих газів.

Рисунок 16.1 - Схема гетерогенного горіння

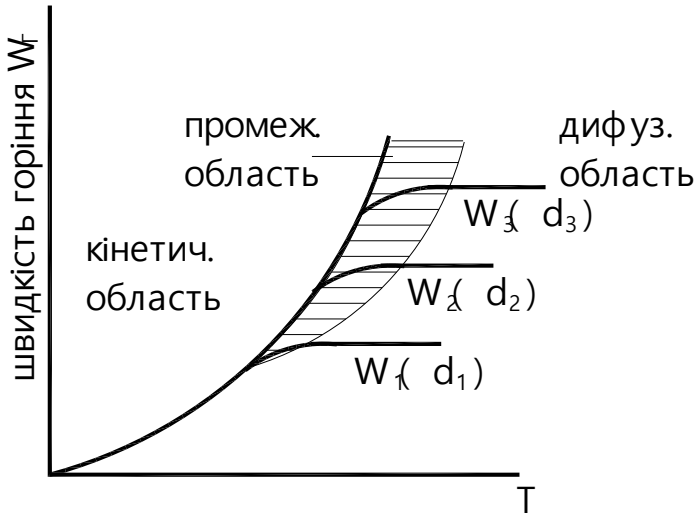


Рисунок 16.2 - Области реагування при гетерогенному горінні

Области реагування при гетерогенному горінні показані на рисунку 16.2.

$$W_1 < W_2 < W_3; d_1 > d_2 > d_3$$

Існує проміжна область горіння, в якій на швидкість горіння однаково впливають як швидкість дифузії, так і швидкість хімічної реакції.

При збільшенні швидкості перебігу газового потоку  $W$  і зменшенні діаметру паливних часток  $d$  швидкість дифузійного горіння збільшується.

Горіння реальної вуглецевої частки (коксу) має деякі особливості, які пов'язані з наявністю тріщин у вуглецевій частці. При надлишку кисню довкола частки (кінетична область горіння) кисень має можливість проникати в тріщини частки і викликати внутрішнє горіння вуглецю. При його нестачі (дифузійна область горіння) відбувається поверхнєве горіння частки.

В реальних умовах вигорання частки відбувається нерівномірно по поверхні. Більше вигорання спостерігається з боку набігаючого потоку.

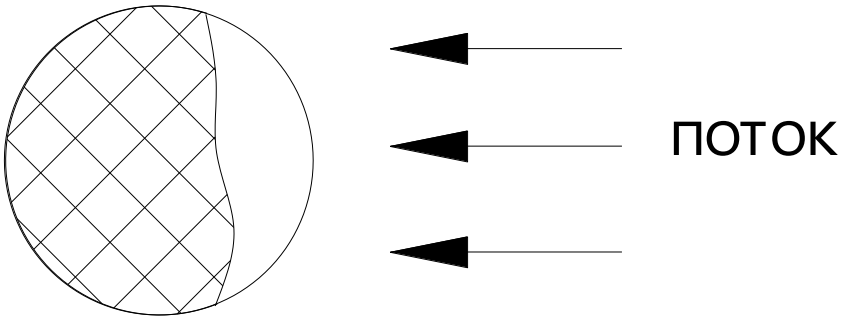


Рисунок 16.3 - Особливості спалювання натурального твердого палива

Горіння твердого палива починається з підігрівання його, випару вологи і виходу летких. На горіння великий вплив має зольність палива.

Випар вологи починається при  $t = 100^{\circ}\text{C}$ . Після підсушки палива починається процес виділення летких. Вихід летких відбувається для різних палив при різних температурах. Так у торфах вихід летких починається при  $t = (100..110)^{\circ}\text{C}$ , а в антрацитах при  $t = (380..400)^{\circ}\text{C}$  і продовжується до  $t = (1000..1100)^{\circ}\text{C}$ .

До складу летких входять горючі і негорючі гази. Горючі леткі, з'єднуючись з киснем повітря, займаються і, згоряючи, приводять до збільшення виходу летких і прогріванню кокеу і його горінню. Горіння коксового залишку починається після значного вигорання летких.

Стадії вигорання частки твердого палива зображені на рисунку 16.4.



Рисунок 16.4 - Стадії вигорання частки твердого палива

На горіння вугільної частки великий вплив має зола. Вона зменшує доступ кисню повітря до частки. Особливо це посилюється, коли зола знаходиться в розплавленому стані. Вона відшлаковується, покриває поверхню частки і та, через відсутність кисню, потухає. Наявність золи значно ускладнює експлуатацію котла.

## ЛЕКЦІЯ 17. СХЕМИ ОРГАНІЗАЦІЇ ТОПКОВОГО ПРОЦЕСУ

### 17.1 Основні схеми організації топкового процесу

У топковій техніці існують наступні способи спалювання твердого палива:

- шарове спалювання;
- спалювання у киплячому шарі;
- факельне спалювання;
- циклонне (вихрове) спалювання.

В основу такої класифікації покладена аеродинаміка повітряного потоку, яка визначає підведення окислювача повітря до палива.

### 17.2 Аналіз шарового процесу горіння

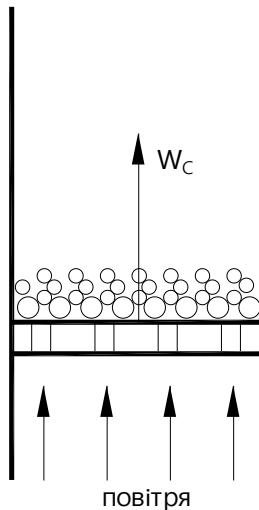


Рисунок 17.1 – Схема шарового процесу горіння

При цьому процесі паливо знаходиться на колосникових решітках, утворюючи шар, або в шарі. Через колосникові решітки і

шар палива продувається повітря, необхідне для згоряння палива. Проходячи через грудки вугілля між порами, повітря набуває швидкості  $W_C$ . Необхідною умовою цього процесу є те, аби стійкість шару не порушувалася. Це можливо здійснити, якщо

$$Gr > cF\rho \frac{W_C^2}{2}, \quad (17.1)$$

де  $Gr$  - вага паливної частки;

$c = f(\text{Re})$  - коефіцієнт опору;

$F$  - перетин частки;

$\rho$  - щільність повітряного потоку в шарі;

$W_C$  - швидкість повітря в шарі.

Високі температури в шарі приводять до збільшення швидкостей реакцій горіння. Проте, швидкість їх лімітується доступом кисню повітря. Тому процес горіння в шарі дифузійний. А дифузійний процес горіння можна регулювати кількістю окислювача, що подається в зону горіння.

Здавалося би, аби збільшити процес горіння, необхідно збільшити швидкість повітря, що подається в топку. Щоб витримати умову спалювання в щільному шарі треба збільшити і  $Gr$ . Проте, збільшення  $Gr$  приводить до зростання об'єму частки і зменшення поверхні контакту з окислювачем, якби цю частку роздібнити на дрібні частки. Тому на практиці в щільному шарі спалюють частки палива розміром (20...30)мм.

У шаровій топці знаходиться приблизно (700...1000) кг палива в  $1\text{ м}^3$  шару. Така велика кількість палива, що знаходиться на решітках, визначає велику теплову інерцію процесу і приводить до його стійкості.

### 17.3 Аналіз процесу горіння в киплячому шарі

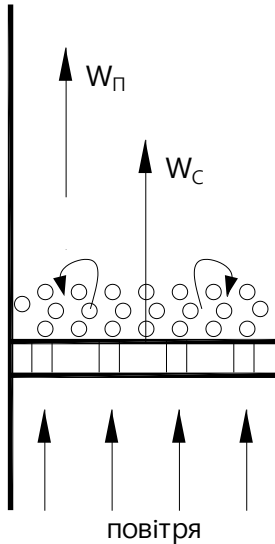


Рисунок 17.2 – Схема процесу в киплячому шарі

Прагнення інтенсифікувати процес спалювання палива в шарі за рахунок збільшення швидкості подачі повітря в шар привело до якісно нового процесу спалювання в «киплячому» шарі.

Збільшення швидкості в шарі  $W_C$  приводить до порушення стійкості шару, тобто шар стає рухливим. Швидкість, коли шар втрачає свою стійкість, називається **критичною**.

Подальше збільшення швидкості в шарі  $W_C$  приводить до того, що частки палива в шарі починають здійснювати поворотно-поступальний рух вгору - вниз. Створюється враження кипіння рідини, хоча її тут немає, а є частки палива. Звідси процес горіння і отримав свою назву.

Основною умовою цього процесу є нерівність

$$cF \frac{W_c^2 \rho}{2} \geq Gr \geq cF \rho \frac{W_{II}^2}{2},$$

тобто частка палива знаходиться в шарі, поки її вага  $Gr > cF \rho \frac{W_{II}^2}{2}$ .

Як тільки частка, згоряючи, зменшить свою вагу, вона підхоплюється потоком і виноситься золюю разом з димовими газами.

В порівнянні з щільним шаром тут знаходиться (400...600) кг палива в  $1\text{ м}^3$  шару, тобто об'єм шару збільшується в (1,5...2) рази в порівнянні з щільним шаром.

#### 17.4 Аналіз циклонного процесу горіння

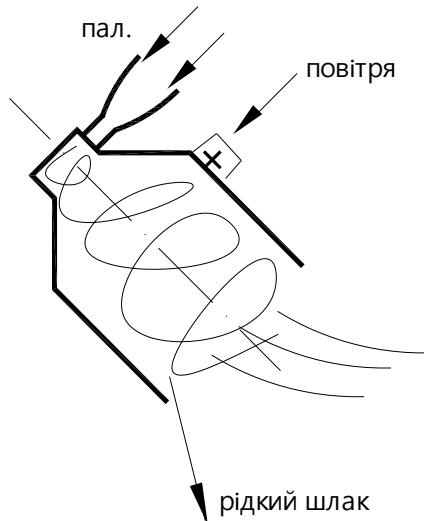


Рисунок 17.3 – Схема циклонного процесу

В циклонному процесі згорання палива здійснюється в закрученому потоці повітря. Частка палива може знаходитися в топці

стільки часу, скільки необхідно для її згоряння. Отже, в циклонних топках повнота згоряння краща, ніж при факельному процесі. Закручений потік супроводжується явищем сепарації. Тому віднесення золи з циклонної топки невелике і уловлюється в ній (80...95)% золи палива. У циклонній топці можна спалювати вугілля досить крупних розмірів (2...5)мм, що здешевлює витрати на приготування пилу при факельному процесі. В 1м<sup>3</sup> об'єму циклонної топки знаходиться більше палива, ніж при факельному. Це збільшує стійкість циклонного процесу в порівнянні з факельним.

### 17.5 Аналіз факельного процесу горіння

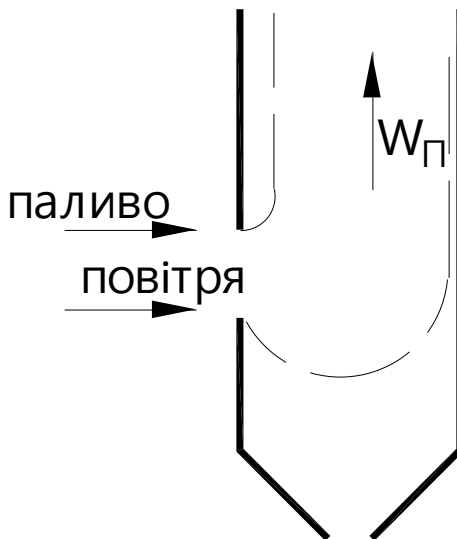


Рисунок 17.4 – Схема факельного процесу

При збільшенні швидкості в шарі  $W_C$  настане момент, коли частки палива почнуть рухатися по топці разом з повітрям і згоряти. Такий процес називається факельним.

Оскільки час перебування частки палива в топці малий (1...2)с, аби вона встигла згоріти, її роблять дуже малою, тобто доводять до розмірів порошинки. Подрібнене паливо при факельному процесі збільшує поверхню реагування.

Основною умовою факельного процесу є нерівність

$$Gr \leq cF, \rho \frac{W_{\Pi}^2}{2}.$$

При факельному спалюванні умови горіння твердого палива погіршуються, оскільки швидкість частки палива відносно повітря невелика. Оскільки в  $1\text{м}^3$  об'єму знаходиться (20...30)г палива, то факельний процес дуже нестійкий до різних порушень теплового балансу.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Частухин В.И., Частухин В.В. Топливо и теория горения. Киев: Вища школа, 1989. 223 с.
2. Гольстром В.А., Кузнецов Ю.Л. Справочник по экономии топливно-экономических ресурсов. Киев: Техника, 1985. 384 с.
3. Прокоф'єв О.І., Демчика Б.Г., Шналь Т.М. та ін. Посібник з теорії горіння. Львів: НУ «ЛП», 2002. 108с.
4. Мисак Й.С., Гнатишин Я.М., Івасик Я.Ф.. Паливні пристрої для спалювання низькосортних палив. Львів НУ «ЛП», 2002. 98с.
5. Канюк Г.І., Пугачова В.М., Без'язичний В.Ф., Близниченко О.М., Шматков Д.І. Основи енерго-і ресурсозбереження: навч. посіб. Харків: друкарня «Мадрид», 2016. 230с.
6. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.П., Левченко Б.О., Маріїч Л.Й. Перспективи і практика розвитку галузей паливно-енергетичного комплексу: навч. посіб. Харків: НТУ «ХП», 2013. 300с.
7. Акмен Р.Г. Паливо, основи теорії горіння та паливні пристрої: текст лекцій і задачі для окремих розділів курсу. Харків: НТУ «ХП», 2013. 95с.
8. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.П., Левченко Б.О. Паливно-енергетичний комплекс. Стратегія розвитку : навч. посіб. Харків: НТУ «ХП», 2009. 400с.
9. Павловський В.Г. Термодинаміка фізико-енергетичних процесів: навч. посіб. Харків: НТУ «ХП», 2009. 332с.
10. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.П., Левченко Б.О. Проблеми енергетики на межі ХХІ століття: навч. посіб. Харків: НТУ «ХП», 2006. 200с.
11. Рижов А. П. Паливо та теорія горіння, спалюючі пристрої: курс лекцій. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2014. 96с.
12. Кремнєв В.Е., Адаменко Д.С., Кремнєва Е.В., Перерва В.Я. Сжигание топлива. Часть I: конспект лекций. Днепропетровск: НМетАУ, 2011. 59 с.
13. Кремнєв В.Е., Адаменко Д.С., Кремнєва Е.В. Сжигание топлива. Часть II: конспект лекций. Днепропетровск: НМетАУ, 2012. 56с.
14. Костюк О.П. Паливо та обладнання для його спалювання : навч. посіб. Рівне: НУВГП, 2011. 121с.
15. Пономаренко С.М. Основи фізики горіння: навч. посіб. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 85 с.

**Інформаційні ресурси**

1. <http://mpe.kmu.gov.ua/fuel/control/uk/index> - Офіційний веб-сайт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України.
2. <http://www.naftogaz.com/www/3/nakweb.nsf?Open> - Офіційний сайт Національної акціонерної компанії “Нафтогаз України”.
3. <http://www.er.energy.gov.ua/images/Footer.png> – Офіційний сайт Державного підприємства «Енергоринок».
4. <http://www.biowatt.com.ua/analitika> - Інтернет платформа Українського ринку біоенергетики.
5. <http://bio.ukrbio.com/ua/articles/3002/> - Інформаційний портал України про тверде біопаливо та котельне обладнання.
6. [http://www.hargassner.com.ua/hargassner\\_video.html](http://www.hargassner.com.ua/hargassner_video.html) - Офіційний сайт Представництва ХАРГАСНЕР в Україні.