

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 1

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 1 / Укл.: Чепрасов О.І., Кузьменко А.А., Назаренко І.А., Каюков Ю.М. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2023. 78 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.....	7
Лекція 1. Загальні положення.....	8
Лекція 2. Характеристики палив.....	11
2.1 Енергетичне паливо, поняття і визначення.....	11
2.2 Класифікація палив.....	12
2.3 Походження палив.....	12
2.4 Хімічна будова та елементарний склад палива .....	13
2.5 Теплотехнічна оцінка окремих складових палива .....	17
2.6 Вихід летких речовин і властивості твердого горючого залишку .....	21
2.7 Теплота згоряння палива (теплотворна здатність палива)....	22
2.8 Умовне паливо, приведені характеристики палива.....	25
Лекція 3. Класифікація палив.....	27
3.1 Класифікація твердих палив.....	27
3.2 Класифікація рідких палив.....	30
3.3 Класифікація газоподібних палив.....	33
Лекція 4. Горіння палив.....	35
4.1 Поняття про горіння палив.....	35
4.2 Основні стехеометричні рівняння повного і неповного горіння.....	35
4.3 Приклади .....	39
4.4 Об'єм продуктів згоряння.....	40
Лекція 5. Ентальпія продуктів згоряння .....	48
5.1 Розрахунок ентальпії продуктів згоряння палива (димових газів).....	48
Лекція 6. Топкові пристрої.....	54
6.1 Види топкових пристроїв.....	54
Лекція 7. Тепловий баланс процесу горіння. Зведення теплового балансу процесу горіння.....	58
Лекція 8. Визначення надлишку повітря.....	64
8.1 Коефіцієнт надлишку повітря.....	64
8.2 Методи визначення коефіцієнту надлишку повітря.....	66
Лекція 9. Контроль топкового процесу.....	69
9.1 Показники досконалості топкового процесу.....	69
9.2 Визначення CO і RO <sub>2</sub> в димових газах.....	70
9.3 Визначення коефіцієнта надлишку повітря в димових газах	

по газовому аналізу.....	75
Перелік посилань.....	79

## 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 1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Сучасне людство в своїй повсякденній діяльності використовує велику кількість теплової енергії. Виражається це у виробництві електричної енергії, гарячої води і пари, в металургійних процесах.

Основним джерелом здобуття теплової енергії є палива, які містять вуглець, а споживачами її є теплові електростанції, опалювальні котельні, різного роду печі, металургійні і теплотехнічні установки. Паливо є основою життя і діяльності людини в сучасному суспільстві.

Зараз людство використовує стільки палива, скільки запасалося на планеті на протязі мільйонів років.

По рівню споживання можна судити про рівень благополуччя країни. В середньому на одну людину на Землі витрачається біля 5 кг умовного палива (у.п.) за добу, в промислово розвинутих країнах - біля 30 кг у.п. за добу. Загальне споживання в світі складає 12 млрд тонн умовного палива (т у.п.) за рік.

Згідно останнім даним Світової енергетичної ради (МІРЕК) запаси органічного палива в світі складають 1220 млрд т у.п., а загальні вилучені запаси палива в (4...5) раз більше, тобто достатні для світового попиту на багато десятиліть (до 500 років).

Споживання і розвідані запаси палива в світі наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Споживання і розвідані запаси палива

Горючі копалини	Споживання		Розвідані запаси		Запас, років
	млрд т у.п.	%	млрд т у.п.	%	
Тверде паливо	3,96	34,2	1280	62,3	323
Нафта (рухлива)	4,72	40,9	310	15,1	65
Нафта (важка)	0,27	2,3	70	3,4	260
Природний газ	2,48	21,5	110	5,3	44
Нетрадиційний газ	0,04	0,4	25	1,2	625
Горючі сланці	0,08	0,7	260	12,7	3250
Всього	11,55	100	2055	100	

Вага ядерного палива із загальної кількості виробленої енергії,  
%:

- 1978 р. - 2 ;
- 2000 р. - 8 ;
- 2020 р. - 13.

Запаси енергії, млрд т у. п.:

- ядерне паливо (уран, торій) -  $231 \cdot 10^3$ ;
- термоядерне паливо (дейтерій) -  $56,1 \cdot 10^9$ ;
- геотермальна - 500;
- енергія Сонця (у рік) -  $247 \cdot 10^3$ .

Важливішою проблемою для кожної країни є забезпеченість її енергією. В таблиці 1.2 наведені дані про забезпеченість України власними енергоресурсами.

Україна належить до країн з дефіцитом власних природних вуглеводних ресурсів. Власного палива Україна видобуває біля 94 млн т у.п. в рік, а потреба при нормальному стані економіки складає біля 300 млн т у.п. в рік. Потреба в імпорті складає біля 206 млн т у.п., в тому числі природного газу - 138 млн т у.п. ( $120 \text{ млрд м}^3$ ), нафти - 68 млн т у.п. (50 млн т).

Таблиця 1.2 - Забезпеченість України власними енергоресурсами

Горючі копалини	Щорічний видобуток			Перспективні запаси			Запас, років
	млн т	млн т у.п.	%	млн т	млн т у.п.	%	
Вугілля	100	65,0	69,2	100000	65000	98,7	1000
Нафта	5	3,4	3,6	125	85	0,1	25
Природний газ	22 млрд $\text{м}^3$	25,5	27,2	700 млрд $\text{м}^3$	811	1,2	32
Всього		93,9	100		65896	100	

В Україні структура споживання первинних енергоресурсів виглядала в останні роки приблизно так, %:

природний газ - 43;

нафта - 18; (газ + нафта - 61);

вугілля - 23;

атомна енергія - 16.

Родовища вугілля в Україні:

Донецький вугільний басейн - в Луганській області (вугілля всіх марок);

Львівсько-Волинський вугільний басейн: Волинське і Міжріченське родовища (вугілля марки Г).

Родовища природного газу: Дашавське, Шебелінське (газопровід Щебелінка - Дніпро), родовище газу в Гоголево (газопровід Гоголево-Полтава).

Використовуються гази доменних і коксових печей.

Враховуючи передовий світовий досвід, важливим і перспективним для України є:

- нарощування видобутку вугілля для заміщення ним нафти і природного газу;
- використання енергозберігаючих виробництв і технологій;
- безпека діючих атомних блоків і отримання власного ядерного палива, аналіз можливості будівництва нових блоків АЕС;
- виробництво нових видів палива з рослинної сировини, технічних спиртів;
- за рахунок шельфів Чорного і Азовського морів планується збільшити видобуток нафти і газу в їх акваторіях.

## ЛЕКЦІЯ 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАЛИВ

### 2.1 Енергетичне паливо, поняття і визначення

Паливом називаються речовини, які в процесах хімічних або ядерних перетворень здатні виділяти значну кількість теплоти, видобуток і широке використання яких економічно доцільно.

Розрізняють паливо:

- органічне;
- ядерне;
- штучне.

*Органічне паливо* - це вуглецеві або вуглеводневі з'єднання, здатні вступати в реакції окислення з киснем повітря з виділенням великої кількості теплоти.

До органічного палива відносяться:

- копалини вугілля;
- торф;
- горючі сланці;
- мазут;
- природний газ.

В твердих і рідких видах палива органічна частина складається із складних хімічних з'єднань, що утворені п'ятью хімічними елементами: *вуглець* (С), *водень* (Н), *сірка* (S), *кисень* (О) і *азот* (N). Крім того, паливо містить *вологу* (W) і *мінеральні домішки*, які при спалюванні перетворюються в *золу* (A). Тому їх хімічний склад виражається не складними хімічними з'єднаннями, а вмістом елементів в процентах, тобто по *елементному складу палива*.

Останніми роками знаходить промислове вживання використання теплоти, що виділилася в результаті розпаду ядер деяких важких елементів, які умовно називаються ядерним паливом. Теплова енергія, що виділяється при ядерному розпаді, значно більше, ніж при окисленні органічних палив. Якщо теплота згоряння органічних палив вагається від  $4 \cdot 10^3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$  до  $40 \cdot 10^3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ , то ядерного палива  $\approx 8 \cdot 10^{10} \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ .

У промисловій теплоенергетиці разом із природним паливом, що отримується з надр землі, широко використовуються штучні палива:

- доменні гази;
- генераторні гази;
- відходи деревообробної промисловості та інші види сировини.

## 2.2 Класифікація палив

Залежно від агрегатного стану розрізняють: тверде, рідке, газоподібне, а за способом здобуття: природне, штучне палива.

Загальна класифікація енергетичного палива представлена в таблиці 2.1.

## 2.3 Походження палив

Хімічна енергія палива є результатом дії енергії Сонця на рослинний світ Землі. Природне паливо утворилося з материнської маси, що є залишками відмерлих організмів тваринного і рослинного світу.

Розрізняють 3 стадії в утворенні палива:

1. *Біохімічна* - включає відмирання рослинного світу і тваринних організмів і утворення осаду з подальшим його похованням в застійних водних басейнах. При утворенні з осаду рідкого або газоподібного палива процес носив анаеробний (безкисневий) характер. Окислювальні процеси протікали лише за рахунок кисню, що знаходився в самих органічних речовинах. Середовище було відновним. Під дією анаеробних бактерій відбувалося інтенсивне бродіння осаду і його розкладання.

2. *Діагенетична* - характеризується опусканням осаду разом із земною корою і похованням його під погано проникними відкладеннями. В результаті цього газ, що утворився, не міг покидати осад. На процес розкладання починають впливати підвищений тиск і температура.

3. *Метаморфічна* - відповідає періоду, коли осад потрапляв в умови ще вищих температур і тисків в результаті опускання його на ще більшу глибину. В третій стадії відбувається термічне розкладання рідких вуглеводнів з утворенням газу і вуглецевого залишку.

Таблиця 2.1 - Класифікація енергетичного палива

Паливо		Агрегатний стан		
		Тверде	Рідке	Газове
Органічне	Природне	копалини вугілля; горючі сланці; торф; (деревина)	(нафта)	природний газ
	Штучне	(кокс; брикети; деревинне вугілля)	мазут (бензин; солярове масло; дизельне паливо)	доменний; генераторний; коковий; (підземна газифікація)
Ядерне	Природне	уран-235 U235	(розчини солей)	—
	Штучне	уран-233 U233; плутоній- 239 Pu239	(розчини солей)	—

Примітка. Паливо, узятє в дужки, не є енергетичним.

## 2.4 Хімічна будова та елементарний склад палива

Органічне паливо складається з горючих речовин, негорючих домішок і води. Горючими елементами палива є вуглець, водень і сірка летка. До негорючих мінеральних домішок відносяться кисень, азот, сірка сульфатна, яка входить до складу оксидів, наприклад  $\text{FeSO}_4$ , і зола.

Газоподібне паливо є сумішшю горючих і негорючих газів і невеликої кількості водяної пари. До горючих газів відносяться: оксид вуглецю  $\text{CO}$ , водень  $\text{H}_2$ , вуглеводневі гази метанового ряду  $\text{CH}_4 \dots \text{C}_m\text{H}_n$  і ацетиленового ряду. До негорючих відносяться: кисень  $\text{O}_2$ , азот  $\text{N}_2$ , вуглекислий газ  $\text{CO}_2$  і водяна пара  $\text{H}_2\text{O}$ .

Основним елементом горючої частини всіх палив є **вуглець**, який обумовлює величину виділення теплоти з палива. Проте, чим більше вуглецю в твердому паливі, тим важче воно займається.

Розрізняють п'ять основних *станів* (робочих мас) палива:

*Робочий стан* (*робоча маса*) палива - стан палива з таким вмістом вологи і зольністю, з яким воно видобувається, відвантажується чи використовується (верхній індекс - *p* чи міжнародний - *r*)

$$C^P + H^P + S^P + O^P + N^P + A^P + W^P = 100\% . \quad (2.1)$$

*Аналітичний стан палива* - стан палива, що характеризується підготовкою проби - розмолот до розмірів часток 0,2 мм і зменшенням вмісту вологи  $W^a < W^p$

$$C^a + H^a + S^a + O^a + N^a + A^a + W^a = 100\% \quad (2.2)$$

*Загальна, робоча волога*  $W^p$  складається з аналітичної вологи  $W^a$  і зовнішньої вологи  $W^{вн}$

$$W^p = W^a + W^{вн} .$$

*Сухий стан палива* (верхній індекс - *c* чи - *d* від англ. *dry* – сухий, зневоднений) - стан палива без вмісту загальної вологи (суха маса палива)

$$C^c + H^c + S^c + O^c + N^c + A^c = 100\% . \quad (2.3)$$

*Горючий або сухий беззольний стан палива* (верхній індекс - *г* чи *daf* – от англ. *dry ash-free* – сухий, вільний від золи) - умовний стан палива, що не містить загальної вологи і золи (горюча маса палива)

$$C^Г + H^Г + S^Г + O^Г + N^Г = 100\% . \quad (2.4)$$

*Органічний стан палива* (верхній індекс - o) - умовний стан палива без вмісту вологи і мінеральної маси (органічна маса палива)

$$C^o + H^o + S_{op}^o + O^o + N^o = 100\% . \quad (2.5)$$

Співвідношення різних станів палива наведені на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 - Співвідношення різних станів палива

Для отримання коефіцієнта перерахунку складу палива, наприклад, з горючого в робочий, необхідно зробити наступні перетворення. Запишемо рівняння для робочого стану (2.1) в наступному вигляді, %

$$C^p + H^p + S^p + O^p + N^p = 100 - A^p - W^p , \quad (2.6)$$

І поділимо (2.6) на (2.4)  $C^g + H^g + S^g + O^g + N^g = 100\% .$

Отримаємо вираз

$$C^p + H^p + S^p + O^p + N^p = (C^g + H^g + S^g + O^g + N^g) \frac{100 - A^p - W^p}{100} . \quad (2.7)$$

Таким чином, для кожного елемента, наприклад, для вуглецю, справедливо співвідношення, %

$$C^P = C^{\Gamma} \frac{100 - A^P - W^P}{100}. \quad (2.8)$$

Аналогічним чином визначаються коефіцієнти перерахунку для будь-яких інших станів, що представлені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Таблиця перекладних коефіцієнтів

Задана маса палива	Шукана маса палива		
	Робоча	Суша	Горюча
Робоча	1	$\frac{100}{100 - W^P}$	$\frac{100}{100 - (A^P + W^P)}$
Суша	$\frac{100 - W^P}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^c}$
Горюча	$\frac{100 - (A^P + W^P)}{100}$	$\frac{100 - A^c}{100}$	1

*Приклад.* При лабораторному дослідженні елементарний склад Кузнецького вугілля, що слабо коксується, на горючу масу складає:

$C^{\Gamma} = 84\%$  ;  $N^{\Gamma} = 2\%$  ;  $H^{\Gamma} = 4,2\%$  ;  $O^{\Gamma} = 9\%$  .

Вологість і зольність на робочу масу складає:

$W^P = 12\%$  ;  $A^P = 11,4\%$ .

Визначити елементарний склад робочої маси.

Рішення:

$$C^P + H^P + S_{\text{л}}^P + N^P + O^P + A^P + W^P = 100\%$$

$$C^{\Gamma} + H^{\Gamma} + S_{\text{л}}^{\Gamma} + N^{\Gamma} + O^{\Gamma} = 100\%$$

$$\frac{C^P}{C^{\Gamma}} = \frac{100 - (A^P + W^P)}{100}$$

$$C^P = C^{\Gamma} \frac{100 - (A^P + W^P)}{100} = C^{\Gamma} \cdot K$$

$$K = \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = \frac{100 - (11,4 + 12)}{100} = 0,766.$$

Елементарний склад робочої маси %:

$$C^p = C^r \cdot K = 84 \cdot 0,766 = 64,344;$$

$$H^p = H^r \cdot K = 4,2 \cdot 0,766 = 3,217;$$

$$S^p = S_{II}^r \cdot K = 0,5 \cdot 0,766 = 0,383;$$

$$N^p = N^r \cdot K = 2 \cdot 0,766 = 1,532;$$

$$O^p = O^r \cdot K = 9 \cdot 0,766 = 6,894;$$

$$A^p = 11,4;$$

$$W^p = 12.$$

Відповідь

$$C^p + H^p + S_{II}^p + N^p + O^p + A^p + W^p = 64,344 + 3,217 + 0,383 + 1,532 + 6,894 + 11,4 + 12 = 100\%.$$

*Газоподібне паливо* - це механічна суміш горючих і негорючих газів. Тому, на відміну від твердого і рідкого палива, склад газоподібного палива задається в об'ємних процентах окремих газів до об'єму сухого газу при нормальних умовах.

## 2.5 Теплотехнічна оцінка окремих складових палива

**Вуглець** є основним елементом горючої частини палива. При повному згорянні 1 кг вуглецю виділяється  $33,7 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$  теплоти. Його

вміст в паливах складає:

- торф, деревина - (50...58)%;

- буре і кам'яне вугілля, мазут, антрацит - (80...90)%.

Вуглець в паливі має велике технологічне значення. З нього отримують металургійний кокс. Вміст вуглецю в паливі зростає з хімічним віком палива. Тому торф, буре вугілля, кам'яне вугілля і

антрацит можна розглядати як послідовні стадії вуглефікації вихідної органічної маси, що існувала на Землі в далекі геологічні епохи.

**Водень** є другою за значенням горючою частиною палива. При повному згорянні 1 кг водню виділяється  $\approx (70..80) \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$  теплоти. В

реальному паливі водень входить в різних хімічних сполуках, що декілька знижує його енергетичну цінність. Із збільшенням хімічного віку палива вміст водню в паливі знижується. При термохімічній переробці палива водень входить до складу летких газів, що утворюються.

**Сірка.** До складу палива сірка входить в трьох видах:

-  $S_{op}$  - органічна сірка, у вигляді органічних з'єднань;

-  $S_k$  - колчеданна сірка, у вигляді з'єднань з залізом ( $FeS_2$ ;  $CuS$ );

-  $S_c$  - сульфатна сірка, у вигляді сульфатних з'єднань ( $CaSO_4$ ;  $MgSO_4$ ).

*Загальний вміст сірки* в паливі  $S_{об}$  складається з трьох названих складових:

$$S_{об} = S_{op} + S_k + S_c.$$

*Вміст горючої сірки*  $S_r$  в паливі визначається сумою двох доданків

$$S_r = S_{op} + S_k.$$

При спалюванні 1 кг сірки виділяється 9,05 МДж/кг теплоти. Вміст сірки в паливі викликає сірчаноокислотну корозію низькотемпературних поверхонь нагріву котла (в нижньому повітропідігрівачі). Це пов'язано з тим, що при горінні сірки разом з утворенням сірчистого газу  $SO_2$  утворюється газ  $SO_3$ . Оскільки димові гази мають в своєму складі водяні пари, то в разі їх конденсації утворюється волога  $H_2O$ , яка, з'єднуючись з  $SO_3$ , утворює сірчану кислоту  $H_2SO_4$



**Кисень і азот** є органічним баластом. Наявність їх в паливі зменшує процентний вміст в ньому горючих елементів палива, що погіршує енергетичні властивості (теплотворну здатність) палива.

Особливо багато кисню в деревині. При збільшенні міри вуглефікації палива, кількість кисню в ньому зменшується.

Азот при горінні палива в реакції окислення участі не бере (не горить), а переходить в продукти згоряння у вільному вигляді. В різних видах твердого і рідкого палив його вміст складає (0,5...2,5) %.

**Зола.** При повному згорянні палива утворюється твердий негорючий залишок, який називається золою. Зола, яка пройшла стадію плавлення і перетворилася в сплавлену масу, називається **шлаком**.

Зольність палива відносять до його сухої маси і позначають  $A^c$ . Зольність сухої маси палива змінюється у великих межах і залежить від вигляду палива. Для мазуту вона складає долі відсотка (беззольне паливо), а для горючих сланців (40...70)%.

До складу золи входять наступні з'єднання:

- глина  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ;
- вільний кремнезем  $SiO_2$ ; залізний колчедан  $FeS_2$ ;
- оксиди заліза  $FeO$ ;  $Fe_2O_3$ ;
- вапно  $CaO$ ;  $CaCO_3$ ;
- магnezій  $MgO$ ;  $MgCO_3$ ;
- луг і хлориди.

Складові золи є результатом домішок, які потрапляють в паливо трьома шляхами:

- первинні домішки - це перехід домішок в паливо з речовин - вугілляутворювачів;
- вторинні домішки - це попадання домішок ззовні в процесі перетворення вихідної (материнської) маси палива.
- зовнішні домішки - це попадання домішок в паливо при його видобутку і транспортуванні.

Первинні і вторинні домішки складають внутрішні домішки палива.

Тому наявність домішок в одному і тому ж паливі може істотно вагатися, від чого залежатиме і зольність палива, внаслідок чого здійснюється контроль палива в лабораторних умовах. Для цього заздалегідь висушена проба палива спалюється в тиглі, а потім прожарюється до постійної ваги при температурі 800 °C для твердого палива і 500 °C для рідкого палива. Вага залишку, що виходить, береться за вміст золи в паливі.

Важливими властивостями золи є абразивність і плавкість. Абразивність - здатність золи стерти поверхні нагріву. Зола, яка летить по газоходах разом з димовими газами, називається леткою. Плавкість - здатність леткої золи налипати на поверхні нагріву котла.

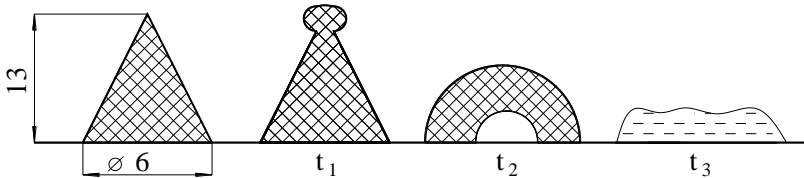


Рисунок 2.2 - Визначення температурних характеристик золи

Зола характеризується трьома температурами (для більшості палив):

$t_1 = (900...1500)^\circ C$  - початок деформації золи;

$t_2 = (1100...1500)^\circ C$  - температура розм'якшення;

$t_3 = (1150...1600)^\circ C$  і більш - температура рідкоплавкого стану.

По температурі плавлення золи відбувається класифікація палив на такі палива:

- з легкоплавкою золою ( $t_3 < 1350^\circ C$ );

- з середньоплавкою золою ( $t_3 = (1350...1450)^\circ C$ );

- з тугоплавкою золою ( $t_3 > 1450^\circ C$ ).

Більшість енергетичного вугілля мають легкоплавку золу.

**Волога** є другою складовою баласту палива. Загальна вологість палива складається з наступних складових:

1. *Гідратна волога* – вода, що входить до складу мінеральних з'єднань, домішок палива: *сілікатів* ( $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ) і *сульфатів* ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ). Доля гідратної вологи складає декілька процентів. Видалення її відбувається при високих температурах.

2. *Сорбційна волога* включає до себе *адсорбційну вологу* на поверхні розподілу фаз і *колоїдну вологу*, що входить до органічного палива. Вміст залежить від температури і вологості повітря.

3. *Капілярна волога* заповнює пори. Пори з діаметром більш  $10^{-5}$  мм заповнюються при контакті з водою, а в порах з меншим розміром можлива конденсація вологи з повітря.

4. *Поверхнева волога* розташовується ззовні частинок палива. Залежить від початкової вологості палива, температури і вологості повітря.

*Загальну вологу вугілля* поділяють на *зовнішню вологу* і *вологу повітряно-сухого палива*. При висушуванні вугілля на повітрі видаляється поверхнева волога і капілярна волога з відкритих пор. В повітряно-сухому вугіллі залишається сорбційна і гідратна волога. При висушуванні вугілля при  $t = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$  видаляється вся волога, окрім гідратної.

*Загальну вологу*  $W_{\text{об}}$  розраховують як суму зовнішньої вологи  $W_{\text{вн}}$  і вологи *повітряно-сухого палива*  $W_h$ .

Волога палива знижує в топковій камері температуру горіння, збільшує втрату тепла з відхідними газами і знижує ККД котла.

Найбільшу вологість має торф ( $W^p = (40\text{...}60)\%$ ), найменшу - мазут ( $W^p = (1\text{..}4)\%$ )

Зовнішня волога може бути видалена з палива при його тривалій сушці в природних умовах при температурі  $(20 \pm 1)^{\circ}\text{C}$  і відносній вологості  $(65 \pm 5)\%$ . В лабораторних умовах палива сушаться в сушильній шафі.

## 2.6 Вихід летких речовин і властивості твердого горючого залишку

При нагріванні твердого палива відбувається розпад термічно нестійких молекул горючої маси з виділенням газоподібних продуктів розкладання, які називаються леткими речовинами горючої маси і позначаються  $V^2$ .

Леткі речовини складаються з горючих і негорючих газів. До горючих відносяться вуглеводні, оксид вуглецю  $\text{CO}$ , водень  $\text{H}_2$ , до негорючих - вуглекислий газ  $\text{CO}_2$  і водяні пари  $\text{H}_2\text{O}$ .

Вихід летких речовин має важливе значення для організації процесів горіння. При збільшенні виходу летких потрібні: більший

об'єм топкового простору і збільшення подання повітря в зону горіння.

Речовина, що залишилася після виходу летких, називається коксом.

Властивості коксу: спекаючийся, порошокоподібний.

Згідно стандартам, вихід летких речовин в лабораторних умовах визначається шляхом прогрівання без доступу повітря нависки аналітичної проби палива при температурі  $(850 \pm 25)^\circ\text{C}$  протягом 7 хвилин. При цьому повне виділення летких не досягається, а втрату ваги нависки рахують як вихід летких речовин.

Палива, що мають малий вихід летких, називаються малореакційними. Для їх займання потрібно створення високої температури.

## 2.7 Теплота згоряння палива (теплотворна здатність палива)

При спалюванні палива виділяється теплота  $Q$ , кДж, залежна від виду спалюваного палива і його кількості. Теплоту, яка виділилася, відносять до 1 кг твердого або рідкого палива і 1 м<sup>3</sup> газоподібного палива, отримуючи тим самим **питому теплоту згоряння**,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}(\text{м}^3)}$ .

Питому теплоту згоряння прийнято називати просто теплотою згоряння або теплотворною здатністю палива.

Теплота, що виділилася, є хімічною енергією, ув'язненою в одиниці палива.

При горінні палива утворюються водяні пари, на що витрачається частина теплоти палива, тому розрізняють вищу і нижчу

теплотворну здатність палива  $Q_v$  і  $Q_n$ ,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ;

$$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}; \left( \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}; \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3} \right). 1 \text{ ккал} = 4,19 \text{ кДж}.$$

Таким чином, **вищою теплотворною здатністю** палива називається кількість теплоти, що виділилася при повному згорянні

одиниці палива за умови, що водяні пари сконденсовані. Це означає, що теплота пароутворення врахована.

**Нижчою теплотворною здатністю** палива називається кількість теплоти, що виділилася при повному згорянні одиниці палива за умови, що водяні пари не сконденсовані. Це означає, що теплота пароутворення не врахована.

Зв'язок між  $Q_n$  і  $Q_g$  наступний

$$Q_n = Q_g - Q_{H_2O},$$

де  $Q_{H_2O}$  - теплота, що витрачена на пароутворення

$$r = 600 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}} = 2510 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$G, \frac{\text{кг } H_2O}{\text{кг}},$$

тоді  $Q_{H_2O} = r \cdot G, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ .

Кількість пари, що утворилася при спалюванні палива,  $\frac{\text{кг } H_2O}{\text{кг}}$

$$G = \frac{W^p + 9H^p}{100}.$$

$$Q_n = Q_g - 2510 \left( \frac{W^p + 9H^p}{100} \right) = Q_g - 25,1(W^p + 9H^p),$$

де  $W^p$  - вологість палива, %

$9H^p$  - кількість водяної пари, що утворюється при спалюванні водню, %.

Вища теплотворна здатність палива визначається дослідним шляхом. Як вимірюючий пристрій, для визначення теплотворної здатності твердого і рідкого палива застосовується калориметрична бомба, а для газу-калорифер.

Всі теплотехнічні розрахунки здійснюються з вживанням  $Q_n^p$ .

$Q_n^p$ ;  $Q_n^c$ ;  $Q_n^z$  — нижчі теплотворні здатності відповідно робочої, сухої і горючої маси палива,  $\frac{\kappaДж}{кг}$ ;  $\frac{\kappaДж}{м^3}$ .

Нижча теплота згоряння одного і того ж палива, що має різну вологість, розраховується по формулі,  $\frac{\kappaДж}{кг}$

$$Q_{n2}^p = (Q_{n1}^p + 25W_1^p) \cdot \frac{100 - (W_2^p + A_2^p)}{100 - (W_1^p + A_1^p)} - 25,1W_2^p,$$

де індекс 1 позначає паливо з вологістю  $W_1^p$ ;

індекс 2 - паливо з вологістю  $W_2^p$ .

Теплота згоряння газоподібного палива,  $\frac{\kappaДж}{м^3}$

$$Q_n^c = \sum Q_{ni}^c \cdot r_i,$$

де  $r_i$  - об'ємна доля  $i$ -го компонента палива;

$Q_{ni}^c$  - теплотворна здатність  $i$ -го компонента палива,  $\frac{\kappaДж}{м^3}$ .

Для газоподібних палив (при відомому складі) теплота згоряння  $1 м^3$  сухого газу визначається по наступній формулі, МДж/м<sup>3</sup>

$$Q_n^c = 0,01 \cdot [10,8H_2 + 12,65CO + 35,85CH_4 + 63,8C_2H_6 + 91,3C_3H_8 + \dots + 23,4H_2S],$$

де  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$  і т.п. - вміст газових компонентів в процентах, а коефіцієнти перед ними - теплота згоряння кожного газу в МДж/м<sup>3</sup>.

Теплотворні здатності палив занесені в довідкову літературу. За відсутності довідкових даних для твердого і рідкого палив, їх  $Q_n^p$  розраховуємо по формулі Менделєєва,  $\frac{\kappaДж}{кг}$

$$Q_n^p = 338C^p + 1025H^p - 108,5(O^p - S_n^p) - 25W^p.$$

*Приклад.* Визначити теплотворну здатність палива наступного елементарного складу

%	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
		94	2,8	0,4	0,3	0,1	2
$Q_{Hi}^C$ ккал/м <sup>3</sup>	8555	15226	21795	28331	34890	-	-

Рішення

$$\begin{aligned} Q_n^C &= \sum Q_{Hi}^C \cdot r_i = 0,01 \sum Q_{Hi}^C \cdot C_m H_n = \\ &= 0,01(8555 \cdot 94 + 15226 \cdot 2,8 + 21795 \cdot 0,4 + 28331 \cdot 0,3 + 34890 \cdot 0,1) = \\ &= 8675,112 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3} = 36,35 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}. \end{aligned}$$

## 2.8 Умовне паливо, приведені характеристики палива

Для порівняння кількісних характеристик спалюваного палива в різних топках, для обліку видобутку і вжитку палива ввели поняття умовного палива.

Під умовним паливом розуміється паливо з нижчою теплотворною здатністю робочої маси

$$Q_n^p = 7000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}} = 29,3 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}.$$

Теплова потужність  $N$  топкового пристрою зв'язана з витратою палива  $V$  і теплотою згоряння  $Q_n^p$  співвідношенням, МВт

$$N = VQ_n^p.$$

Витрата умовного палива  $B_{yt}$  зв'язана з витратою натурального палива  $B$  співвідношенням ( $N_{yt} = N$ )

$$B_{\text{ут}} = \frac{BQ_{\text{н}}^{\text{p}}}{Q_{\text{ут}}},$$

чи при  $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$ , МДж/кг,

$$B_{\text{ут}} = \frac{BQ_{\text{н}}^{\text{p}}}{29,35}.$$

Приведені характеристики палива виражають процентний вміст баласту палива (золи і води), віднесений до  $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$  палива:

$$\left. \begin{aligned} A^{\text{п}} &= \frac{A^{\text{p}}}{Q_{\text{н}}^{\text{p}}} \\ W^{\text{п}} &= \frac{W^{\text{p}}}{Q_{\text{н}}^{\text{p}}} \\ S^{\text{п}} &= \frac{S_{\text{ор+к}}^{\text{p}}}{Q_{\text{н}}^{\text{p}}} \end{aligned} \right\} \frac{\%}{\frac{\text{МДж}}{\text{кг}}}$$

## ЛЕКЦІЯ 3. КЛАСИФІКАЦІЯ ПАЛИВ

### 3.1 Класифікація твердих палив

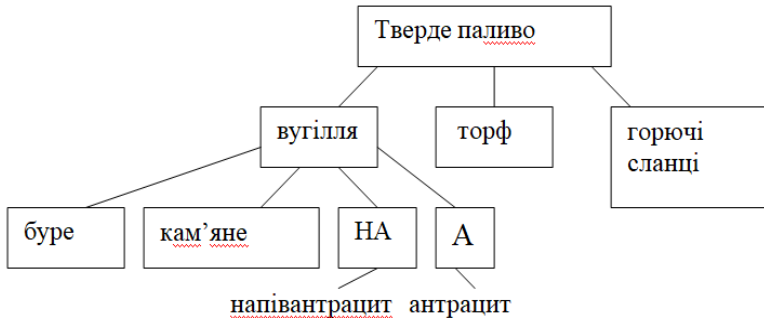


Рисунок 3.1 - Класифікація твердих палив

#### Буре вугілля

До них відноситься вугілля з  $Q_g^p$  беззолного палива менше  $23,9 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$ . Сказане записується так

$$Q_g^p \cdot \frac{100}{100 - A^p} < 23,9 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$$

Маркується вугілля буквою Б :

Б 1 —  $W^p > 40\%$ ;

Б 2 —  $W^p = (30...40)\%$ ;

Б 3 —  $W^p < 30\%$ ,

де  $W^p$  – вологість вугілля.

Буре вугілля характеризується високим виходом летких  $V^c > 40\%$ , коксовим залишком, що не спікся, високою вологістю, пониженим вмістом вуглецю і підвищеним вмістом кисню. На повітрі бурі вугілля втрачають вологу, розсипаються на дрібниці, схильні до

самозаймання. Теплотворна здатність мала і складає (10...16)

$\frac{МДж}{кг}$ , тому далеке перевезення не вигідне.

### Кам'яне вугілля

До них відноситься вугілля з  $Q_v^p$  беззолного вугілля

$$Q_v^p \cdot \frac{100}{100 - A^p} > 23,9 \frac{МДж}{кг}$$

На відміну від антрациту і напівантрациту вони мають підвищений вихід летких.

Кам'яне вугілля ділиться на марки і класи.

Таблиця 3.1 - Марки кам'яного вугілля

Марки вугілля	Позначення	Вихід летких на горючу масу $V^z, \%$	Характеристики коксу
Довгополум'яний	Д	36 і більш	Від порошкоподібного до слабоспекаючогося
Газовий	Г	35 і більш	Спекаючийся
Газовий жирний	ГЖ	Більш 31 до 37	Спекаючийся
Жирний	Ж	24...37	Спекаючийся
Коксовий жирний	КЖ	25...33	Спекаючийся
Коксовий	К	17...33	Спекаючийся
Худий	ХС	14...27	Спекаючийся
Худий спекаючийся			Спекаючийся
Худий	Х	9...7	
Слабоспекаючийся	СС	17...37	Від порошкоподібного до слабоспекаючогося
			Від порошкоподібного до слабоспекаючогося

Таблиця 3.2 - Класи кам'яного вугілля

Клас вугілля	Позначення	Розмір шматків в мм
Плита	П	Більше 100
Крупний	К	50...100
Горіх	Г	25...50
Дрібний	Д	13...25
Насіннячко	Н	6...13
Рядовий	Р	Необмежений
Штиб	Ш	Менше 6

До умовного позначення марки вугілля приписується позначення його класу, наприклад, ГЖГ - газовий жирний горіх; ДД - довгополум'яний дрібний.

### Напівантрацит і антрацит

До них відноситься вугілля, що має вихід летких менше 9 %. При цьому в антрацитах він складає (2...9)%, в напівантрацитах - до 10 %. Вони відносяться до малореакційного вугілля, у зв'язку з чим погано запалюються. Теплотворна здатність  $\approx 27 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$ .

В Донецькому вугільному басейні - вугілля всіх марок, в Кузнецькому - газовий, худий, в Казахстані - з великою зольністю.

### Торф

Торф є місцевою паливною сировиною. Розрізняють торф фрезерний і шматковий. Вміст вологи в товарному торфі не повинен перевищувати (45...50)%,  $V^e$  досягає 70 %, теплотворна здатність (8...10)  $\frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$ .

### Горючі сланці

Характерною їх особливістю є велика зольність  $A^p = (50...60)\%$ . Вологість невелика (15...20)%, вихід летких великий (80...90)%. Через велику кількість баластів, що знаходяться

в горючих сланцях, їх теплотворна здатність мала і складає (5...10)  $\frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$ . Основний видобуток - в Естонії.

$\frac{\text{кг}}$

### 3.2 Класифікація рідких палив

**Мазут**, що виробляється з нафти, є основним видом рідкого енергетичного палива. В залежності від технологічних умов розрізняють *розгін* – неглибоку переробку нафти и *крекінг* - глибоку переробку.

При *розгоні* нафта розділяється на фракції по температурах їх кипіння без руйнування молекулярної структури вуглеводнів. При *крекінгу* молекули руйнуються з утворенням нових з'єднань. При крекінгу окрім легких вуглеводнів утворюються складні і тяжкі вуглеводні - гудрон і напівгудрон, а також тверді речовини - асфальтени, карбени і карбоїди.

Мазут, що виробляється при неглибокій переробці нафти, зветься *прямогоним мазутом*, при глибокій переробці нафти - *крекінг-мазутом*.

Стандартом встановлені наступні марки мазутів :

мазут флотський Ф - 5 і Ф - 12;

мазут топковий М - 40 ; М – 100; М – 200.

**Умовна в'язкість (ВУ)** - відношення часу витікання 200 мл продукта при температурі 50 °С до часу витікання 200 мл дистильованої води при температурі 20 °С. Марка мазуту характеризує максимальне значення *умовної в'язкості (ВУ)* при температурі 50 °С.

Флотські мазути Ф - 5 і Ф - 12 відносяться до категорії *легких* палив, топковий мазут марки М - 40 - до категорії *середніх* палив, топкові мазути марки М - 100 і М - 200 - до категорії *тяжких* палив.

В межах марок, в залежності від вмісту *сірки*, топкові мазути поділяються на три сорта:

малосірчисті ( $S^p \leq 0,5 \%$ );

сірчисті ( $S^p = (0,5 \dots 2,0) \%$ );

високосірчисті ( $S^p = (2,5 \dots 3,5) \%$ , не більш 4,3 %).

Мазут складається з п'яти основних елементів : *вуглецю, водня, сірки, кисню і азоту*. *Мінеральні домішки* в мазутах

представляють собою солі лужних металів, а також продукти корозії резервуарів. Зольність топкових мазутів (А) дуже незначна і звичайно не перевищує 0,1 %. Вміст *води* (W) в мазутах вагається в межах (0,5...5) %, а в окремих випадках і вище. Значне обводнення мазуту відбувається при розігріві його гострою парою. При спалюванні обводнених мазутів зменшується температура горіння і знижується ККД котельної установки.

**В'язкість мазуту** є важливішою його характеристикою. Вимірюється в одиницях *умовної в'язкості* (ВУ). В'язкість визначає умови транспортування, способи зливних операцій і ефективність роботи *форсунок*.

В'язкість мазуту з підвищенням температури сильно зменшується. Притому, для мазутів М - 40 і М - 100 різниця в підігріві повинна складати всього 20 °С (104 °С і 124 °С) для отримання однакової в'язкості перед форсункой.

Із зростанням тиску в'язкість мазуту підвищується. Звичайно користуються відносною щільністю (по відношенню до щільності води при температурі 20 °С), яка складає  $\rho_{20} = (0,95...1,06) \text{ кг/м}^3$ .

Щільність визначає умови відстоювання води із мазутів і осадження механічних домішок. При малій щільності мазуту відстоювання від води протікає швидко і не перевищує (100...200) годин. При відносній щільності біля  $1,05 \text{ кг/м}^3$  мазут розташовується в резервуарах під шаром води і відстоювання неможливо.

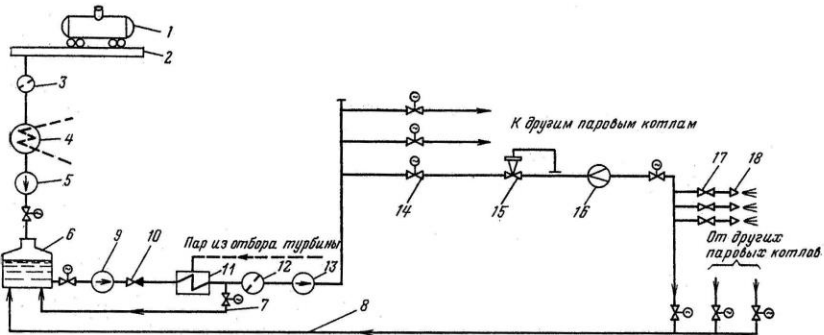
Для перекачування мазуту і зливу його, температура повинна бути не нижче (60...70) °С, що забезпечує в'язкість  $\sim 30$  ВУ.

Мазут має реологічні властивості, тобто здатність налипати на вертикальні стінки судин, в яких він знаходиться. При температурі 70 °С стінки повністю очищуються від мазуту.

**Технологічна схема** підготовки мазуту (рис. 3.2) на електростанції включає приймально-зливний пристрій - 2; основні резервуари для збереження постійного запасу мазуту - 6; мазутонасосну систему; систему трубопроводів для мазуту і пари; групу підігрівачів і фільтрів.

Мазут перед спалюванням необхідно підготувати : видалити механічні домішки, підвищити тиск і підігріти для тонкого розпилювання. Температура в баках підтримується на рівні (60...80) °С за рахунок циркуляційного підігріву.

Типовою є двоступенева схема, що передбачає підвищення тиску насосами 9 і 13. Очищення мазуту від твердих фракцій відбувається поетапно: в фільтрах грубого очищення - 3 з розміром осередків  $1,5 \times 1,5 \text{ мм}^2$ , а потім в фільтрах тонкого очищення - 12 з осередками (0,3...0,5) мм перед насосами другої ступені - 13.



- 1 - цистерна з мазутом; 2 - зливний пристрій; 3 - фільтр грубого очищення; 4 - зливний резервуар з підігрівом; 5 - перекачуючий насос; 6 - основний резервуар; 7, 8 - лінії рециркуляції мазуту; 9 - насос першого підйому; 10 - зворотний клапан; 11 - підігрівач мазуту; 12 - фільтр тонкого очищення; 13 - насос другого підйому; 14 - запорна засувка; 15 - регулятор витрати; 16 - витратомір; 17 - засувка форсунки; 18 - форсунки

Рисунок 3.2– Технологічна схема підготовки мазуту на електростанції

Теплота згоряння зневодненого мазуту вагається в межах від 39 МДж/кг до 41,5 МДж/кг. Теплота згоряння залежить від співвідношення головних горючих елементів С, Н, а також від вмісту S, О і N. Наявність в складі смол і асфальтів знижує теплоту згоряння мазуту. Теплота згоряння розраховується по формулі Д.І. Менделєєва (похибка не більш 2 %).

Температура спалаху мазуту – температура, при якій пари мазуту спалахують при контактi з відкритим полум'ям. Прямогонні мазути мають температуру спалаху (135...235) °С, парафіністі - біля

60 °С. Для уникнення пожежі, температура підігріву мазуту в відкритих системах повинна бути нижче температури спалаху.

При зменшенні температури відбувається *загусання мазуту*. При *температурі застигання* мазут загусає настільки, що в пробірці при її нахилі під кутом 45° рівень залишається нерухомим на протязі однієї хвилини. Високою температурою застигання характеризуються мазути з великим вмістом парафінів. Температура застигання визначає вибір технологічної схеми збереження мазуту і його транспортування.

### 3.3 Класифікація газоподібних палив

В енергетиці в якості газового палива використовується *природний газ*.

В промисловій енергетиці знаходять застосування різні види штучних горючих газів.

Для енергетики важливішими характеристиками газового палива є *теплота згоряння, щільність, концентраційні межі вибуховості* газу в суміші із повітрям.

Щільність природного газу при нормальних умовах складає 0,74 кг/м<sup>3</sup>.

Концентраційні межі вибуховості характеризують діапазон концентрацій, в межах яких ці суміші здатні вибухати при наявності джерела запалювання. Для природного газу в суміші із повітрям концентраційні межі вибуховості складають (5...15) %.

**Природним газом** є газові суміші, що видобуваються з земних надр і складаються в основному із *метана* і інших вуглеводнів (*етана, пропана, бутана і ін.*).

**Попутний газ** отримують при розробці нафтових родовищ в процесі десорбції розчинених в нафті газів. Вихід попутного газу складає (50...60) м<sup>3</sup> на 1 тону нафти, що видобувається. Для попутного газу характерно високий (до 50 %) вміст вищих вуглеводнів.

**Газ газоконденсатних родовищ** вміщає окрім метана до 10 % вищих вуглеводнів, пропана і бутана.

**Баласт** природного газу представлено переважно азотом і діоксидом вуглецю. Більшість родовищ дає паливо, що практично не вміщає сірчистих з'єднань.

Природний газ перед подаванням в магістральні трубопроводи піддається переробці на спеціальних заводах:

- очищення від сірководня і діоксида вуглецю;
- вилучення вищих вуглеводнів;
- осушення;
- одоризація.

*Одоризація* - придання газу різкого запаху, здійснюється введенням меркаптанов (сірчистих з'єднань), для виявлення присутності газу в повітрі.

*Теплота згоряння* природного газу знаходиться в межах  $Q_n^c = (33...38) \text{ МДж/м}^3$ , і вона тим вище, чим більше вищих вуглеводнів вміщується в газі.

*Штучним паливом* є горючі гази, що отримуються в різноманітних технологічних процесах: в металургії, при переробці нафти, при переробці твердих горючих копалин.

В доменному виробництві на кожну тунну виплавленого чугуна отримується біля  $(2200...3000) \text{ м}^3$  *доменного газу* з теплою згоряння  $Q_n^c = (3,5...4) \text{ МДж/м}^3$ , що містить  $(25...30) \%$  токсичного оксиду вуглецю  $\text{CO}$  і  $(2...3) \%$  водню  $\text{H}_2$ .

При виробництві металургійного коксу на кожну тунну коксу отримують  $\sim 300 \text{ м}^3$  *коксівого газу* з теплою згоряння біля  $(17...18) \text{ МДж/м}^3$ , що містить водню  $\text{H}_2 \approx 60 \%$ , метану  $\text{CH}_4 \approx 25 \%$ , оксиду вуглецю  $\text{CO} \approx 6 \%$ .

## ЛЕКЦІЯ 4. ГОРІННЯ ПАЛИВ

### 4.1 Поняття про горіння палив

Горіння палива є окислювальним процесом, що протікає між горючими речовинами палива і окислювачем, в якості якого найчастіше використовується кисень повітря. При розгляді процесів горіння приймаємо, що у склад повітря входять (в об'ємних відсотках) 21 %  $O_2$  і 79 %  $N_2$ , тобто кисню і азоту відповідно.

Горіння палив протікає з великими швидкостями з виділенням величезної кількості теплоти, чим і відрізняється від окислювального процесу пригнитті органічних речовин.

Становлення науки про горіння пов'язане з розвитком хімії, фізики і фізичної хімії. У 1661 році Роберт Бойль пояснював горіння як передачу вогненної матерії випалюваному металу. На початку XVIII ст. М.В.Ломоносов показав, що в горінні бере участь повітря. У 1773 р. Лоран Лавуазьє показав, що повітря складається з азоту, який не бере участі в горінні, і кисню, який з'єднується з речовиною в процесах горіння. З тих пір горіння отримало теоретичну основу, на базі якої розвивається в даний час.

Подальший розвиток науки про горіння пов'язаний з роботами Д.І.Менделєєва, який створив методи розрахунку процесів горіння. У розвитку сучасної теорії горіння видне місце належить вченим: Н.Н.Семенову, А.С.Предводителюву, Г.Ф.Кнорре, Л.Н.Хитріну.

Під керівництвом академіка Семенова Н.Н. розроблялась теорія ланцюгових реакцій, теорія горіння і детонації газів. Кнорре Г.Ф. плідно працював в області вивчення топкових процесів. Предводителювим А.С. успішно велися роботи в області горіння вуглецю.

Не дивлячись на досвід в області горіння, питання горіння ще вимагають значного вивчення.

### 4.2 Основні стехеометричні рівняння повного і неповного горіння

Для забезпечення горіння палива необхідно витримати особливі умови, якими є:

- підтримка в зоні горіння високої температури;

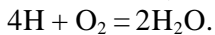
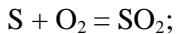
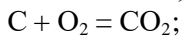
- забезпечення безперервної подачі в зону горіння палива і повітря;
- забезпечення хорошого їх перемішування;
- організація безперервного відведення продуктів згорання із зони горіння.

В загальному випадку процес окислення горючих складових палива представляє складне явище, точний опис якого простими рівняннями не представляється можливим. Проте, основні величини, що цікавлять нас, такі як:

- необхідна кількість повітря, що бере участь в горінні;
- кількість продуктів згорання, що утворилися;
- кількість теплоти, що виділилася, можуть бути представлені стехеометричними рівняннями хімічних реакцій.

Під *теоретично необхідною* кількістю повітря розуміють кількість повітря, що необхідно для повного окислення 1 кг твердого, 1 кг рідкого або 1 м<sup>3</sup> газоподібного палива. При цьому вважають, що кисень також витрачається на окислення горючих компонентів.

Витрату кисню і кількість продуктів згорання розраховують із *стехеометричних рівнянь* реакцій горіння, що записані для кожного горючого елемента, тобто вуглеця, сірки і водня:



Із співвідношення молекулярних мас елементів слідує, що на один кілограм вуглецю потрібно 32/12 кілограмів кисню, на 1 кг сірки потрібно 32/32 кілограмів кисню, на 1 кг водню потрібно 32/4=8 кілограмів кисню. Доля відповідних горючих елементів в 1 кілограмі твердого або рідкого палива складає відповідно:  $C^P/100$ ;  $S^P/100$ ;  $H^P/100$ . Щільність кисню при нормальних умовах

$$\rho_{O_2}^* = 32/22,4 = 1,429 \text{ кг/м}^3.$$

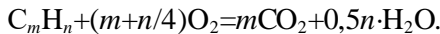
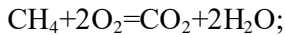
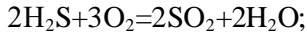
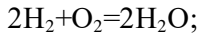
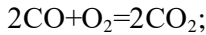
Тоді сумарний об'єм кисню, що необхідний для повного окислення горючих елементів палива  $V_{O_2}$ , складе, м<sup>3</sup>/кг

$$V_{O_2} = \frac{32}{12 \cdot 100 \rho_{O_2}} C^p + \frac{32}{32 \cdot 100 \rho_{O_2}} S^p + 8 \frac{H^p}{100 \rho_{O_2}} - \frac{O^p}{100 \rho_{O_2}}. \quad (4.1)$$

Враховуючи, що в об'ємі повітря міститься 21 % кисню, потрібно подати  $100/21 = 4,76$  м<sup>3</sup> повітря, щоб в ньому знаходився 1 м<sup>3</sup> кисню. Підставляючи чисельне значення для щільності кисню (1,429 кг/м<sup>3</sup>), отримаємо вираз для розрахунку *теоретично необхідної кількості повітря*  $V^0$  при спалюванні твердого або рідкого палива у вигляді, м<sup>3</sup>/кг

$$V^0 = 0,0889(C^p + 0,375S^p) + 0,265H^p - 0,0333O^p. \quad (4.2)$$

Теоретично необхідний об'єм кисню для окислення 1 м<sup>3</sup> газоподібного палива розраховують по стехеометричним рівнянням реакцій для газоподібних компонентів палива:



На окислення одного об'єму оксида вуглецю і водня потрібно по пів -об'єму кисню; на окислення одного об'єму сірководня потрібно півтора об'єму кисню; на окислення одного об'єму метана потрібно два об'єми кисню; на окислення одного об'єму вуглеводню складу  $C_mH_n$  потрібно  $(m+n/4)$  об'єму кисню. Перекладаючи процентний вміст газоподібних компонентів в долі (1/100) і враховуючи об'ємний вміст кисню в повітрі ( $100/21=4,76$ ), отримаємо вираз для розрахунку теоретично необхідного об'єму повітря  $V^0$  для окислення 1 м<sup>3</sup> газоподібного палива у вигляді, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

$$V^0 = 0,0476 \left( 0,5H_2 + 0,5CO + 1,5H_2S + 2CH_4 + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) C_mH_n - O_2 \right). \quad (4.3)$$

Для забезпечення повного вигорання палива в топці котла повітря подають з запасом, в кількості, завжди кілька більшою за теоретично необхідну. Відношення дійсно поданої кількості повітря

$V_B$  до теоретично необхідної кількості повітря  $V^0$  називають коефіцієнтом надлишку повітря

$$\alpha = V_B / V^0.$$

$\alpha$  визначається видом спалюваного палива та видом топкового пристрою. Так, для спалювання газу і мазуту  $\alpha = (1,05...1,15)$ ; а для твердого палива при факельному спалюванні  $\alpha = (1,15...1,25)$ ; при шаровому спалюванні  $\alpha = (1,25...1,35)$ . Для промислових установок використовують термін - *коефіцієнт витрати повітря*, тобто  $\alpha = V_B / V^0$  може бути і менше 1.

В результаті горіння палива утворюються об'єми вуглекислого газу  $V_{CO_2}$ ; сірчистого газу  $V_{SO_2}$ ; водяної пари  $V_{H_2O}$ ; а оскільки окислення здійснюється повітрям, то утворюється ще об'єм азоту  $V_{N_2}$ . Таким чином об'єм димових газів визначається

$$V_{\Gamma} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} \text{ - при повному згорянні;}$$

$$V_{\Gamma} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{CO} \text{ - при неповному згорянні.}$$

Задачею є звести  $V_{CO}$  до нуля.

$$V_{CO_2} + V_{SO_2} = V_{RO_2} \text{ - об'єми трьохатомних газів.}$$

Теоретичні об'єми позначаються індексом «0», тобто

$$V_{\Gamma}^0 = V_{RO_2}^0 + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 \text{ - при повному згорянні;}$$

$$V_{\Gamma}^0 = V_{RO_2}^0 + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 + V_{CO}^0 \text{ - при неповному згорянні}$$

### 4.3 Приклади

4.3.1. Визначити теоретичний об'єм повітря, що необхідний для спалювання 1 кг твердого палива.

Паливо - вугілля Кузнецького басейну.

Елементарний склад робочої маси палива занесений до таблиці

4.1.

Таблиця 4.1 - Елементарний склад робочої маси палива, %

W <sup>p</sup>	A <sup>p</sup>	S <sup>p</sup> <sub>op</sub>	S <sup>p</sup> <sub>k</sub>	C <sup>p</sup>	H <sup>p</sup>	N <sup>p</sup>	O <sup>p</sup>
13,0	21,8	1,5	1,5	49,3	3,6	1,0	8,3

Теоретичний об'єм повітря, м<sup>3</sup>/кг

$$V_{\text{в}}^{\circ} = 0,0889(C^p + 0,375S_{\text{op+k}}^p) + 0,265H^p - 0,0333O^p = \\ = 0,0889(49,3 + 0,375 * 3,0) + 0,256 * 3,6 - 0,0333 * 8,3 = 5,16.$$

4.3.2. Визначити теоретичний об'єм повітря, що необхідний для спалювання 1 кг рідкого палива.

Паливо - мазут малосірчистий.

Таблиця 4.2 - Елементарний склад робочої маси палива, %

W <sup>p</sup>	A <sup>p</sup>	S <sup>p</sup> <sub>op+k</sub>	C <sup>p</sup>	H <sup>p</sup>	N <sup>p</sup> +O <sup>p</sup>
3,0	0,05	0,3	84,65	11,7	0,3

Теоретичний об'єм повітря, м<sup>3</sup>/кг

$$V_{\text{в}}^{\circ} = 0,0889(C^p + 0,375S_{\text{op+k}}^p) + 0,265H^p - 0,0333O^p = \\ = 0,0889(84,65 + 0,375 * 0,3) + 0,256 * 11,7 - 0,0333 * 0,3 = 10,62.$$

4.3.3. Визначити теоретичний об'єм повітря необхідного для спалювання 1 м<sup>3</sup> природного газу.

Паливо - природний газ

Таблиця 4.3 - Елементарний склад сухого об'єму палива, %

CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
84,5	3,8	1,9	0,9	0,3	7,8	0,8

Теоретичний об'єм повітря, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

$$\begin{aligned}
 V_{\text{в}}^{\circ} &= 0,0476[0,5\text{CO}+0,5\text{H}_2+1,2\text{H}_2\text{S}+\sum (m+n/4) \text{C}_m\text{H}_n-\text{O}_2] = \\
 &= 0,0476[(1+4/4)*84,5+(2+6/4)*3,8+(3+8/4)*1,9+(4+10/4)*0,9+ \\
 &+(5+12/4)*0,3]=9,52.
 \end{aligned}$$

#### 4.4 Об'єм продуктів згоряння

При теплових розрахунках котла *ентальнію* продуктів згоряння за кожною поверхнею нагрівання визначають по складу димових газів і температурі. Необхідно розраховувати також об'єм продуктів згоряння. Реакції горіння при високих температурах йдуть з великою швидкістю, тому склад кінцевих продуктів близький до рівноважного складу.

Склад продуктів згоряння при спалюванні 1 кг твердого або рідкого палива чи 1 м<sup>3</sup> газоподібного можна записати внаступному вигляді

$$V_{\Gamma} = V_{\text{полн.гор}} + V_{\text{ост.возд+н}_2\text{о}} + V_{\text{неполн.гор}}$$

чи

$$V_{\Gamma} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{CO}} + V_{\text{H}_2} + V_{\text{CH}_4} \cdot (4.4)$$

Перші три доданки представляють собою *продукти повного окислення* горючих елементів палива. Вони складаються з трьохатомних сухих газів, що обозначені  $V_{\text{RO}_2} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2}$ , і об'єму водяних парів  $V_{\text{H}_2\text{O}}$ .

Наступні три доданки представляють собою об'єми азоту і кисню, що визначаються як *залишок сухого повітря* після горіння палива і об'єм водяних парів  $V_{\text{H}_2\text{O}}$  з вологи палива і повітря. Тут  $V_{\text{N}_2} \gg V_{\text{O}_2}$ , так як кисень в основному витрачено на окислення.

Останні три доданки представляють собою *продукти неповного горіння*.

При *повному згорянні* 1 кг твердого або рідкого палива чи 1 м<sup>3</sup> газоподібного, горючі компоненти відсутні і  $V_{CO} = V_{H_2} = V_{CH_4} = 0$ .

При відсутності надлишкового повітря утворюються лише *продукти повного окислення* горючих елементів CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O і присутній азот повітря N<sub>2</sub> (кисень відсутній). Об'єм газів  $V_r^0$ , що утворюється в цьому випадку, називають *теоретичним об'ємом продуктів згорання*

$$V_r^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0. \quad (4.5)$$

Теоретичний об'єм сухих *трьохатомних газів* (без H<sub>2</sub>O) при спалюванні твердого і рідкого палива складе, м<sup>3</sup>/кг

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2};$$

$$V_{RO_2} = \frac{32}{12} \frac{C^P}{100\rho_{O_2}} + \frac{32}{32} \frac{S^P}{100\rho_{O_2}} = 0,01866(C^P + 0,375S^P). \quad (4.6)$$

При *спалюванні сланців* к ньому додається об'єм продуктів розкладення карбонатів кальція і магнія, що містяться в мінеральній частині палива, м<sup>3</sup>/кг,

$$V_{RO_2,сл} = V_{RO_2} + \kappa \cdot 0,509 \frac{(CO_2)_{сл}^P}{100}, \quad (4.7)$$

де  $\kappa$  - коефіцієнт розкладення карбонатів, що дорівнює:

- $\kappa=1$  при камерному спалюванні сланців;
  - $\kappa=0,7$  при шаровому спалюванні;
- 0,509 - вихід CO<sub>2</sub> із 1 кг карбонатної вуглекислоти.

При спалюванні *газоподібного палива* об'єм сухих трьохатомних газів складе, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

$$V_{RO_2} = 0,01(CO + CO_2 + H_2S + CH_4 + \sum m C_m H_n + SO_2). \quad (4.8)$$

Теоретичний об'єм азоту:

при спалюванні твердого і рідкого палива, м<sup>3</sup>/кг

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + \frac{N^P}{\rho_{N_2} \cdot 100} = 0,79V^0 + 0,008N^P; \quad (4.9)$$

- при спалюванні газоподібного палива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + 0,01N_2. \quad (4.10)$$

Теоретичний об'єм водяних парів включає чотири доданки:

- волога, що утворюється при окисленні водню палива;
- волога палива в газоподібному стані;
- волога повітря;
- пара на розпилювання мазуту в форсунках.

$$V_{H_2O}^0 = \frac{9H^P}{100\rho_{H_2O}} + \frac{W^P}{100\rho_{H_2O}} + \frac{d_B V^0 \rho_B}{\rho_{H_2O}} + \frac{G_\Phi}{\rho_{H_2O}} = \quad (4.11)$$

$$= 0,111H^P + 0,0124W^P + 0,016IV^0 + 1,24G_\Phi,$$

де  $d_B$  – вологовміст, що приймається в розрахунках рівним 0,01 кг/кг;

$\rho_B$  и  $\rho_{H_2O}$  – щільність повітря і водяних парів відповідно, м<sup>3</sup>/кг;

$G_\Phi$  – питома витрата пари на розпилювання мазуту (звичайно складає 0,3 кг/кг при використанні парових форсунок).

При спалюванні газоподібного палива теоретичний об'єм водяних парів складе, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

$$V_{H_2O}^0 = 0,01 \left[ H_2 + H_2S + 2CH_4 + \sum \frac{n}{2} C_m H_n + H_2O \right]. \quad (4.12)$$

Надлишкова кількість повітря, що подається на практиці, приводить до збільшення в продуктах згоряння об'єму азота

$$V_{N_2} = V_{N_2}^0 + 0,79(\alpha - 1)V^0$$

і об'єму водяних парів

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha - 1)V^0.$$

Крім того, в продуктах згоряння з'являється *кисень*

$$V_{O_2} = 0,21(\alpha - 1)V^0.$$

Таким чином, дійсний об'єм продуктів згоряння може бути розрахований так,  $m^3/kg$  ( $m^3/m^3$ )

$$V_{\Gamma} = V_{\Gamma}^0 + 1,0161(\alpha - 1)V^0. \quad (4.13)$$

Об'єм сухих газів,  $m^3/kg$  ( $m^3/m^3$ )

$$V_{\text{сг}} = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + (\alpha - 1)V^0. \quad (4.14)$$

Об'ємна доля будь-якого компонента в сухих продуктах згоряння

$$r_i = \frac{V_i}{V_{\text{сг}}}. \quad (4.15)$$

Масовий вихід будь-якого компонента, наприклад, діоксиду сірки,  $kg/год$

$$M_{SO_2} = \rho_{SO_2} r_{SO_2} V_{\text{сг}} B, \quad (4.16)$$

де  $B$  – масова витрата палива,  $kg/год$ .

Дійсний об'єм димових газів визначається при  $\alpha > 1$ . У зв'язку з тим, що в топку подається більше повітря, змінюється склад димових газів на величину надлишкового повітря, поданого в топку  $\Delta V_{\epsilon}$

$$\Delta V_{\epsilon} = V_{\epsilon} - V_{\epsilon}^0 = \alpha V_{\epsilon}^0 - V_{\epsilon}^0 = (\alpha - 1)V_{\epsilon}^0;$$

$$V_{\Gamma} = V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O} + V_{O_2}^{изб};$$

$$V_{RO_2} = V_{RO_2}^0;$$

$$V_{N_2} = V_{N_2}^0 + \Delta V_{N_2} = V_{N_2}^0 + 0,79\Delta V_{\epsilon}^0 = V_{N_2}^0 + 0,79(\alpha - 1)V_{\epsilon}^0;$$

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + \Delta V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + \frac{d \cdot \Delta V_{\epsilon}^0 \rho_{\epsilon}}{1000 \cdot \rho_{H_2O}}.$$

$$\text{При } d = 10 \text{ г/м}^3 \quad V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha - 1)V_{\epsilon}^0;$$

$$V_{O_2} = 0,21\Delta V_{\epsilon} = 0,21(\alpha - 1)V_{\epsilon}^0;$$

$$V_{\Gamma} = V_{RO_2}^0 + V_{N_2}^0 + 0,79(\alpha - 1)V_{\epsilon}^0 + V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha - 1)V_{\epsilon}^0 + 0,21(\alpha - 1)V_{\epsilon}^0$$

$$V_{\Gamma} = \underbrace{V_{RO_2}^0 + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0}_{V_{\epsilon}^0} + 0,79(\alpha - 1)V_{\epsilon}^0 + 0,0161(\alpha - 1)V_{\epsilon}^0 + 0,21(\alpha - 1)V_{\epsilon}^0$$

$$V_{\Gamma} = V_{\Gamma}^0 + 1,0161(\alpha - 1)V_{\epsilon}^0.$$

Зазвичай газовий тракт котла працює під розрідженням, у зв'язку з цим  $\alpha$  змінюється по газоходах. Присос повітря в топку складає 5 % від  $V_{\epsilon}^0$ :  $\Delta\alpha_T = 0,05$ . В газоходах котла при розміщенні в них змієвикових поверхонь нагріву величина присосів складає  $\Delta\alpha = (0,01...0,03)$  і в трубчастих повітропідігрівачах приймається при розрахунках  $\Delta\alpha = 0,05$ . Коефіцієнт присосу повітря за поверхнею нагріву визначається сумою коефіцієнта присосу повітря перед поверхнею нагріву і величиною присосу в ній, як показано на рисунку 4.1.

$$\alpha''_T = \alpha'_T + \Delta\alpha_T.$$

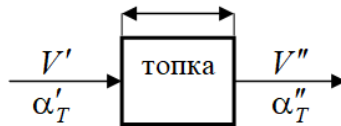


Рисунок 4.1

Середні об'єми повітря і продуктів згоряння розраховуються по середньому коефіцієнту

$$\alpha_{cp} = \frac{\alpha'_T + \alpha''_T}{2}.$$

Зазвичай, для камерних топках котлів  $\alpha$  визначається по Нормам теплового розрахунку [29] на виході з топки  $\alpha''_T$  (перед фестоном), тоді коефіцієнт надлишку повітря на вході в топку визначається по формулі

$$\alpha'_T = \alpha''_T - \Delta\alpha_T.$$

Середні значення коефіцієнтів надлишку повітря по інших поверхнях нагріву визначаються аналогічно. Зрештою отримуємо

$$\alpha_{yx} = \alpha''_T + \sum \Delta\alpha_{прис}.$$

Розрахунки дійсних об'ємів продуктів згоряння здійснюються для вибраної по рекомендаціях  $\alpha_{топки}$  і присосів холодного повітря  $\Delta\alpha$  в окремих ділянках газового тракту котла.

Якщо спалюється  $B$  кг/с ( $м^3/с$ ) палива, то загальна кількість поданого за нормальних умов повітря визначається,  $\frac{м^3}{с}$

$$V_e = \alpha \cdot V_e^0 \cdot B.$$

Приклади (використані розрахунки з попередніх прикладів).  
Теоретичний об'єм продуктів згоряння твердого палива,  $м^3/кг$ :

-об'єм азоту

$$V_{N_2}^0 = 0,79V_{B_0} + 0,8N^p/100 = 0,79 \cdot 5,16 + 0,8 \cdot 1,0/100 = 4,08;$$

- об'єм трьохатомних газів

$$V^{\circ}_{\text{RO}_2} = 0.01866(C^p + 0.375S^p_{\text{оп+к}}) = 0.01866(49,3 + 0,375 * 3,0) = 0,94;$$

- об'єм водяної пари

$$V^{\circ}_{\text{H}_2\text{O}} = 0.111\text{H}^p + 0.0124\text{W}^p + 0.0161V^{\circ}_{\text{B}} = 0.111 * 3,6 + 0,0124 * 13,0 + 0,0161 * 5,16 = 0,6;$$

- об'єм димових газів

$$V^{\circ}_{\text{r}} = V^{\circ}_{\text{N}_2} + V^{\circ}_{\text{RO}_2} + V^{\circ}_{\text{H}_2\text{O}} = V^{\circ}_{\text{r}} = 4,08 + 0,94 + 0,64 = 5,67.$$

Теоретичний об'єм продуктів згоряння мазуту, м<sup>3</sup>/кг

- об'єм азоту

$$V^{\circ}_{\text{N}_2} = 0.79V^{\circ}_{\text{B}} + 0.8\text{N}^p/100 = 0.79 * 10,62 + 0,8 * 0,3/100 = 8,39;$$

- об'єм трьохатомних газів

$$V^{\circ}_{\text{RO}_2} = 0.01866(C^p + 0.375S^p_{\text{оп+к}}) = 0.01866(84,65 + 0,375 * 0,3) = 1,58;$$

- об'єм водяної пари

$$V^{\circ}_{\text{H}_2\text{O}} = 0.111\text{H}^p + 0.0124\text{W}^p + 0.0161V^{\circ}_{\text{B}} = 0.111 * 11,7 + 0,0124 * 3 + 0,0161 * 10,62 = 1,51;$$

- об'єм димових газів

$$V^{\circ}_{\text{r}} = V^{\circ}_{\text{N}_2} + V^{\circ}_{\text{RO}_2} + V^{\circ}_{\text{H}_2\text{O}} = 8,39 + 1,58 + 1,51 = 11,48.$$

Теоретичний об'єм продуктів згоряння природного газу, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

- об'єм азоту

$$V^{\circ}_{\text{N}_2} = 0.79V^{\circ}_{\text{B}} + \text{N}^p/100 = 0.79 * 9,96 + 7,8/100 = 7,6;$$

- об'єм трьохатомних газів

$$V^{\circ}_{\text{RO}_2} = 0.01(\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{S} + \sum mC_m\text{H}_n) = 0.01(0,8 + 1 * 84,5 + 2 * 3,8 + 3 * 1,9 + 4 * 0,9 + 5 * 0,3) = 1.04;$$

- об'єм водяної пари

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ} = 0.01(\text{H}_2\text{S} + \text{H}_2 + \sum n/2\text{C}_m\text{H}_n + 0.124d_{\text{г.тл}}) + 0.0161V_{\text{в}}^{\circ},$$

де  $d_{\text{г.тл}}$  - вологовміст газу, приймаємо  $d_{\text{г.тл}} = 1,9 \text{ г/м}^3$  ;

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ} = 0,01 * (4/2 * 84,5 + 6/2 * 3,8 + 8/2 * 1,9 + 10/2 * 0,9 + 12/2 * 0,3 + 0,124 * 1,9) + 0,0161 * 9,52 = 2,1;$$

- об'єм димових газів

$$V_{\text{г}}^{\circ} = V_{\text{N}_2}^{\circ} + V_{\text{RO}_2}^{\circ} + V_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ} = 7,6 + 1,04 + 2,1 = 10,73 .$$

## ЛЕКЦІЯ 5. ЕНТАЛЬПІЯ ПРОДУКТІВ ЗГОРЯННЯ

### 5.1 Розрахунок ентальпії продуктів згоряння палива (димових газів)

При горінні палива утворюються гарячі об'єми димових газів. Вважається, що вся хімічна енергія палива, що виділилася при згорянні, йде на підвищення ентальпії газоподібних продуктів згоряння. Розрахунок ентальпії продуктів згоряння палива для котлів відбувається не на  $1 \text{ м}^3$  об'єму газів, а на  $1 \text{ кг}$  твердого або рідкого палива чи на  $1 \text{ м}^3$  газоподібного палива.

Ентальпія продуктів згоряння складається з трьох доданків: ентальпії теоретичних продуктів згоряння  $I_{\Gamma}^{\circ}$ , ентальпії надлишкового повітря  $(\alpha - 1)I_{\text{в}}^{\circ}$  і ентальпії золи  $I_{\text{зл}}$ , кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>)

$$I_{\Gamma} = I_{\Gamma}^{\circ} + (\alpha - 1)I_{\text{в}}^{\circ} + I_{\text{зл}}. \quad (5.1)$$

Ентальпія продуктів згоряння вище ентальпії повітря на (15...20) % через присутність трьохатомних газів ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ), що мають високу теплоємність.

Ентальпія теоретичної кількості продуктів згоряння  $I_{\Gamma}^{\circ}$  при температурі  $t$ , °С, розраховується як сума ентальпій складових газів, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>)

$$I_{\Gamma}^{\circ} = V_{\text{RO}_2} i_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 i_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 i_{\text{H}_2\text{O}}$$

або

$$I_{\Gamma}^{\circ} = V_{\text{RO}_2} (ct)_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 (ct)_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 (ct)_{\text{H}_2\text{O}}. \quad (5.2)$$

Температура продуктів згоряння  $t$ , °С в деяких літературних джерелах позначаються як  $v$  (тетта), °С.

Ентальпія теоретично необхідної кількості повітря, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>)

$$I_{\text{в}}^0 = V^0(ct)_{\text{в}}. \quad (5.3)$$

Ентальпія золи, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>)

$$I_{\text{зл}} = a_{\text{ун}} \frac{A^{\text{p}}}{100} (ct)_{\text{зл}}, \quad (5.4)$$

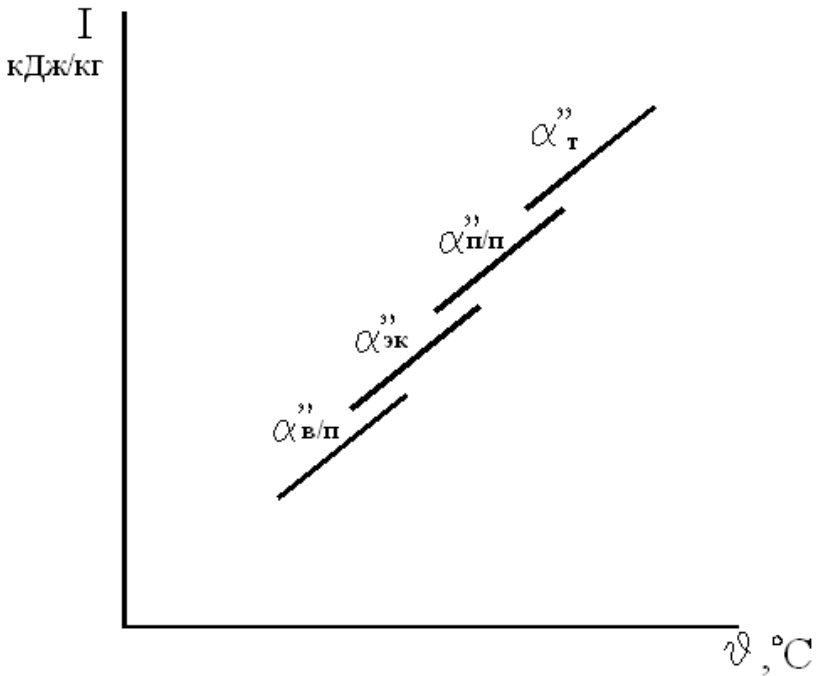
де  $a_{\text{ун}}$  – доля віднесеної золи враховується, якщо наведена величина віднесення золи з топки  $a_{\text{ун}} \cdot A^{\text{p}} / Q_{\text{н}}^{\text{p}}$  перевищує задану величину  $a_{\text{ун}} \cdot A^{\text{p}} / Q_{\text{н}}^{\text{p}} \geq 1,43$  (% кг)/МДж.

Всі формули підрахунку ентальпій відносяться до випадку повного згоряння, але вони можуть бути застосовані для випадку допущеної поза нормами хімічної неповноти згоряння.

Розрахунок ентальпій продуктів згоряння виконують для топки і всіх газоходів з урахуванням своїх коефіцієнтів надлишку повітря по кінцях поверхонь нагріву.

$\alpha'$	$\alpha''_{\text{Г}}$	$\alpha''_{\text{mn}}$	$\alpha''_{\text{э}}$	$\alpha''_{\text{en}}$
	Пароперегрівач	Економай- зер	П/П	
	$I''_{\text{Г}}$	$I''_{\text{mn}}$		

Внаслідок чого будують  $I - \mathcal{Q}$  – діаграму.

Рисунок 5.1 -  $I - Q$  - діаграма

Приклад.

Визначити ентальпію продуктів згорання палива (димових газів) при температурі  $100^{\circ}\text{C}$  і  $\alpha = 1,39$  наступного складу:

- теоретичні об'єми продуктів згорання:

1) об'єм азоту  $V_{\text{N}_2}^0 = 4,08 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;

2) об'єм трьохатомних газів  $V_{\text{RO}_2}^0 = 0,94 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;

3) об'єм водяної пари  $V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,64 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;

- теоретичний об'єм повітря  $V_{\text{в}}^0 = 5,16 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

При розрахунку ентальпій продуктів згорання і повітря користуються даними таблиці 5.1

Таблиця 5.1 - Ентальпії складових продуктів згорання і повітря

$\vartheta, ^\circ\text{C}$	$(C \vartheta)_{\text{RO}_2}$ кДж/м <sup>3</sup>	$(C \vartheta)_{\text{N}_2}$ кДж/м <sup>3</sup>	$(C \vartheta)_{\text{H}_2\text{O}}$ кДж/м <sup>3</sup>	$(C \vartheta)_{\text{B}}$ кДж/м <sup>3</sup>	$(C \vartheta)_{\text{з}}$ кДж/кг
100	169	130	151	132	81
200	357	260	304	226	169

**Ентальпія теоретичного об'єму повітря, кДж/кг**

$$I_{\text{B}}^{\circ} = V_{\text{B}}^{\circ} (C \vartheta)_{\text{B}} ;$$

$$I_{\text{B}100}^{\circ} = 5,16 * 132 = 684,7 .$$

**Ентальпія теоретичного об'єму продуктів згорання, кДж/кг**

$$I_{\text{r}}^{\circ} = V_{\text{RO}_2}^{\circ} (C \vartheta)_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^{\circ} (C \vartheta)_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ} (C \vartheta)_{\text{H}_2\text{O}} ;$$

$$I_{\text{r}100}^{\circ} = 0,94 * 169 + 4,08 * 130 + 0,64 * 151 = 788,3 .$$

**Ентальпія золи, кДж/кг**

$$I_{\text{з}}^{\circ} = a_{\text{yH}} A^{\text{p}} / 100 (C \vartheta)_{\text{з}} = B (C \vartheta)_{\text{з}} ;$$

При  $a_{\text{yH}} = 0,95$ .

$$B = 0,95 * 21,8 / 100 = 0,207 ;$$

$$I_{\text{з}100}^{\circ} = 0,207 * 81 = 16,8 .$$

**Ентальпія дійсного об'єму продуктів згорання, кДж/кг**

$$I_{\text{r}} = I_{\text{r}}^{\circ} + (\alpha - 1) \times I_{\text{B}}^{\circ} + I_{\text{з}} ;$$

$$I_{\text{r}100} = 788,3 + (1,39 - 1) * 684,7 + 16,8 = 1136,4 .$$

Температурою горіння палива називають ту температуру, якої набувають продукти згорання в результаті передачі їм теплоти, що виділилася при горінні.

В реальних умовах не вся теплота йде на нагрівання продуктів згоряння. Частина передається теплообміном поверхням, частина втрачається в навколишнє середовище, а при високих температурах частина теплоти витрачається на дисоціацію продуктів згоряння. При  $t = 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$  ступінь дисоціації  $\text{CO}_2$  складає 0,8 %. Далі з підвищенням температури вона швидко зростає, досягаючи 4 % при температурі  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$  і 19 % при  $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Температуру горіння для реальних умов можна визначити з теплового балансу горіння,  $\text{кДж/кг}$  ( $\text{кДж/м}^3$ )

$$Q_p^p = Q_n^p + Q_{\text{фТ}} + Q_{\text{фВ}},$$

$$Q_n^p + Q_{\text{фТ}} + Q_{\text{фВ}} = Q_1 + Q_d + I_{\text{Г}}, \quad (5.5)$$

де  $Q_p^p$  - наявна теплота;

$Q_{\text{фТ}}$  і  $Q_{\text{фВ}}$  - фізична теплота палива і повітря відповідно;

$Q_1$  - теплота, що віддана теплообмінними поверхнями і в навколишнє середовище;

$Q_d$  - теплота, що витрачена на дисоціацію;

$I_{\text{Г}}$  - ентальпія продуктів згоряння.

Підставляючи в вираз значення ентальпії продуктів згоряння  $I_{\text{Г}} = \sum V_i c_i t$  і перетворюючи його, отримуємо вираз для розрахунку температури горіння,  $^{\circ}\text{C}$

$$t = \frac{I_{\text{Г}}}{\sum V_i \cdot c_i}$$

або

$$t = \frac{Q_n^p + Q_{\text{фТ}} + Q_{\text{фВ}} - Q_1 - Q_d}{\sum V_i \cdot c_i} \quad (5.6)$$

Максимальне значення температури отримуємо при відсутності теплообміну, коли  $Q_1 = 0$ , тобто в адиабатних умовах. Температура горіння, що отримана в адиабатних умовах (максимальна), зветься теоретичною температурою горіння.

Розрахункове визначення *температури горіння* ускладнюється залежністю теплоємності і теплоти дисоціації від температури. Розрахунок можливо виконати лише з використанням методів послідовного наближення. Значення ентальпій продуктів згорання всіх видів палив, що розраховані з урахуванням теплоти дисоціації і залежності теплоємності продуктів згорання від температури, наведені в таблицях Нормативного методу розрахунку котельних установок [29].

Для визначення теоретичної температури горіння можна використовувати *метод ітерацій* або *графічний метод*. В останньому випадку будують графік залежності ентальпії продуктів згорання від температури для різних значень коефіцієнту надлишку повітря (рис. 5.2). Відкладаючи по вісі ординат значення наявної теплоти палива (що дорівнює ентальпії продуктів згорання) графічно визначають теоретичну температуру горіння при заданому коефіцієнті надлишку повітря.

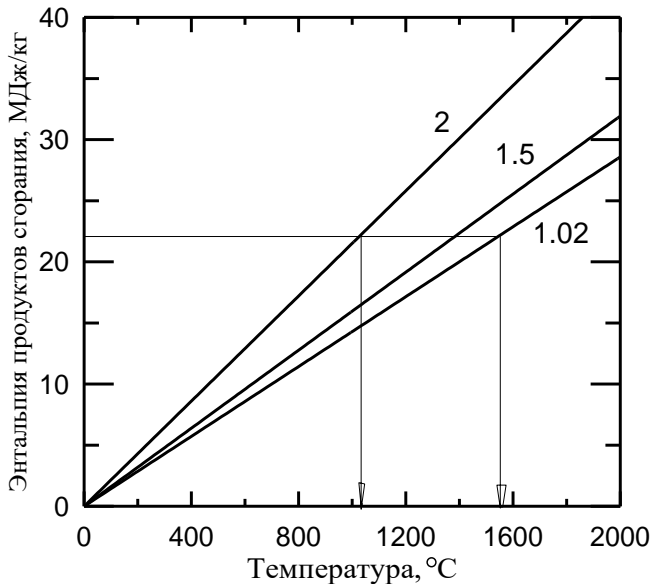


Рисунок 5.2 - Залежність ентальпії продуктів згорання від температури (цифри біля кривих – коефіцієнти надлишку повітря)

## ЛЕКЦІЯ 6. ТОПКОВІ ПРИСТРОЇ

### 6.1 Види топкових пристроїв

Газоподібне і рідке паливо спалюють в *факелі* в камерних топках. Також в факелі спалюється і пилоподібне тверде паливо.

Тверде паливо спалюють (рис. 6.1) в:

*шарових топках* (з щільним або киплячим шаром),

- *камерних топках*,

- *циклонних топках*.

В щільному фільтруючому шарі паливо спалюється за умови, що знизу подається повітря. Стійкість шару не порушується. На практиці в шарових топках спалюють тверде паливо з частками (20...30) мм і більше. Із зростанням розміру часток палива зростає стійкість шару, а зі зменшенням – зростає реакційна поверхня. Запас палива на решітці (годинний) визначає теплову інерцію і стійкість шарового процесу. Швидкість вигорання часток палива визначається швидкістю підведення окислювача, тому можливо регулювати шарові процеси зміною кількості повітря, що подається.

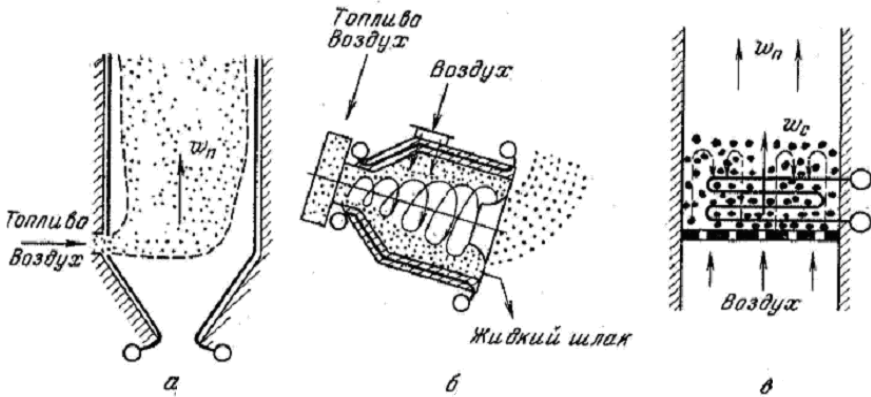
При спалюванні твердого палива в *киплячому шарі* (рис. 6.1, в) збільшення швидкості дуття приводить к порушенню стійкості шару, починається «кипіння» шару, тобто основна маса часток переходить в рухомий стан. В «киплячому шарі» величина швидкості дуття перевищує межу стійкості, але при цьому нижче швидкості витання часток шару. Спалювання палива в киплячому шарі має наступні переваги:

- зниження викидів оксидів азоту і сірки;

- забезпечення стійкого запалювання;

- можливість утилізації відходів із низькосортних видів палива.

При швидкості потоку, що перевищує швидкість витання часток, вони, виявляється, переміщуються разом з ним, згоряючи в польоті в межах топкової камери. Такий топковий процес зветься *факельним* (рис. 6.1, а). Час перебування часток в топці обмежено, тому паливо подрібнюють до пилоподібного стану ((100...200) мкм). Подрібнення палива збільшує поверхню реагування і полегшує транспорт часток в топці.



а – факельний (камерний) спосіб спалювання;  
 б – циклонний спосіб спалювання; в – спалювання палива в киплячому шарі

Рисунок 6.1 - Схеми організації спалювання твердого палива

Спалювання газового і рідкого палив також відбувається в *факельному процесі*. Газове паливо надходить в камеру разом з повітрям через спеціальний пристрій – пальник, який забезпечує їх гарне перемішування. Рідке паливо надходить в топку через *форсунки* в розпорошеному вигляді. Найдрібніші краплі палива випаровуються, пари палива змішуються в топці з повітрям і згорають.

При *циклонному топковому процесі* (рис. 6.1,б) транспорт часток подрібненого твердого палива відбувається повітряним потоком. На відміну від факельного процесу, частки циркулюють по організованому контуру, доки повністю не згорять. *Циркуляція* відбувається за рахунок відцентрових сил, що притискують частки до стінок циклонної камери. Час перебування часток і інтенсивність їх обдування значно збільшені, тому використовуються більш великі частки ((2...5)мм). Використання більш великих часток приводить до значних теплових напруг об'єму топки та дзеркала горіння.

Питома теплова напруга об'єму топки  $q_v$ , МВт/м<sup>3</sup>

$$q_v = \frac{N}{V} = \frac{BQ_H^p}{V}. \quad (6.1)$$

Теплова напруга дзеркала горіння  $q_f$ , МВт/м<sup>2</sup>, визначається за формулою

$$q_f = \frac{N}{F} = \frac{BQ_H^p}{F}.$$

Витрата повітря, що подається на спалювання, може бути розрахована за двома формулами

$$\begin{aligned} G_g &= B\alpha V^0 \\ \text{або } G_g &= Fw_{ny}, \end{aligned} \quad (6.2)$$

де  $w_{ny}$  – швидкість дуття, що приведена до нормальних умов.

Порівнюючи праві частини цих виразів, з виразу

$$G_g = B\alpha V^0 = Fw_{ny}$$

отримаємо співвідношення

$$B/F = w_{ny}/(\alpha \cdot V^0) \quad (6.3)$$

Підставляючи це співвідношення до виразу для теплових напруг дзеркала горіння, отримаємо

$$q_f = \frac{Q_H^p w_{ny}}{\alpha V^0}. \quad (6.4)$$

Відношення теплоти згоряння до теоретично необхідної кількості повітря, для більшості палив є величиною постійною і рівною приблизно, МДж/м<sup>3</sup>

$$\frac{Q_H^p}{V^0} = 3,8.$$

Тоді *теплові напруги* дзеркала горіння можна представити у вигляді, МВт/м<sup>2</sup>

$$q_f = 3,8 \frac{w_{ny}}{\alpha}. \quad (6.5)$$

Аналізуючи цей вираз, отримаємо, що для збільшення  $q_f$  необхідно спалювати паливо при мінімальних надлишках повітря з максимально можливою швидкістю дуття.

Рекомендовані значення теплових напруг дзеркала горіння і об'єму топки наведені в наступній таблиці.

Таблиця 6.1 - Рекомендовані значення теплових напруг

Топки	$q_F, \text{МВт/м}^2$	$q_V, \text{МВт/м}^3$	$W_{\text{HV}}, \text{м/с}$
шарові	2	0,2...0,4	~0,5
камерні	3,5...5	0,1...0,2	~1
циклонні	12...14	0,6...1,1	~3,5

## ЛЕКЦІЯ 7. ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ ЗВЕДЕННЯ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСУ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ

Ефективність використання палива в топковому пристрої визначається двома основними факторами:

- повнотою згоряння палива в топковій камері,
- глибиною охолодження продуктів згоряння.

Розподіл теплоти, що вноситься, на ту, що *корисно використовується*, і теплові *втрати*, здійснюється шляхом складання теплового балансу. *Тепловий баланс* складається на 1 кг твердого або рідкого палива чи на 1 м<sup>3</sup> газоподібного палива.

*Наявна теплота*, що вноситься в топку, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>)

$$Q_p^p = Q_H^p + Q_{в.вн} + i_T, \quad (7.1)$$

де  $Q_{в.вн}$  -теплота,що вноситься в топку повітрям, підігрітим поза котлом;

$i_T$  - фізична теплота палива,що визначається його температурою  $t_T$ ,

$$i_T = c_T t_T,$$

де  $c_T$  - питома теплоємність палива, кДж/(кг·К);

$t_T$  - температура палива, °С.

Обов'язковим є облік  $i_T$  при спалюванні мазуту, оскільки він підігрівається для розпилювання до температури (100...130) °С. Кількість теплоти, що отримана повітрям при його підігріві в зовнішній установці, визначають за формулою

$$Q_{в.вн} = \beta_B V^0 c_B (t'_B - t_{х.в}), \quad (7.2)$$

де  $\beta_B$  - відносна кількість повітря, що проходить через додаткову нагрівальну установку;

$c_B$  - теплоємність повітря;

$t'_B$  і  $t_{х.в}$  - температури повітря, що надходить до топки, і холодного повітря.

Наявна теплота витрачається на виробництво корисної теплоти  $Q_1$  і теплові втрати, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>)

$$Q_p^P = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \quad (7.3)$$

де  $Q_p^P$  – наявна теплота на 1 кг твердого або рідкого чи на 1 м<sup>3</sup> газоподібного палива;

$Q_1$  – теплота, що використовується корисно;

$Q_2$  – втрата теплоти з відхідними газами;

$Q_3$  – втрата теплоти з хімічною неповнотою згоряння палива;

$Q_4$  – втрата теплоти з механічною неповнотою згоряння палива;

$Q_5$  – втрата теплоти через огороження;

$Q_6$  – втрата теплоти з фізичною теплоотою шлака.

Розділивши праву і ліву частини виразу (7.3) на  $Q_p^P$  та помноживши на 100 %, отримаємо рівняння теплового балансу вигляді, %

$$100 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6. \quad (7.4)$$

Коефіцієнт корисної дії котла, %

$$\eta_k = q_1;$$

$$\eta_k = q_1 = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6. \quad (7.5)$$

Більша частина теплоти, що вноситься в топку, сприймається поверхнями нагріву та передається робочому тілу. За рахунок цієї теплоти здійснюється підігрів води до температури кипіння, її випаровування і перегрів пари. Це - *теплота, що використовується корисно*,  $Q_1$

$$Q_1 = Q_p^P \eta_k.$$

Іншу частину  $Q_p^P$  складають теплові втрати – ( $Q_2 \dots Q_6$ ).

Корисне теплосприйняття пов'язано з *паропродуктивністю* котла  $D$ , кг/с, співвідношенням

$$BQ_1 = BQ_p^P \eta_k = D(i_{п.п} - i_{п.в}), \quad (7.6)$$

де  $i_{п.п}$  и  $i_{п.в}$  – ентальпії перегретої пари і поживної води, кДж/кг.

Аналіз теплових втрат. Найбільшою з втрат є втрата *теплоти з відхідними газами*  $q_2$ , %

$$q_2 = \frac{I_{yx} - \alpha_{yx} I_{x.в}^0}{Q_p^p} (100 - q_4), \quad (7.7)$$

де  $I_{yx}$  и  $I_{x.в}^0$  - ентальпії відхідних газів і теоретичної кількості холодного повітря (при температурі 30 °С), відповідно;

$\alpha_{yx}$  - коефіцієнт надлишку повітря в відхідних газах.

В продуктах згоряння палива можуть знаходитися газоподібні горючі компоненти CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>. Їх догоряння за межами топкової камери неможливо внаслідок низьких температур і концентрацій горючих компонентів і кисню. Теплота, що втрачена в результаті неповного згоряння горючих речовин, складає *хімічний недопал* палива  $Q_3$ , кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>). Розрахунок втрати теплоти від хімічного недопалу  $q_3$ , %, виконують за формулою

$$q_3 = \frac{(Q_{CO} \cdot CO + Q_{H_2} \cdot H_2 + Q_{CH_4} \cdot CH_4)}{Q_p^p} V_{c.г}, \quad (7.8)$$

де  $Q_{CO}$ ,  $Q_{H_2}$ ,  $Q_{CH_4}$  - теплота згоряння продуктів неповного горіння;

CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> - об'ємний вміст продуктів неповного згоряння палива в сухих продуктах згоряння, %;

$V_{c.г}$  - об'єм сухих продуктів згоряння, м<sup>3</sup>/кг.

Хімічний недопал при спалюванні газоподібного і рідкого палив складає малу величину  $q_3=(0\dots0,5)$  %, а при спалюванні твердого палива в факелі приймається рівним нулю  $q_3=0$ .

Втрата теплоти з хімічним недопалом  $q_3$  сильно залежить від коефіцієнту надлишку повітря (рис. 7.1) і навантаження топкового пристрою (рис. 7.2). Наявність хімічного недопалу при  $\alpha = 1$  визначається поганим перемішуванням палива з повітрям. При коефіцієнті надлишку повітря рівному і більшому  $\alpha_{кр}$  (крива  $q_3$ )

хімічний недопал не виникає. Звичайно  $\alpha_{кр} = (1,02 \dots 1,05)$  і характеризує ступінь досконалості пального пристрою.

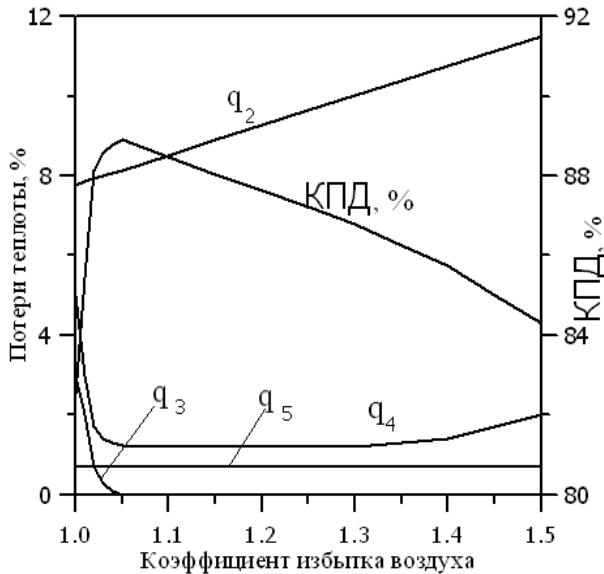


Рисунок 7.1 - Залежність втрат теплоти і ККД від коефіцієнту надлишку повітря

При спалюванні торфу, вугілля і сланців *механічний недопал*  $q_4$  представляє собою коксові частинки, які встигли виділити леткі речовини і частково обгоріли. Механічний недопал при спалюванні газу і мазуту може мати місце також в вигляді твердих частинок або сажі, що виникають в високотемпературній зоні при нестачі кисню. В нормальних умовах експлуатації втрата з механічним недопалом при спалюванні твердих палив складає  $q_4 = (0,5 \dots 5) \%$ . Втрата  $q_4$  при спалюванні газу і мазуту менше 1 %, і їх розглядають разом з втратами  $q_3$ . При камерному спалюванні твердого палива втрати теплоти з *механічною неповнотою згоряння*  $q_4$  підрозділяються на втрати з віднесенням  $q_4^{ун}$  і зі шлаком  $q_4^{шл}$ , при тому переважну частину складає  $q_4^{ун}$ . Втрата від механічного недопалу  $q_4$  суттєво

залежить від коефіцієнту надлишку повітря. Недопал визначається неповнотою переміщення палива з повітрям на виході з пальника. Підвищені втрати  $q_4$  у низькорекційних палив визначаються пізнім займанням коксових частинок і затягнутим горінням.

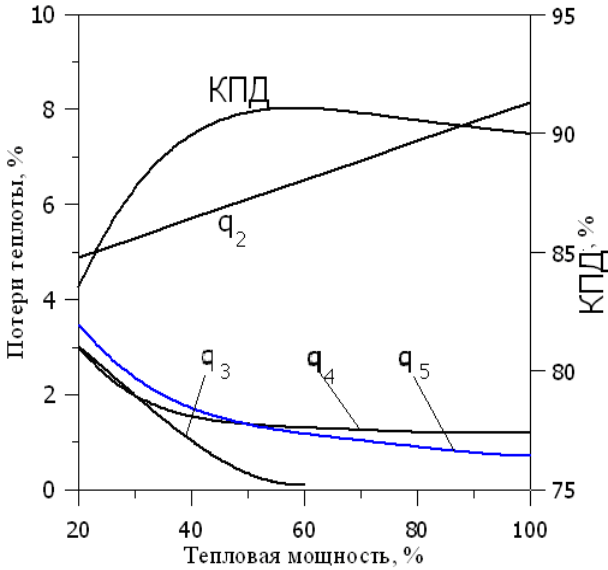


Рисунок 7.2 - Залежність втрат теплоти і ККД від теплової потужності котла

Втрата теплоти з механічною неповнотою згорання  $q_4$  розраховується за формулою, %

$$q_4 = \left( a_{\text{шл}} \frac{\Gamma_{\text{шл}}}{100 - \Gamma_{\text{шл}}} + a_{\text{ун}} \frac{\Gamma_{\text{ун}}}{100 - \Gamma_{\text{ун}}} \right) \frac{32,7 A^p}{Q_p^p}, \quad (7.9)$$

де  $a_{\text{шл}}$  і  $a_{\text{ун}}$  - відповідно доля золи в шлаці і віднесенні;

$\Gamma_{\text{шл}}$  і  $\Gamma_{\text{ун}}$  - вміст горючих в шлаці і віднесенні, %;

32,7 - теплота згорання коксових частинок в шлаці і віднесенні, МДж/кг.

Значення втрати теплоти через зовнішнє огородження  $q_5$  складає від 0,2 % до 2,5 %.

Втрата теплоти з фізичною *теплотою шлаку*  $q_6$ , %

$$q_6 = \frac{A^p a_{\text{шл}} (ct)_{\text{шл}}}{Q_p^p}, \quad (7.10)$$

де  $(ct)_{\text{шл}}$  – ентальпія шлаку, що дорівнює добутку теплоємності  $c$  і температури  $t$  шлаку.

При зменшенні теплового навантаження котельних установок відбувається деяке падіння температури відхідних газів, що призводить до зменшення втрат теплоти з відхідними газами (рис. 7.2). Втрати теплоти від хімічної і механічної неповноти згоряння збільшуються зі зменшенням теплового навантаження через погіршення змішування палива і повітря при знижених швидкостях. Таким чином, через різні залежності теплових втрат від навантаження виявляється, що при зниженому навантаженні, біля 50%, ККД котельного агрегата досягає максимального значення.

## Лекція 8. ВИЗНАЧЕННЯ НАДЛИШКУ ПОВІТРЯ

### 8.1 Коефіцієнт надлишку повітря

Розрахунковий коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha$  в топці встановлюється згідно Нормам теплового розрахунку котла[29].

На практиці коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha$  приймає наступні значення:

(1,10...1,25) при спалюванні твердих палив;

(1,03...1,10) при спалюванні рідких палив;

(1,02...1,05) при спалюванні газоподібних палив.

Зменшення надлишку повітря призводить к підвищенню ККД котла і економії витрати енергії на привід тягодуттьових машин. Однак зниження надлишку повітря нижче за розрахункове значення веде к швидкому зростанню недопалу палива і знижує економічність.

При роботі котла *під розрядженням*, що створює димосос, відбувається *підсмоктування холодного повітря* з навколишнього середовища в газовий тракт. За рахунок цього об'єм продуктів згоряння збільшується, зростає надлишок повітря і знижується температура газів. Присоси  $\Delta\alpha_i$  визначаються в долях від теоретично необхідного об'єму повітря

$$\Delta\alpha_i = \Delta V_i / V^0,$$

де  $\Delta V_i$  – об'єм присосного повітря в межах  $i$ -ої поверхні котла.

Тоді надлишок повітря за  $i$ -ою по порядку поверхнею нагріву після топки визначиться як

$$\alpha_i = \alpha_\tau + \sum \Delta\alpha_i.$$

Для забезпечення оптимальних умов горіння і мінімуму присосів повітря по газовому тракту необхідний постійний контроль за надлишками повітря в газовому тракті.

Коефіцієнт надлишку повітря у відповідності до визначення дорівнює відношенню дійсно поданої кількості повітря  $V_B$  до теоретично необхідної  $V^0$

$$\alpha = \frac{V_B}{V^0} = \frac{V_B}{V_B - \Delta V}, \quad (8.1)$$

де  $\Delta V$  – надлишкова кількість повітря,  $\text{м}^3/\text{кг}$  или  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

$V_B$  – дійсна кількість повітря, м<sup>3</sup>/кг или м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Не враховуючи збільшення вмісту азоту в димових газах за рахунок азоту палива, можна записати, що об'єм всього повітря  $V_B$ , що подається на горіння, зв'язаний з об'ємом азоту в димових газах наступним співвідношенням

$$V_B = \frac{100}{79} V_{N_2}. \quad (8.2)$$

Надлишкова кількість повітря  $\Delta V$ , що подається на горіння, зв'язана з об'ємом кисню, що не вступив в реакцію, співвідношенням

$$\Delta V = \frac{100}{21} V_{O_2}. \quad (8.3)$$

Підставляючи (8.3) і (8.2) в (8.1), отримаємо

$$\alpha = \frac{\frac{100}{79} V_{N_2}}{\frac{100}{79} V_{N_2} - \frac{100}{21} V_{O_2}} = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \frac{O_2}{N_2}}. \quad (8.4)$$

При наявності хімічного недопалу розрахунок ведеться на кількість кисню, який повинен був прореагувати при повному окисленні горючих елементів

$$O_2^* = O_2 - 0,5(CO + H_2) - 2C_4, \quad (8.5)$$

тоді азотна формула прийме завершальний вигляд

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \cdot \frac{O_2 - 0,5(CO + H_2) - 2CH_4}{N_2}}. \quad (8.6)$$

Таким чином, для точного визначення коефіцієнту надлишку повітря необхідно виміряти практично повний склад продуктів

згоряння, а саме концентрації кисню, азоту, оксида вуглецю, водня, метану.

## 8.2 Методи визначення коефіцієнту надлишку повітря

На практиці використовують *два метода* визначення коефіцієнту надлишку повітря – *по концентрації кисню і по концентрації сухих трьохатомних газів* в продуктах згоряння. Основним є метод прямого визначення концентрації кисню (магнітний киснемір або електролітичний осередок).

При окисленні вуглецю і сірки об'єми диоксидів вуглецю і сірки, що утворені, дорівнюють об'єму витраченого кисню ( $C+O_2=CO_2$ ;  $S+O_2=SO_2$ ), при цьому концентрація азоту при будь-якому коефіцієнті надлишку повітря буде постійною і рівною 79 %. Тоді при відсутності хімічного недопалу ( $CO=0$ ;  $H_2=0$ ;  $CH_4=0$ ) азотна формула може бути перетворена до вигляду

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79 O_2}{21 \cdot 79}} = \frac{21}{21 - O_2}. \quad (8.7)$$

Нехай горюча частина палива представлена тільки воднем. Тоді в продуктах повного згоряння будуть утримуватися тільки азот, кисень і вода, а в сухих продуктах згоряння (газоаналізатори працюють при кімнатній температурі) – тільки азот і кисень. Цілком очевидно, що при коефіцієнті надлишку повітря  $\alpha = 1$  концентрація азоту в сухих продуктах згоряння буде рівна 100 %. Таким чином, наявність в паливі водню приводить до збільшення концентрації азоту в сухих продуктах згоряння.

На зміну концентрації азоту в продуктах згоряння впливає також і вміст кисню в паливі. При співвідношенні кисню палива і водню палива  $32/4 = 1/8$  ( $2H_2 + O_2 = 2H_2O$ ;  $4 + 32 = 36$ ) весь кисень палива витрачається на окислення водню палива, а кисень повітря буде витрачатися на окислення вуглецю і сірки. В цьому випадку концентрація азоту в продуктах згоряння при будь-якому надлишку повітря буде також постійною і рівною 79 %. Отже, *киснева*

формула дає досить точні значення, коли вміст водню в паливі незначний, чи, коли виконується співвідношення  $H^P \approx O^P / 8$ , наприклад, при спалюванні деревини.

Другим методом, що достатньо широко використовується для визначення надлишку повітря в продуктах згоряння, є його розрахунок на основі знаходження процентного вмісту сухих трьохатомних газів

$$RO_2 = CO_2 + SO_2,$$

де

$$RO_2 = V_{RO_2} / V_{c.g} \cdot 100.$$

При повному згорянні палива в стехеометричних співвідношеннях ( $\alpha=1$ ) і при умові, що вміст водню і кисню в паливі відповідає виразу  $H^P = O^P / 8$  (весь водень палива окислюється киснем палива), вміст сухих трьохатомних газів складе, %

$$RO_2^0 = \frac{V_{RO_2}}{V_{c.g}} 100 = 21. \quad (8.8)$$

В більшості твердих і рідких палив  $H^P > O^P / 8$ . Тоді залишок водню буде окислюватися за рахунок кисню повітря з утворенням парів води. Об'єм азоту  $\Delta V_{N_2}$ , залишається при цьому, ввійде в склад сухих газів, і максимальний вміст сухих трьохатомних газів буде менше за 21 %

$$RO_2^{\max} = \frac{V_{RO_2}}{V'_{c.g} + \Delta V_{N_2}} 100 = \frac{V_{RO_2}}{V_{c.g}^0} 100 \%, \quad (8.9)$$

і тем менше, чим більше різниця  $H^P$  і  $O^P / 8$ .

Показником, що відображає цю різницю в вмісті водню і кисню в паливі, є *паливний коефіцієнт Бунте*  $\beta$ . Його значення для твердих і рідких палив визначається за формулою

$$\beta = 2,35 \frac{H^P - O^P / 8}{C^P + 0,375S^P_F}. \quad (8.10)$$

За допомогою коефіцієнта  $\beta$  величину максимально можливого вмісту сухих трьохатомних газів в продуктах згоряння  $RO_2^{\max}$  можна виразити наступним чином

$$RO_2^{\max} = \frac{21}{1 + \beta}. \quad (8.11)$$

Значення  $RO_2^{\max}$  знаходяться в наступних межах для різних видів палива, % :

- тверде паливо - (18 ... 20);
- мазут - (16 ... 17);
- природний газ - (11 ... 13);
- генераторний газ - 20;
- штучний газ - >21.

При коефіцієнті надлишку повітря  $\alpha > 1$  об'єм сухих газів складе

$$V_{c.r} = V_{c.r}^0 + \Delta V;$$

$$RO_2 = [V_{RO_2} / (V_{c.r} + \Delta V)] \cdot 100$$

і буде менше, ніж  $RO_2^{\max}$ .

Оскільки при цьому об'ємі  $V_{RO_2}$  не зміниться, то відношення

$$\frac{RO_2^{\max}}{RO_2} = \frac{V_{c.r}^0 + \Delta V}{V_{c.r}^0} \cong \frac{V_B}{V^0} = \alpha. \quad (8.12)$$

Надійність цього метода визначення коефіцієнту надлишку повітря залежить від того, наскільки точно відомо для даного палива значення  $RO_2^{\max}$ , а також від точності виконання аналізу димових газів на вміст  $RO_2$ . Труднощі використання даного методу виникають при спалюванні палива, чия мінеральна частина вміщує карбонати, які виділяють допоміжну кількість  $CO_2$  при термічному розкладенні.

## ЛЕКЦІЯ 9. КОНТРОЛЬ ТОПКОВОГО ПРОЦЕСУ

### 9.1 Показники досконалості топкового процесу

Досконалість топкового процесу характеризується:

- повнотою згоряння;
- мінімально можливим коефіцієнтом надлишку повітря.

Повнота згоряння визначається відсутністю в продуктах згоряння  $CO$  ;  $CH_4$  та інших горючих компонентів палива.

Коефіцієнт надлишку повітря характеризує наявність надлишкового кисню в продуктах згоряння. Для визначення вказаних елементів в продуктах згоряння виконують аналіз димових газів. Аналіз димових газів здійснюється за допомогою газоаналізаторів і хроматографів. За допомогою газоаналізаторів визначаються, %:  $RO_2$ ,  $CO$ ,  $O_2$ ,  $CH_4$  і так далі. В даний час існує велика різноманітність газоаналізаторів, у тому числі і іноземного виробництва.

ГХП - газоаналізатор хімічний поглинальний.

ГХП - 100 - переносний газоаналізатор, виконується у вигляді невеликого ящика, в якому встановлюються три колби.

$CO$  підраховуємо за вмістом  $RO_2$  і  $O_2$ .

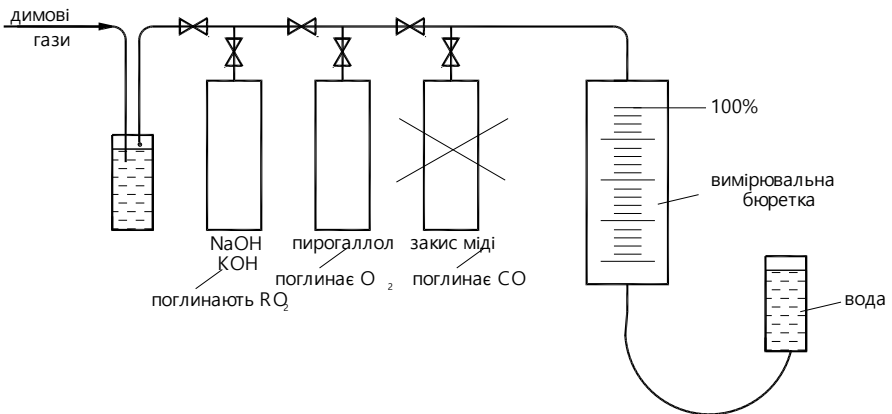


Рисунок 9.1 – Схема ГХП

## 9.2 Визначення CO і RO<sub>2</sub> в димових газах

Практика показала, що при спалюванні палив за умови  $\alpha > 1$  продуктом неповного згоряння є CO, а інші не виявляються.

При  $\alpha > 1$  і наявності  $V_{CO}$  в димових газах

$$V_{CG} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{CO} + V_{O_2}^{изб} + V_{N_2}. \quad (9.1)$$

Розділимо рівняння (9.1) на  $V_{CG}$  і помножимо на 100

$$\begin{aligned} 100\% &= \frac{V_{CO_2}}{V_{CG}} \cdot 100 + \frac{V_{SO_2}}{V_{CG}} \cdot 100 + \frac{V_{CO}}{V_{CG}} \cdot 100 + \frac{V_{O_2}^{изб}}{V_{CG}} \cdot 100 + \frac{V_{N_2}}{V_{CG}} \cdot 100 = \\ &= CO_2 + SO_2 + CO + O_2^{изб} + N_2, [\%]. \end{aligned}$$

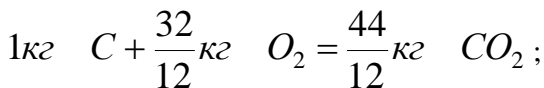
$$\frac{V_{N_2}}{V_{O_2}} = \frac{79}{21} \Rightarrow V_{N_2} = \frac{79}{21} V_{O_2}, \quad (9.2)$$

$V_{O_2}$  — це об'єм кисню, що подається в топку, який йде на окислення горючих складових палива і утворює надлишковий кисень

$$V_{O_2} = V_{O_2}^{CO_2} + V_{O_2}^{SO_2} + V_{O_2}^{CO} + V_{O_2}^{H_2O} + V_{O_2}^{изб} \quad (9.3)$$

На підставі стехеометричних рівнянь горіння при повному згорянні палива витрата кисню на горіння вуглецю дорівнює об'єму вуглекислоти, що утворюється, а об'єм кисню на окислення сірки дорівнює об'єму сірчастого газу, що утворився. Доведемо це.

Рівняння горіння C



$$1\text{кг} \quad C + \frac{32}{12\rho_{O_2}} \text{м}^3 \quad O_2 = \frac{44}{12\rho_{CO_2}} \text{м}^3 \quad CO_2;$$

$$1\text{кг} \quad C + \frac{32}{12 \cdot 1,428} \text{м}^3 \quad O_2 = \frac{44}{12 \cdot 1,965} \text{м}^3 \quad CO_2;$$

$$1\text{кг} \quad C + \underline{1,866 \text{м}^3} \quad O_2 = \underline{1,866 \text{м}^3} \quad CO_2;$$

$$V_{O_2}^{CO_2} = V_{CO_2}.$$

При заміні в (9.1)  $V_{N_2}$  по (9.2) з урахуванням (9.3) та наступних співвідношень

$$V_{O_2}^{CO_2} = V_{CO_2}, \quad V_{O_2}^{SO_2} = V_{SO_2}, \quad V_{O_2}^{CO} = 0,5 \cdot V_{CO},$$

$$V_{O_2}^{H_2O} = \frac{H^P - O^P}{100}, \text{ отримаємо}$$

$$V_{CF} = V_{RO_2} + V_{CO} + V_{O_2}^{узб} + \frac{79}{21} \left( V_{CO_2} + 0,5V_{CO} + V_{O_2}^{узб} + 5,5 \frac{H^P - O^P}{100} \right) \quad (9.4)$$

$$\text{З іншого боку} \quad RO_2 = \frac{V_{RO_2}}{V_{CF}} \cdot 100, \quad CO = \frac{V_{CO}}{V_{CF}} \cdot 100,$$

звідки,  $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$

$$V_{CF} = \frac{V_{RO_2} + V_{CO}}{RO_2 + CO} \cdot 100, \quad (9.5)$$

де  $RO_2$  і  $CO$  — процентний вміст трьохатомних газів і  $CO$ .

Оскільки на  $1\text{ м}^3 \text{ CO}_2$  витрачається  $0,54 \text{ кг C}$   $\left(\frac{1}{1,866} = 0,54\right)$ , на  $1\text{ м}^3 \text{ CO}$  -  $0,54 \text{ кг C}$ , а на  $1\text{ м}^3 \text{ SO}_2$  -  $1,43 \text{ кг S}$ , то

$$\begin{aligned} V_{\text{CO}_2} + V_{\text{CO}} &= \frac{1}{54} \cdot \frac{C^P}{100} = \frac{1,866}{100} C^P; \\ V_{\text{CO}_2} + V_{\text{CO}} + V_{\text{SO}_2} &= \frac{1,866}{100} C^P + \frac{1}{1,43} \cdot \frac{S^P}{100}; \\ V_{\text{RO}_2} + V_{\text{CO}} &= \frac{1,866}{100} (C^P + 0,375 S^P). \end{aligned} \quad (9.6)$$

Підставляючи останній вираз в (9.5), отримуємо для твердого і рідкого палива,  $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$

$$V_{\text{CF}} = \frac{1,866(C^P + 0,375 S^P)}{\text{RO}_2 + \text{CO}}. \quad (9.7)$$

З балансу по вуглецю для газоподібного палива,  $\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$

$$V_{\text{CF}} = \frac{\text{CO}_2^T + \text{CO}^T + 2\text{C}_2\text{H}_4^T + \sum m\text{C}_m\text{H}_n}{\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4}.$$

Вирішення рівнянь (9.4) і (9.7) дає загальне рівняння горіння у разі, коли в димових газах з продуктів неповного горіння є лише

$$RO_2(1 + \beta) + CO(0,605 + \beta) + O_2 = 21\% , \quad (9.8)$$

де  $\beta = 2,35 \frac{H^P - O^P / 8}{C^P + 0,375S^P}$  - паливна характеристика.

Паливна характеристика характеризує вміст вільного кисню і вуглецю в паливі, а

$$V_{RO_2} = 0,01 \left( CO_2^T + CO^T + H_2S^T + \sum mC_m H_n^T \right) \frac{M^3}{M^3} .$$

Паливна характеристика є постійною величиною для певного класу спалюваного палива і її значення приведено таблиці 9.1.

Таблиця 9.1 - Значення паливної характеристики для різних палив

Вид палива	Тверде	Рідке	Газоподібне
$\beta$	0,035	0,2	Природний 0,7...0,8
	0,15	0,35	Генераторний 0,04...0,06

За допомогою  $\beta$  можна визначити вміст  $CO$  в димових газах по наступній залежності, отриманій з (9.8),%

$$CO = \frac{21 - RO_2(1 + \beta) - O_2}{0,605 + \beta} .$$

Аби визначити  $CO, \%$ , досить визначити  $RO_2$  і  $O_2, \%$ , що з достатньою мірою точності можна виконати за допомогою газоаналізатора ГХП.

Втрата теплоти від недопалювання  $CO$  складе наступну величину

$$q_3^{CO} = \frac{CO}{100} V_{CT} Q_{НСО}^P.$$

Якість спалюваного палива можна характеризувати вмістом трьохатомних газів в димових газах. З (9.8) маємо:

- при  $\alpha > 1$  і  $CO \neq 0$

$$RO_2 = \frac{21 - O_2 - CO(0,605 + \beta)}{1 + \beta}, \%,$$

де  $O_2$ ,  $CO$  - процентний вміст відповідних елементів в димових газах;

- при  $\alpha > 1$  та  $CO = 0$

$$RO_2 = \frac{21 - O_2}{1 + \beta}, \%;$$

- при,  $\alpha = 1$ ,  $CO = 0$  звідки і  $O_2 = 0$ , тоді

$$RO_2^{\max} = \frac{21}{1 + \beta}, \%.$$

Для природного газу, %

$$RO_2^{\max} = \frac{21}{1 + 0,8} \approx 12.$$

Для якісного горіння  $RO_2$  не повинно бути менше 10 %.

Равіч М.Б. узяв формулу  $CO_2 = \frac{21 - O_2}{1 + \beta}$  і склав таблицю для природного газу, у выпадку  $CO = 0$ , а  $\beta = 0,779$ .

Таблиця 9.2 - Показнікі горіння природнага газу

$CO_2$	$O_2$	$N_2$	$\alpha$
11,8	0	88,2	1
10	3,2	86	1,16
5	12,1	82,1	2,22

При  $\alpha = 1$  і  $CO = 0$  вызначаецца максімальны працэнтны ўміст трохатомных газаў у дымовых газах і для пэўных відаў паліва ё ё пастойнаю велічыною. Значення для рэзных паліва. При горінні з  $\alpha > 1$   $RO_2$  у дымовых газах менше  $RO_2^{\max}$ .

### 9.3 Вызначення каэфіцыента надлішку паветра ў дымовых газах па газавому аналізу

Каэфіцыент надлішку паветра

$$\alpha = \frac{V_6}{V_6^0}$$

Оскількі ў паветры міститься 79 % азоту, то

$$\alpha = \frac{N_2}{N_2^0} = \frac{N_2}{N_2 - \Delta N_2} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta N_2}{N_2}}$$

де  $N_2$  - дзейны аб'ём, што вносіцца да топкі з паветрам ;

$\Delta N_2$  - п надлішок азоту від надлішковага паветра, што вносіцца да топкі.

Оскільки  $\frac{V_{N_2}}{V_{O_2}} = \frac{79}{21} \rightarrow \Delta N_2 = \frac{79}{21} O_2^{изб}$ ,

де  $O_2^{изб}$  - процентний вміст надлишкового кисню в димових газах, визначений газовим аналізом, то

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \cdot \frac{O_2^{изб}}{N_2}}; \quad (9.9)$$

$N_2 = 100 - (RO_2 + O_2)$ , тоді з (9.9) отримуємо

$$\alpha = \frac{\frac{79}{RO_2} + \beta}{79 \frac{1 + \beta}{21} + \beta}. \quad (9.10)$$

Оскільки величина  $\beta$  мала, то по наближеній формулі

$$\alpha = \frac{21}{1 + \beta} \cdot \frac{1 + \beta}{21 - O} = \frac{21}{21 - O_2} = \frac{RO_2^{\max}}{RO_2} = h,$$

де  $h$  - коефіцієнт розбавлення димових газів киснем.

Якщо в димових газах міститься  $CO$  і інші продукти неповного горіння, то

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \cdot \frac{O_2 - 0,5(CO + H_2) - 2CH_4}{N_2}};$$

$$N_2 = 100 - (CO_2 + SO_2 + O_2 + CO + H_2 + CH_4) ,\%.$$

Приклад.

Аналізом димових газів від котельної установки, яка працює на вугіллі марки ВЗР Бічеровського родовища Казахстану, встановлені величини  $RO_2 = 16,1\%$ ; та  $RO_2 + O_2 = 19,2\%$  .

Підрахувати, скільки  $m^3$  CO утворилося при спалюванні 1 кг цього палива. З яким коефіцієнтом надлишку повітря працює установка? Які втрати тепла?

Рішення

Елементарний склад робочої маси палива

%								кДж/кг
$C^p$	$H^p$	$S_{op}^p$	$S_{\kappa}^p$	$N^p$	$O^p$	$W^p$	$A^p$	$Q_n^p$
45	2,6	1,7		0,4	9,9	29	11,4	-

Паливна характеристика

$$\beta = 2,37 \frac{H^p - \frac{O^p}{8}}{C^p + 0,375S_{II}^p} = 2,37 \frac{2,6 - \frac{9,9}{8}}{45 + 0,375 \cdot 1,7} = 0,07.$$

Вміст CO в димових газах, %

$$CO = \frac{21 - RO_2(1 + \beta) - O_2}{0,605 + \beta} = \frac{21 - 16,1(1 + 0,07) - 3,1}{0,605 + 0,07} = 1,0996.$$

Об'єм сухих димових газів,  $m^3/kg$

$$V_{cr} = \frac{1,866(C^p + 0,375S_a^p)}{RO_2 + CO} = \frac{1,866(45 + 0,375 \cdot 1,7)}{16,1 + 1,0996} = 4,98.$$

Об'єм CO в димових газах, м<sup>3</sup>/кг

$$V_{co} = \frac{CO}{100} \cdot V_{cr} = \frac{1,0996}{100} \cdot 4,98 = 0,0547.$$

Втрати теплоти з хімічним недопалюванням, кДж/кг

$$Q = V_{co} Q_{co}^c = 0,0547 \cdot 12640 = 692.$$

Вміст азоту в димових газах %

$$N_2 = 100 - (RO_2 + O_2 + CO) = 100 - (16,1 + 3,1 + 0,0547) = 80,745.$$

Коефіцієнт надлишку повітря

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \cdot \frac{O_2 - 0,5 \cdot (CO)}{N_2}} = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \cdot \frac{3,1 - 0,5 \cdot 1,0996}{80,745}} = 1,135$$

Відповідь: CO = 1,0996 %; Q = 692 кДж/кг; α = 1,135.

## 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 топливо-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. 108 с.
4. Мисак Й.С., Гнатишин Я.М., Івасик Я.Ф.. Паливні пристрої для спалювання низькосортних палив. Львів НУ «ЛП», 2002. 98 с.
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. 230 с.
6. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.П., Левченко Б.О., Маріїч Л.Й. Перспективи і практика розвитку галузей паливно-енергетичного комплексу: навч. посіб. Харків: НТУ «ХП», 2013. 300 с.
7. Акмен Р.Г. Паливо, основи теорії горіння та паливні пристрої: текст лекцій і задачі для окремих розділів курсу. Харків: НТУ «ХП», 2013. 95 с.
8. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.П., Левченко Б.О. Паливно-енергетичний комплекс. Стратегія розвитку : навч. посіб. Харків: НТУ «ХП», 2009. 400 с.
9. Павловський В.Г. Термодинаміка фізико-енергетичних процесів: навч. посіб. Харків: НТУ «ХП», 2009. 332 с.
10. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.П., Левченко Б.О. Проблеми енергетики на межі ХХІ століття: навч. посіб. Харків: НТУ «ХП», 2006. 200 с.
11. Рижов А. П. Паливо та теорія горіння, спалюючі пристрої: курс лекцій. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2014. 96 с.
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. 56 с.
14. Костюк О.П. Паливо та обладнання для його спалювання : навч. посіб. Рівне: НУВГП, 2011. 121 с.
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.