

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# **ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЯ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ВИРОБНИЦТВІ КЕРАМІКИ ТА СКЛА**

## **ПАЛИВО І ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ. РОЗРАХУНКИ ГОРІННЯ ПАЛИВА**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою  
«Хімічні технології неорганічних керамічних матеріалів»  
спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2022

Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів у виробництві кераміки та скла. Паливо і його характеристики. Розрахунки горіння палива. [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Н. В. Жданюк, М.М. Племянніков. – Електронні текстові дані (1 файл: 922 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 62 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол No 5 від 26.05.2022 р.)  
За поданням Вченої ради Хіміко-технологічного Факультету  
(протокол No 3 від 28.02.2022 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

## **ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЯ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ВИРОБНИЦТВІ КЕРАМІКИ ТА СКЛА**

### **ПАЛИВО І ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ. РОЗРАХУНКИ ГОРІННЯ ПАЛИВА**

Укладачі: *Жданюк Наталія Василівна, канд. техн. наук.  
Племянніков Микола Миколайович, канд. техн. наук, доц.*

Відповідальний редактор: *Суббота Ірина Сергіївна, канд. техн. наук, доцент*

Рецензент: *Сфімова В.Г., канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізичної хімії ХТФ, Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

Навчальний посібник охоплює розділ «Паливо і його характеристики. Розрахунки горіння палива» з дисципліни «Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів у виробництві кераміки та скла» та рекомендований студентам, які проходять підготовку за програмами ОКР «бакалавр» спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія», спеціалізації «Хімічні технології кераміки і скла».

У посібнику розглянуті характеристики палива та методи розрахунків горіння палива». Також посібник містить контрольні запитання після кожної теми теоретичного матеріалу, приклади розв'язування задач, задачі для самостійного розв'язування. Навчальний посібник також може бути корисний для фахівців та інженерно-технічних працівників підприємств з виробництва керамічних виробів.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

## ЗМІСТ

Зміст	3
Передмова	5
<b>РОЗДІЛ 1. ПАЛИВО І ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ</b>	<b>6</b>
1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПАЛИВО	6
1.1.1. Паливо і його значення для промисловості	6
1.1.2. Паливний баланс України	6
1.1.3. Класифікація палива	7
1.2. СКЛАД ПАЛИВА	8
1.2.1. Елементарний склад палива	8
1.2.2. Мінеральні домішки	11
1.2.3. Баласт палива	12
1.2.4. Зола палива	13
1.2.5. Волога палива	13
1.3. ТЕПЛОТА ЗГОРАННЯ ПАЛИВА	14
1.3.1. Основні поняття	14
1.3.2. Нижча і вища теплота згорання	14
1.3.3. Методи визначення теплоти згорання палива	15
1.3.4. Умовне паливо	16
1.4. ВИДИ ПАЛИВА	16
1.4.1. Тверде паливо	16
1.4.2. Рідке паливо	17
1.4.3. Газоподібне паливо	17
1.4.4. Особливості газоподібного палива, як основного виду палива у технології кераміки та скла	18
<b>РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКИ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ ПАЛИВА</b>	<b>20</b>
2.1. ПЕРЕРАХУНОК СКЛАДУ ПАЛИВА З ВОЛОГОГО НА СУХЕ	20
2.2. ТЕПЛОТА ЗГОРАННЯ ПАЛИВА	21
2.3. ВИТРАТА ПОВІТРЯ НА ГОРІННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ОБ'ЄМУ ПРОДУКТІВ ГОРІННЯ	21
2.4. ТЕМПЕРАТУРА ГОРІННЯ ПАЛИВА	24
2.4.1. Калориметрична температура і жаровидатність палива	24
2.4.2. Теоретична температура	26
2.4.3. Дійсна температура	27
2.5. РІВНЯННЯ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСУ	27
2.6. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ГОРІННЯ	27
2.7. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ГОРІННЯ ЗА $i-t$ ДІАГРАМИ	28

<b>РОЗДІЛ 3. ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ СПАЛЕНІ ПАЛИВА.....</b>	<b>29</b>
3.1. ОСНОВНІ ЗАБРУДНЮВАЧІ АТМОСФЕРИ ПРИ СПАЛЕНІ ПАЛИВА ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКА .....	29
3.2. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАБРУДНЮВАЧІВ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	32
3.2.1. Тверді частинки.....	33
3.2.2. Утворення оксидів карбону при спалюванні газоподібного палива.....	35
3.2.3. Утворення оксидів сульфуру і способи зменшення їх викидів.....	36
3.2.4. Утворення оксидів нітрогену і способи зменшення їх викидів .....	39
3.2.5. Канцерогенні речовини.....	43
3.2.6. Способи зменшення викидів шкідливих речовин при спалюванні палива.....	43
Питання для самоконтролю.....	44
<b>РОЗДІЛ 4. МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ГОРІННЯ ПАЛИВА.....</b>	<b>45</b>
4.1. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ.....	45
4.2. МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ГОРІННЯ ПАЛИВА З ВИКОРИСТАННЯМ ТАБЛИЦЬ ЕНТАЛЬПІЙ АБО ТЕПЛОЄМНОСТІ ГАЗІВ .....	47
4.3. МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ГОРІННЯ ПАЛИВА З ВИКОРИСТАННЯМ І-Т ДІАГРАМ.....	48
4.4. МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ.....	49
Література.....	56
Додатки.....	57

## ПЕРЕДМОВА

Курс «Енерготехнології у виробництві кераміки та скла» є вибірковою дисципліною при підготовці студентів спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія». Посібник містить теоретичні основи для подальшого вивчення спеціальних фахових дисциплін за спеціалізацією «Хімічні технології неорганічних керамічних матеріалів». Навчальний посібник написаний у відповідності з програмою однойменного курсу з урахуванням досвіду його викладання.

Автори ставили основну задачу — створити посібник, який вирішує задачу теплотехнічної підготовки хіміка-технолога. А також прищепити хіміку-технологу навички енерготехнологічного аналізу хіміко-технологічних систем, тобто визначення оптимальних параметрів процесу на підставі розглядання технології і енергетики з метою зниження енерговитрат та створення безвідходних виробництв. Підручник надає теоретичні засади для розрахунку теплового балансу у технологіях виробництва кераміки та скла.

Одним із найважливіших розділів цього курсу є «Паливо і його характеристики. Розрахунки горіння палива». Враховуючи, що з кожним роком зростає споживання енергії в промисловості. В той же час невпинно скорочуються розвідані запаси, а також зростають витрати на видобуток, переробку і транспортування палива. Тому, найважливіше значення має підвищення ефективності споживання палива.

Актуальні завдання по раціональному використанні палива повинні, насамперед, вирішувати інженерно-технічні працівники, що займаються експлуатацією вогнетехнічних установок. А це потребує з боку студентів поглибленого всебічного вивчення як властивостей палива, так і теоретичних основ складного фізико-хімічного процесу його горіння.

В текстах лекцій у стислому вигляді викладений основний зміст даної дисципліни, що допоможе студентам при самостійній роботі, підготовці до заліку.

В кінці посібника наведений перелік рекомендованої літератури.

# РОЗДІЛ 1. ПАЛИВО І ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

## 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПАЛИВО

### *1.1.1. Паливо і його значення для промисловості*

Серед різних джерел енергії провідна роль належить органічному паливу. В Україні у виробничих циклах виготовлення кераміки та скла органічне паливо залишається основним джерелом енергії на найближчі 100 років.

Значення палива полягає у тому, що воно є джерелом теплоти. Крім того, паливо – це цінна сировина для хімічної промисловості.

Теплова енергія виділяється при горіння палива. Горіння — це хімічна реакція окиснення, що протікає з виділенням в одиницю часу великої кількості теплоти і супроводжується видимим світінням. Однак не усі речовини, що здатні виділяти теплову енергію при сполученні з киснем, можна вважати паливом.

Паливо — це речовини, що задовольняють таким вимогам:

1. Продукти горіння повинні бути газоподібними і легко видалятися із зони горіння.
2. Продукти горіння повинні бути нешкідливими для навколишнього середовища.
3. Запаси таких речовин у природі повинні бути достатньо великими, а їх видобування, переробка та спалювання економічно доцільними.

Цим вимогам задовольняють тільки два хімічні елементи: карбон і гідроген, а також їх сполуки — вуглеводні, що складають основу будь-якого палива.

### *1.1.2. Паливний баланс України*

Україна може забезпечити потреби у паливі тільки по вугіллю, що стосується вуглеводневого палива, то за рахунок існуючих джерел потреби народного господарства не задовольняються. Тому економіка України залежить від імпорту нафти і газу. Потреби України в природному газі і нафті задовольняються в основному за рахунок їх імпорту. В той же час власний видобуток енергоресурсів в останні роки невпинно скорочувався (табл. 1.1) і в 2020 році склав: природного газу — 20,2 млрд. м<sup>3</sup>, а нафти — 2,4 млн. т.

Загальна тенденція у зміні паливного балансу — це зниження споживаного мазуту як котельно-пічного палива та зростання частки природного газу, що спалюється як в топках котлів, так і у промислових печах. Передбачається розробка нетрадиційних джерел енергії. Це видобуток метану з вугільних пластів, переробка вугілля, біотехнології.

Таблиця 1.1. Видобуток окремих видів палива на Україні

Роки	Нафта (включаючи газовий конденсат), млн. т	Газ, млрд. м <sup>3</sup>	Вугілля, млн. т
1990	5,4	43,4	191,7
2000	5,3	28,1	164,8
2010	5,7	19,9	102,4
2018	2,3	16,5	33,1
2019	2,5	16,3	31,2
2020	2,4	20,2	28,8

За призначенням розрізняють паливо енергетичне, технологічне та енерготехнологічне. Енергетичне паливо спалюють з метою одержання теплової енергії (гаряча вода, пара), а також електроенергії.

Як енергетичне паливо використовують відходи коксохімічних виробництв, низькосортне вугілля, рідкі горючі відходи, тому що навіть при низьких температурах горіння можливо здійснити підігрів води та перегрів пари. Технологічне паливо (кокс в доменній печі, природний газ в нагрівальній печі) повинно забезпечити певний температурний рівень протікання технологічного процесу.

Прикладом енерготехнологічного використання палива є процес напівкоксування, коли напівкокс спалюють у топках котлів, а газоподібні продукти — у печах.

### ***1.1.3. Класифікація палива***

В основу загальної класифікації палива покладений його агрегатний стан та походження (табл. 1.2).

Енергетичним паливом називаються горючі речовини, які економічно доцільно використовувати для одержання в промислових цілях великих кількостей тепла.

Основними видами енерготехнологічного палива: торф, горючі сланці, вугілля, природний газ, продукти переробки нафти. За способом одержання розрізняють природні та штучні палива. До природного відносяться натуральні палива: вугілля, сланці, торф, нафта, природні гази.

Із твердих палив до штучного відносяться кокс, брикети вугілля, деревне вугілля. З рідких — мазут, бензин, гас, солярове масло, дизельне паливо. З газоподібних — газ доменної, генераторної, коксовий, підземної газифікації.

Таблиця 1.2. Загальна класифікація палива

Агрегатний стан	Походження палива	
	Натуральне	Штучне
Тверде	Дрова, торф, буре вугілля, кам'яне вугілля, антрацит, горючі сланці	Деревне вугілля, брикети, кокс, вугільний пил та інші
Рідке	Нафта	Бензин, гас, мазут, спирт, смоли, масла та інші
Газоподібне	Природний газ, попутний газ	Коксовий, доменний, генераторний газ та інші

Торф, буре вугілля, кам'яне вугілля і антрацити утворилися в процесі послідовної вуглефікації відмерлої рослинної маси.

Основне вироблення електричної і теплової енергії провадиться на твердому паливі.

## 1.2. СКЛАД ПАЛИВА

### 1.2.1. Елементарний склад палива

Всі види палива являють собою складні сполуки горючих елементів, і містять у собі мінеральні домішки і вологу.

Елементарний хімічний аналіз цих палив не розкриває хімічної природи сполук, що входять до них, і тому не може дати досить повного уявлення про їхні властивості, але дозволяє розрахувати тепловий і матеріальний баланс горіння палива. Склад різноманітних палив приведений у додатках А і Б.

Горюча частина твердого і рідкого палива є переважно органічний матеріал, створений з п'яти хімічних елементів — карбону, гідрогену, сульфору, кисню та нітрогену.

Основною горючою складовою палива є карбон, горіння якого обумовлює виділення основної кількості тепла. Теплота згорання аморфного вуглецю 34,4 МДж/кг (8130 ккал/кг).

Гідроген є другим за значенням елементом горючої маси палива, його вміст у горючій масі твердих і рідких палив коливається від 2 до 10%. Багато гідрогену міститься в природному газі, мазуті та горючих сланцях, найменше в

антрациті. Теплота згорання гідрогену з утворенням водяної пари складає 10,8 МДж/м<sup>3</sup> (2579 ккал/м<sup>3</sup>).

Нітроген та кисень не приймають участі в тепловиділенні і тому вони є внутрішнім баластом палива. Крім того, кисень в сполучі з гідрогеном або карбоном палива, переводить деяку частину горючих елементів в окислений стан, і зменшує його теплоту згорання. Вміст кисену великий у деревині і торфі. Нітроген при спалюванні палива в атмосфері повітря, як правило, не окиснюється і переходить у продукти згорання у вільному вигляді.

Горюча частина палива також включає FeS<sub>2</sub> (пірит).

Баласт твердого і рідкого палива складається з вологи та негорючої мінеральної частини, що утворює при згоранні золу. Ці частини позначаються W від німецького слова Wasser (волога) та A від німецького слова Asche (зола), відповідно.

Важливою характеристикою енергетичного палива є його сірчистість. На рис. 1.1 можна побачити, що в твердому паливі сульфур є в органічній речовині (S<sub>орг</sub>), а також у складі горючих (піритний сульфур S<sub>п</sub>) та негорючих (сульфур у сульфатній формі S<sub>сфт</sub>) мінеральних речовин.

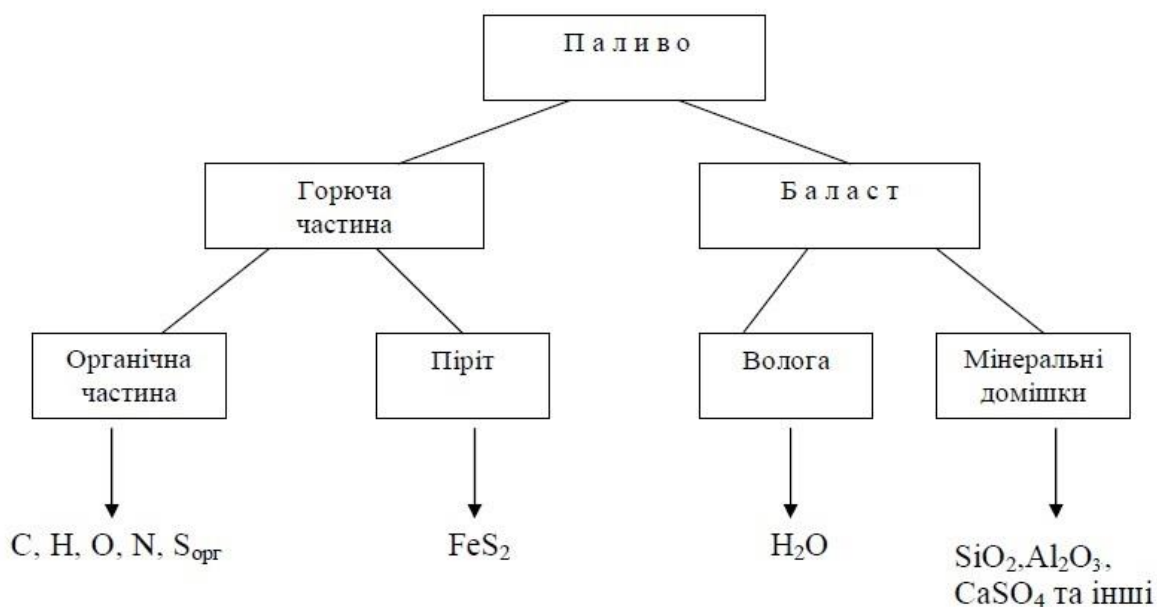


Рис. 1.1. Склад твердого палива

Таким чином, отримуємо формулу для визначення загальної сірчистості палива:

$$\omega(S_{\text{заг}}) = \omega(S_{\text{орг}}) + \omega(S_{\text{п}}) + \omega(S_{\text{сфт}}), \quad (1.1)$$

де  $\omega(S_{\text{заг}})$  – масова частка сульфуру (загальна сірчастість);  $\omega(S_{\text{ор}})$  – масова частка органічного сульфуру;  $\omega(S_{\text{п}})$  – масова частка піритного сульфуру;  $\omega(S_{\text{сфт}})$  – масова частка сульфатного сульфуру.

Склад твердого або рідкого палива визначають шляхом елементарного аналізу, результати якого наводять у вигляді схеми (табл.1.3).

Таблиця 1.3. Елементарний склад твердого або рідкого палива

Індекс (позначення)	Склад палива (елементи, зола, волога)							$\Sigma, \%$
	$\omega(C)$	$\omega(H)$	$\omega(N)$	$\omega(O)$	$\omega(S)$	$\omega(A)$	$\omega(W)$	
								100
О	органічна маса				–	–	–	100
Г	горюча маса					–	–	100
С	суха маса						–	100
Р	робоча маса							100

Методика елементарного аналізу достатньо складна, тому такий аналіз проводять періодично. У виробничих умовах виконують технічний аналіз, внаслідок якого визначається вміст вологи, золи, вихід летких і вихід нелеткого залишку — коксу. Дані по елементарному аналізу палива представлені у додатку А.

Склад твердого і рідкого палива звичайно вказується у відсотках до маси, при цьому за 100% можуть бути прийняті: робоча маса — паливо у тому стані, в якому воно надходить до споживача

$$\omega(C_p) + \omega(H_p) + \omega(O_p) + \omega(N_p) + \omega(S_p) + \omega(A_p) + \omega(W_p) = 100\%; \quad (1.2)$$

суха маса — паливо без вологи

$$\omega(C_p) + \omega(H_p) + \omega(O_p) + \omega(N_p) + \omega(S_p) + \omega(A_p) = 100\%; \quad (1.3)$$

горюча маса — паливо без вологи і золи

$$\omega(C_p) + \omega(H_p) + \omega(O_p) + \omega(N_p) + \omega(S_p) = 100\%; \quad (1.4)$$

органічна маса — горюча маса за відрахуванням сірки

$$\omega(C_p) + \omega(H_p) + \omega(O_p) + \omega(N_p) = 100\%. \quad (1.5)$$

У теплотехнічній літературі рівняння 1.2 – 1.5 показують у наступному вигляді:

$$C_p + H_p + O_p + N_p + S_p + A_p + W_p = 100\%;$$

$$C_p + H_p + O_p + N_p + S_p + A_p = 100\%;$$

$$C_p + H_p + O_p + N_p + S_p = 100\%;$$

$$C_p + H_p + O_p + N_p = 100\%.$$

Хімічний склад газоподібних палив, що представляють собою прості суміші, визначають повним газовим аналізом і виражають у відсотках від їхнього об'єму.

Елементарний хімічний склад горючої маси різних видів палива представлений у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4. Елементарний хімічний склад горючої маси різних видів палива

Паливо	Склад горючої маси, %				
	$\omega(C^r)$	$\omega(W^r)$	$\omega(O^r)$	$\omega(N^r)$	$\omega(S^r_{op+k})$
Деревина	51	6	42,5	0,5	–
Торф	58	6	33	2,5	0,5
Буре вугілля	64-77	4-6	15-25	1	0,5-7,5
Кам'яне вугілля:	75-90	4-6	4-16	1,5	0,5-7
Антрацит	90-93	2-4	2-4	1	0, 5-2
Горючі сланці	60-65	7-9	10-17	1	5-15
Мазут	86-88	10-10,5	0,5-0,8		0, 5-3

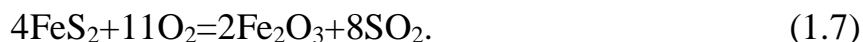
### 1.2.2. Мінеральні домішки палива

У твердому паливі значну частину домішок становлять зовнішні домішки. Тому вміст мінеральних домішок навіть у одному ж виді палива може сильно коливатися. Основними мінеральними домішками є: силікати (кремнезем  $SiO_2$ , глинозем  $Al_2O_3$ , глина), сульфіді (переважно  $FeS_2$ ), карбонати ( $CaCO_3$ ,  $MgCO_3$ ,  $FeCO_3$ ), сульфати ( $CaSO_4$ ,  $MgSO_4$ ), окиси металів, фосфати, хлориди, солі лужних металів.

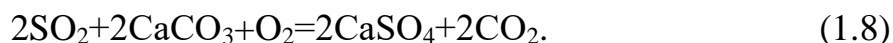
У процесі горіння в середовищі високих температур у мінеральних домішках палива відбуваються фізичні і хімічні перетворення. У міру

підвищення температури палива гіпс і силікати втрачають свою кристалізаційну вологу.

В інтервалі температур 400–600°C окиснюється колчедан:



Сульфур (IV) оксид, що утворюється при окисненні колчедану та органічного сульфуру, вступає в реакцію із  $\text{CaCO}_3$  і  $\text{O}_2$ :



За температури вище 600°C розкладаються карбонати:



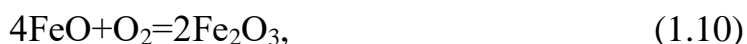
а також випаровується деяка частина хлоридів і сполук лужних металів.

При температурі вище 1000°C розкладаються сульфати:



При цих температурах починається хімічна взаємодія між силікатною основою домішок і інших оксидів.

В окисному середовищі Ферум(II) оксид переходить у Ферум(III) оксид



а у відновному середовищі — у метал. У напіввідновному середовищі Ферум(II) оксид може зберегтися і за певного температурного рівня з'єднатися із кремнеземом, утворюючи легкоплавкі силікати. Цим пояснюється значне зниження температури плавлення шлаків у напіввідновному середовищі.

### ***1.2.3. Баласт палива***

Негорючі мінеральні домішки і волога є зовнішнім баластом твердого палива, що зменшують вміст горючої маси в одиниці маси робочого палива; крім того, при спалюванні палива на випаровування вологи затрачається певна кількість тепла. Тому зі збільшенням зольності і вологості зменшується теплота згорання палива, збільшується його витрата, відповідно збільшуються витрати на видобуток і перевезення.

По походженню розрізняють три види мінеральних домішок.

*Первинні домішки* в складі материнської речовини перейшли в паливо із вуглеводнів. Ці домішки пов'язані з органічною масою палива. За кількістю їх,

звичайно, небагато, вони рівномірно розподілені по всій масі палива і не можуть бути вилучені з нього.

Деяка кількість домішок внесена в паливо в процесі вуглеутворення як наноси вітром і водою. Ці домішки, називані *вторинними*, розподілені в паливі менш рівномірно, іноді зустрічаються у вигляді тонких прошарків. Первинні й вторинні мінеральні домішки є внутрішніми домішками палива.

*Третинні домішки* потрапляють у паливо у вигляді породи при його видобутку від зовнішнього мінерального оточення вироблюваного шару й розподілені в паливі нерівномірно, порівняно легко відділяються і є зовнішніми домішками.

#### **1.2.4. Зола палива**

Твердий негорючий залишок, що утворюється після завершення перетворень у мінеральній частині палива в процесі його горіння, називають золою.

При високих температурах частина золи розплавляється, утворюючи розплав мінералів, що називається шлаками.

За характеристиками плавкості золи енергетичні вугілля поділяються на три групи: з легкоплавкою золою  $t_3 \leq 1350^\circ\text{C}$ , із золою середньої плавкості  $t_3 = 1350 \div 1450^\circ\text{C}$  і с тугоплавкою золою  $t_3 > 1450^\circ\text{C}$ .

Зольність палива змінюється від часток відсотка в мазуті і деревині до 40-60% у сланцях.

#### **1.2.5. Волога палива**

Вологу палива підрозділяють на дві частини: зовнішню і внутрішню.

До зовнішньої відноситься капілярна волога, тобто волога, що заповнює капіляри і пори, сильно розвинені в торфі і бурих вугіллях. Зовнішня волога може бути вилучена тепловим сушінням.

До внутрішньої відносять колоїдну і гідратну вологу. Колоїдна волога є складовою частиною палива. Високий вміст колоїдної вологи міститься у торфі, менше в бурих вугіллях і незначна частина у кам'яному вугіллі і антрацитах.

Гідратна або кристалізаційна волога хімічно зв'язана з мінеральними домішками палива, головним чином сірчаноокислим кальцієм і алюмосилікатом. При підсушуванні частина колоїдної вологи випаровується, але практично не змінюється вміст гідратної вологи. Остання може бути вилучена лише при високих температурах.

Тверде натуральне паливо при перебуванні на повітрі втрачає, а підсушене набирає вологу доти, поки тиск насиченої пари вологи палива не зрівноважиться з парціальним тиском вологи повітря, тобто з його відносною

вологістю. Тверде паливо зі сталою в природних умовах вологістю називають повітряно-сухим паливом.

Підвищена вологість приводить до зниження теплоти згорання палива і збільшенню його витрати, до збільшення об'єму продуктів згорання, а отже, втрат тепла з димовими газами. Крім того, висока вологість сприяє вивітрюванню й самозайманню твердого палива при його зберіганні. З підвищенням вологості погіршується сипкість твердих палив. У зимовий час висока вологість може викликати змерзання палива, що порушує нормальну роботу пристроїв паливоподачі.

### 1.3. ТЕПЛОТА ЗГОРАННЯ ПАЛИВА

#### 1.3.1. Основні поняття

Теплота згорання палива характеризує його енергетичну цінність і є кількість теплоти, яка виділяється при повному згоранні одиниці палива.

Термін «повне згорання» означає, що гідроген і карбон окиснюється до стану вищих окисів цих елементів —  $H_2O$  і  $CO_2$ , сульфур перетворюється у  $SO_2$ , а нітроген виділяється у вигляді простої речовини  $N_2$ . Для твердого та рідкого палива за одиницю кількості може бути прийнятий 1 кг будь-якої з розрахункових мас: робочої, сухої, горючої, органічної. Теплоту згорання позначають буквою  $Q$  з верхнім індексом, що відповідає масі палива (робочій, сухій, горючій та органічній відповідно):

$$Q = Q^P + Q^c + Q^T + Q^o. \quad (1.11)$$

За одиницю кількості газового палива приймають  $1 \text{ м}^3$  суми всіх його компонентів за нормальних умов ( $P = 101,3 \text{ кПа}$ ,  $t = 0^\circ\text{C}$ ).

#### 1.3.2 Нижча і вища теплота згорання

Розглянемо реакції горіння водню



З рівнянь (1.12) і (1.13) можна побачити, що теплота згорання гідрогену за умови утворення  $H_2O$  у вигляді рідини вища, тому що при конденсації пари у воду виділяється прихована теплота пароутворення. Максимальна теплота згорання з урахуванням теплоти конденсації водяної пари називається вищою і

позначається  $Q_v$ . Кількість теплоти, що виділяється при повному згоранні одиниці палива без конденсації водяної пари називається нижчою теплотою згорання і позначається  $Q_n$ . У більшості технологічних процесів, пов'язаних із згоранням палива, продукти згорання викидаються до атмосфери при температурі вище  $100^\circ\text{C}$ , коли пара практично повністю залишається у газовій фазі. Тому теплотехнічні розрахунки ведуть з використанням  $Q_n$ .

### **1.3.3 Методи визначення теплоти згорання палива**

Теплота згорання палива може бути визначена експериментальним або розрахунковим методами. Найбільш надійним методом є експериментальний за допомогою спеціальних приладів — калориметрів. Використовують 2 типи калориметрів:

1. для твердого палива і важких сортів рідкого з температурою кипіння нижче  $250^\circ\text{C}$ ;

2. для газоподібного палива і рідкого з температурою кипіння вище  $250^\circ\text{C}$ .

Розрахунок теплоти згорання твердого і рідкого палива може бути виконаний за допомогою емпіричної формули Д.І.Менделєєва

$$Q_n^p = 340\omega(C^p) + 1030\omega(H^p) + 109\omega(S^p - O^p) - 25\omega W^p, \quad (1.14)$$

де  $Q_n^p$  — нижча теплота згорання, кДж/кг;  $\omega(C^p)$ ,  $\omega(H^p)$ ,  $\omega(O^p)$ ,  $\omega(S^p)$ ,  $\omega(W^p)$  — вміст відповідних елементів (масова частка) у робочій масі палива, %.

З формули (1.14) видно, що найбільш енергетично цінним є гідроген, а присутність у горючій масі кисню суттєво знижує теплоту згорання палива.

Розрахунок теплоти згорання газоподібного палива виконується за його компонентним складом:

$$Q = \sum_{i=1}^k \frac{\varphi_i}{100}, \quad (1.15)$$

де  $k$  — число горючих компонентів у паливі;  $\omega_i$  — об'ємна частка  $i$ -го компонента у паливі, %;  $Q_i$  — теплота згорання  $i$ -го компонента.

Звичайно склад газоподібного палива виражається у об'ємних відсотках, значення  $Q_i$  відносять до одиниці об'єму  $i$ -го компонента, а  $Q$  — до одиниці об'єму палива (при нормальних умовах).

Для того, щоб за допомогою формули (1.15) розрахувати нижчу теплоту згорання суміші, до неї треба підставити значення  $Q_i$ , що відповідають нижчим теплотам згорання компонентів. Отримуємо вираз:

$$Q_{н}^p = 108\varphi(H_2) + 127,7 \varphi(CO) + 358 \varphi(CH_4) + 555 \varphi(C_2H_2) + 636 \varphi(C_2H_6) + \\ + \varphi(C_2H_2) + 913 \varphi(C_3H_8) + 1186,5 \varphi(C_4H_{10}) + 1465 \varphi(C_5H_{12}) + 234 \varphi(H_2S) \text{ кДж/м}^3. \quad (1.16)$$

У теплотехнічній літературі дане рівняння записують у вигляді:

$$Q_{н}^p = 108[H] + 127,7[CO] + 358[CH_4] + 555[C_2H_2] + 636[C_2H_6] + [C_2H_2] + \\ + 913[C_3H_8] + 1186,5[C_4H_{10}] + 1465[C_5H_{12}] + \dots + .234[H_2S] \text{ кДж/м}^3.$$

### 1.3.4 Умовне паливо

Кожне паливо має певну теплоту згорання. Для зручності обліку, порівняння і перерахунку з одного палива на інше використовують поняття умовного палива. Умовним паливом називається таке паливо, теплота згорання якого складає 29,3 мДж/кг (7000 ккал/кг). Приблизно таку теплоту згорання має якісне кам'яне вугілля.

$$E = \frac{Q_n^p}{Q_{умов}} \quad (1.18)$$

Таким чином можна оцінити теплотворну здатність палива.

## 1. 4. ВИДИ ПАЛИВА

### 1.4.1. Тверде паливо

Викопне вугілля поділяються на три основних типи: буре, кам'яне вугілля і антрацит.

**Буре вугілля.** До бурого вугілля марки Б відносять вугілля з неспікливим коксом і високим виходом летких речовин, як правило більше 40%.

Буре вугілля характеризуються високою гігроскопічністю й у більшості випадків високою загальною вологістю, зниженим вмістом карбону і підвищеним вмістом кисню у порівнянні з кам'яними вугіллям. Внаслідок високого вмісту золи ( $\omega(A^p) = 15-25\%$ ) і вологою ( $\omega(W^p) = 20-35\%$ ) нижча теплота згорання бурого вугілля невисока  $Q_{н}^p = 10,6-15,9$  МДж/кг (2500–3600 ккал/кг).

**Кам'яне вугілля.** До кам'яного вугілля відносять вугілля з вищою

теплотою згорання робочої маси та беззольне вугілля.

Кам'яне вугілля має незначну кількість баласту:  $\omega(A^P) = 5\text{--}15\%$ ,  $\omega(W^P) = 5\text{--}10\%$  і більш високу теплоту згорання  $Q_{н^P} = 23\text{--}27,23$  МДж/кг (5500–6500 ккал/кг).

**Торф** є хімічно і геологічно найбільш молодшою копалиною твердого палива і має високий вихід летких ( $\omega(V^P) = 70\%$ ), високу вологість ( $\omega(W^P) = 40\text{--}50\%$ ), помірну зольність ( $\omega(A^P) = 5\text{--}10\%$ ), низьку теплоту згорання  $Q_{н^P} = 8,38\text{--}10,47$  МДж/кг (2000–2500 ккал/кг).

**Сланці.** Зольність сланців дуже велика й доходить до  $\omega(A^P) = 50\text{--}60\%$ , вологість також підвищена  $\omega(W^P) = 15\text{--}20\%$ . Внаслідок великого баласту їхня теплота згорання низька  $Q_{н^P} = 5,87\text{--}10$  МДж/кг (1400–2400 ккал/кг). Високий вміст водню в горючій масі  $\omega(H^P) = 7,5\text{--}9,5\%$  обумовлює великий вихід летких у сланців, що досягає 80–90%, і їхню легку займистість.

#### ***1.4.2. Рідке паливо***

**Мазут.** З рідких палив в енергетиці використовується мазут трьох марок: 40, 100 і 200. Марка визначається граничною в'язкістю, що становить при 80°C для мазуту 40 — 8,0; для мазуту 100 — 15,6; для мазуту 200 — 6,5–9,5 град. ум. в'язкості (УВ) при 100°C. У мазуті міститься вуглецю 84–86% і водню — 11–12%, вміст води не перевищує 3–4%, а золи — 0,5%. Мазут має високу теплоту згорання  $Q_{н^P} = 39,38\text{--}40,2$  МДж/кг (9400–9600 ккал/кг).

За вмістом сульфуру розрізняють малосірчистий мазут  $\omega(S^P) \leq 0,5\%$ , сірчистий  $\omega(S^P)$  до 2% і високосірчистий  $\omega(S^P)$  до 3,5%; за в'язкістю — малов'язкий і високов'язкий, утримуючий смолисті речовини і парафін. Найбільш в'язкі сорти мазуту мають температуру застигання 25–35°C. У зв'язку із цим при спалюванні застосовується попереднє нагрівання в'язких мазутів до температури 80–120°.

#### ***1.4.3. Газоподібне паливо***

**Природний газ.** Велике значення в паливному балансі України мають природні гази, що представляють собою суміш вуглеводнів, сірководню й інертних газів: азоту і вуглекислоти. Основною горючою складовою природних газів є метан (від 80 до 98%), що обумовлює їхню високу теплоту згорання. У них інертних газів міститься небагато: 0,1–0,3% CO<sub>2</sub> і 1–14% N<sub>2</sub>. Теплота згорання сухого природного газу  $Q_{н^P} = 33,51\text{--}35,61$  МДж/м<sup>3</sup> (8000–8500 ккал/м<sup>3</sup>).

**Доменний газ** утворюється при виплавці чавуну в доменних печах. Вихід газу коливається в межах 1500–2500 м<sup>3</sup> на тонну чавуну. Частка негорючих компонентів (N<sub>2</sub> і CO<sub>2</sub>) у доменному газі становить близько 70%, що й обумовлює його низькі теплотехнічні показники (нижча теплота згорання газу дорівнює 3–5 МДж/м<sup>3</sup>).

При спалюванні доменного газу максимальна температура продуктів згорання (без урахування теплових втрат і витрат теплоти на дисоціацію  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$ ) дорівнює  $1400\text{--}1500^\circ\text{C}$ . Якщо перед спалюванням газу його і повітря підігріти, то температуру продуктів згорання можна значно підвищити.

**Феросплавний газ** утворюється при виплавці феросплавів у рудовідновних печах. Газ, що відходить із закритих печей, можна використовувати в якості паливних ВЕР (вторинні енергетичні ресурси). У відкритих печах у зв'язку з вільним доступом повітря газ згоряє на колошнику.

Вихід і склад феросплавного газу залежить від марки виплавлюваного сплаву, складу шихти, режиму роботи печі, її потужності і т.п. Склад газу:  $50\text{--}90\%$   $\text{CO}$ ;  $2\text{--}8\%$   $\text{H}_2$ ;  $0,3\text{--}1\%$   $\text{CH}_4$ ;  $\text{O}_2 < 1\%$ ;  $2\text{--}5\%$   $\text{CO}_2$ ; інше —  $\text{N}_2$ . Максимальна температура продуктів згорання дорівнює  $2080^\circ\text{C}$ .

**Конвертерний газ** утворюється при виплавці сталі в кисневих конвертерах. Газ складається в основному з оксиду вуглецю, вихід і состав його протягом плавки значно змінюються. Після очищення склад газу приблизно такий:  $70\text{--}80\%$   $\text{CO}$ ;  $15\text{--}20\%$   $\text{CO}_2$ ;  $0,5\text{--}0,8\%$   $\text{O}_2$ ;  $3\text{--}12\%$   $\text{N}_2$ . Теплота згорання газу становить  $8,4\text{--}9,2$  МДж/м<sup>3</sup>. Максимальна температура згорання досягає  $2000^\circ\text{C}$ .

**Коксовий газ** утворюється при коксуванні вугільної шихти. У чорній металургії він використовується після добування хімічних продуктів.

Об'ємні частки компонентів у газі перебувають у наступних межах, %:  $52\text{--}62$   $\text{H}_2$ ;  $0,1\text{--}0,6$   $\text{O}_2$ ;  $23,5\text{--}26,5$   $\text{CH}_4$ ;  $5,5\text{--}7,7$   $\text{CO}$ ;  $1,8\text{--}2,6$   $\text{CO}_2$ . Теплота згорання дорівнює  $17\text{--}17,6$  МДж/м<sup>3</sup>, максимальна температура продуктів згорання —  $2070^\circ\text{C}$ .

Усереднені характеристики газоподібного палива приведені у додатку Б.

#### ***1.4.4. Особливості газоподібного палива, як основного виду палива у технології кераміки та скла***

У порівнянні з іншими видами газоподібне паливо має суттєві переваги:

- згоряє в теоретичній кількості повітря, що забезпечує високі тепловий ККД і температуру горіння;
- при згоранні не утворює небажаних продуктів сухої перегонки і сірчистих сполук, кіптяви і диму;
- порівняно легко може бути підведено по газопроводах до віддалених об'єктів споживання і може зберігатися централізовано;
- легко запалюється при будь-якій температурі навколишнього повітря;
- вимагає порівняно невеликих витрат при добуванні;
- може бути використане в стислому або зрідженому виді.

Разом з тим газоподібне паливо має також певні негативні властивості, до яких відносяться: отруйна дія, утворення вибухових сумішей при змішуванні з повітрям та ін.

Застосування газоподібних видів палива обумовлюється їхнім складом і властивостями вуглеводневої частини. Найбільш широко застосовуються природний та попутний газ нафтових або газових родовищ, а також заводські гази нафтопереробних і інших заводів. Основними складовими компонентами цих газів є вуглеводні із числом вуглецевих атомів у молекулі від одного до чотирьох (метан, етан, пропан, бутан і їхні похідні).

Природні гази з газових родовищ практично повністю складаються з метану (82...98%), з невеликою домішкою етану (до 6%), пропану (до 1,5%) і бутану (до 1%). У попутних нафтових газах вміст метану коливається в більш широких межах (40...85%), але в них, крім того, міститься етан і пропан (до 20 % кожний). Заводські гази містять як парафінові, так і олефінові вуглеводні, які найчастіше використовуються як сировина для синтезу пластичних мас і інших речовин. У горючих газах, крім вуглеводнів, можуть міститись і інші компоненти, такі, як водень, оксиди карбону, азот, кисень, гідроген сульфід, пари води та ін. Невуглеводневі компоненти, що входять до складу газу — водень, оксид карбону(II) та ін. — мають невисоку теплоту згорання, а деякі з них (карбон(II) оксид карбону, азот), не беруть участь у згоранні, але знижують теплотвірну здатність палива.

Газоподібне паливо за теплою згорання умовно ділять на три групи:

*висококалорійне* — з теплою згорання більше 20000 кДж/м<sup>3</sup> (природні гази з газових свердловин і нафтові, одержані із свердловин попутно з нафтою або при її переробці);

*середньокалорійне* — з теплою згорання 10000 ... 20000 кДж/м<sup>3</sup> (коксів та ін.);

*низькокалорійне* — з теплою згорання до 10000 кДж/м<sup>3</sup> (доменні, генераторний гази та ін.).

Залежно від фізичних властивостей гази можуть бути розділені на стиснуті та скраплені. Деякі гази, що мають низьку критичну температуру, не переходять у рідкий стан при звичайній температурі навіть під дією високого тиску. Так, метан до температури  $-82^{\circ}\text{C}$  перебуває в газоподібному стані. При температурі нижче  $-82^{\circ}\text{C}$  метан під впливом невеликого надлишкового тиску перетворюється в рідину, а при охолодженні до  $-161^{\circ}\text{C}$  метан скраплюється вже в умовах атмосферного тиску. Гази, які мають критичну температуру нижче звичайних температур їхнього застосування, використовують в основному в стиснутому виді (при тиску до 20 МПа), тому їх називають стисненими газами. Скраплені гази — це гази, критична температура яких вище звичайних температур їхнього застосування. Такі гази використовують у скрапленому вигляді за підвищеного тиску (до 1,5–2 МПа).

## РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКИ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ

Розрахунки горіння палива проводять з метою визначення витрат повітря, необхідного для горіння, кількості продуктів горіння, що утворюються, а також їхнього складу і температури горіння.

Якщо дане паливо не забезпечує необхідні температури в печі, то розрахунком визначається необхідна температура підігріву повітря, що подається для горіння.

Розрахунки горіння провадяться незалежно від кількості палива, що спалюється в печі, тому такі величини, як кількість повітря, необхідного для горіння, і об'єм димових газів, що утворюються в результаті спалювання палива, визначаються у перерахунку на одиницю маси твердого і рідкого палива, і на одиницю об'єму газоподібного палива. і виражають в  $\text{м}^3/\text{кг}$  або  $\text{м}^3/\text{м}^3$  палива (об'єми повітря і газу приведені до нормальних умов: температура  $0^\circ\text{C}$  і атмосферний тиск  $101325 \text{ Па}$  ( $\text{Н}/\text{м}^2$ )).

Температура горіння палива визначається на основі балансу теплоти, внесеної паливом і повітрям, а також теплоти продуктів горіння. Витрати повітря і вихід продуктів горіння визначаються на основі матеріального балансу процесу горіння.

### 2.1. ПЕРЕРАХУНОК ВАННЯ СКЛАДУ ПАЛИВА З ВОЛОГОГО НА СУХЕ

Сучасні печі силікатних виробництв використовують газоподібне паливо та іноді мазут.

Склад палива для виконання розрахунків горіння має бути відомий. Необхідно враховувати, що для газоподібних палив склад дається на сухий газ. Перерахування складу газоподібного палива із сухого на вологий провадиться зв наступними формулами.

Знаючи відсотковий вміст вологи в газі [ $\text{H}_2\text{O}$ ], можна перерахувати всі інші складові сухого газу на вологий робочий газ, наприклад:

$$\varphi\text{CH}_4^B = \varphi\text{CH}_4^C((100-\varphi\text{H}_2\text{O})/100) \text{ і т.д.} \quad (1.19)$$

У магістральному природному газі міститься дуже невелика кількість вологи, приблизно 0,5–1,5%. При транспортуванні газу на великі відстані він піддається ретельному очищенню від різних домішок і вологи.

## 2.2.ТЕПЛОТА ЗГОРАННЯ ПАЛИВА

Теплота згорання палива (теплотворність) — це кількість теплоти, що виділяється при повному згоранні всіх горючих складових палива, віднесена до 1 кг або 1 м<sup>3</sup> палива. Відомо, що тепловий ефект горіння гідрогену залежить від агрегатного стану його продукту горіння (води), тому для палив розрізняють вищу і нижчу теплоту згорання.

В теплових розрахунках прийнято користуватися даними нижчої межі теплоти згорання —  $Q_H$ , кДж/м<sup>3</sup>. Для газоподібного палива така теплота згорання визначається як сума добутоків теплових ефектів складових горючих газів на їхню об'ємну частку. Для природного газу:

$$Q_H = 358,2\varphi(\text{CH}_4) + 637,52\varphi(\text{C}_2\text{H}_6) + 912,52\varphi(\text{C}_3\text{H}_8) + 1186,52\varphi(\text{C}_4\text{H}_{10}) + 1460,82\varphi(\text{C}_5\text{H}_{12}) \text{ кДж/м}^3 \quad (1.20)$$

## 2.3.ВИТРАТА ПОВІТРЯ НА ГОРІННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ОБ'ЄМУ ПРОДУКТІВ ГОРІННЯ

Кількість повітря для горіння визначається за теоретичною кількістю кисню, що вступає в реакції окиснення з урахуванням деякого надлишку, що забезпечує повне згорання палива.

Як відомо, склад повітря наступний: азот — 79,0% і кисень — 21,0% за об'ємом. Тобто, 1 м<sup>3</sup> кисню, що знадобиться для горіння буде, забезпечений 4,76 м<sup>3</sup> атмосферного повітря (100/21=4,76).

Витрата сухого повітря, що теоретично необхідна для горіння природного газу, визначається за наступною формулою:

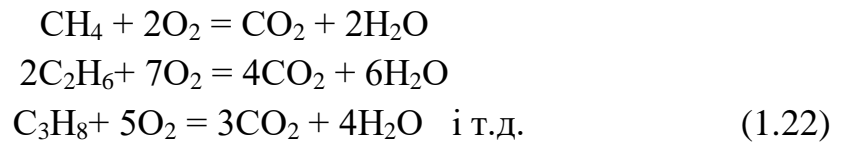
$$L = 0,0476 \cdot \{2\varphi(\text{CH}_4) + 3,5\varphi(\text{C}_2\text{H}_6) + 5\varphi(\text{C}_3\text{H}_8) + 6,5\varphi(\text{C}_4\text{H}_{10}) + 8\varphi(\text{C}_5\text{H}_{12})\}, \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (1.21)$$

У теплотехнічній літературі дане рівняння записують у вигляді:

$$L = 0,0476 \cdot \{2[\text{CH}_4] + 3,5[\text{C}_2\text{H}_6] + 5[\text{C}_3\text{H}_8] + 6,5[\text{C}_4\text{H}_{10}] + 8[\text{C}_5\text{H}_{12}]\}, \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Де у квадратних дужках вказані об'ємні частки газоподібних речовин, а коефіцієнти, що стоять перед формулами відповідних об'ємних часток вуглеводнів, які виражають у цьому випадку об'ємний відсотковий вміст кожного горючого компонента газу.

Стехіометричне співвідношення числа молей кисню на один моль кожного газу складає 2; 3,5; 5 і т.д. Їхній зміст зрозумілий з наступних прикладів реакцій горіння:



При необхідності вираз (1.21) може бути доповнений й іншими горючими газоподібними компонентами, наприклад,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}$  і т.д.

Витрата атмосферного повітря при його вологовмісті  $d$  (г/кг сухого повітря) буде дорівнювати:

$$L_d = (1 + 0,0016 d)L, \quad \text{м}^3/\text{м}^3 \quad (1.23)$$

Зміст множника 0,0016 стане зрозумілим з наступного:  $0,0016 = 1,29/804$ , де 1,29 — щільність сухого повітря,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , 804 — щільність водяної пари,  $\text{г}/\text{м}^3$ .

Вологовміст  $d$  можна визначити за  $i$ - $d$ -діаграмою, знаючи відносну вологість повітря (%) і температуру.

Дійсна витрата сухого повітря з урахуванням коефіцієнта витрати повітря дорівнює:

$$L_\alpha = \alpha \cdot L, \quad \text{м}^3/\text{м}^3 \quad (1.24)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт витрати повітря, що показує відношення дійсної кількості повітря, уведеного для горіння, до теоретично необхідного.

Дійсна витрата атмосферного повітря при його вологовмісті  $d$  складе:

$$L_{\alpha, d} = (1 + 0,0016 \cdot d) \cdot L_\alpha \quad \text{м}^3/\text{м}^3 \quad (1.25)$$

Для газу і мазуту коефіцієнт витрати повітря  $\alpha = 1,05 \div 1,20$ .

На спалювання 1  $\text{м}^3$  природного газу теоретично потрібно:

Кисню:

$$V(\text{O}_2) = 0,01(2 \cdot \varphi(\text{CH}_4) + 3,5 \cdot 2\varphi(\text{C}_2\text{H}_6) + 52\varphi(\text{C}_3\text{H}_8) + \dots), \quad \text{м}^3/\text{м}^3 \quad (1.26)$$

Кисню (з урахуванням  $\alpha$ ):

$$V(\text{O}_2) \cdot \alpha \quad (1.27)$$

Азоту:

$$V(\text{N}_2) = 3,76 \cdot \alpha \quad \text{м}^3 \quad (3,76 = 79/21) \quad (1.28)$$

Азоту (з урахуванням  $\alpha$ ):

$$V(N_2) \cdot \alpha \quad (1.29)$$

При повному згоранні будь-якого газоподібного палива утворюються продукти горіння у вигляді  $H_2O$  (в пароподібному стані),  $CO_2$ ,  $N_2$  і  $SO_2$ . Якщо горіння відбувається з надлишковою кількістю повітря, то в димових газах буде також присутній кисень. Загальний об'єм продуктів горіння при спалюванні палива наступний:

при згоранні теоретично необхідною кількістю повітря, тобто при  $\alpha = 1$ ,

$$V = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O}, \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (1.30)$$

при спалюванні з надлишком повітря при  $\alpha > 1$

$$V_\alpha = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O} + V_{O_2}, \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (1.31)$$

Об'єм продуктів горіння газоподібного палива (природного газу) знаходиться за формулами:

$$\begin{aligned} V_{CO_2} &= 0,01 \cdot (1 \cdot \varphi(CH_4) + 2 \cdot \varphi(C_2H_6) + 3 \cdot \varphi(C_3H_8)), \text{ м}^3/\text{м}^3 \\ V_{H_2O} &= 0,01 \cdot (2 \cdot \varphi(CH_4) + 3 \cdot \varphi(C_2H_6) + 4 \cdot \varphi(C_3H_8)), \text{ м}^3/\text{м}^3 \end{aligned} \quad (1.31)$$

а також:

$$V_{O_2} = 0,21(\alpha - 1) \cdot L, \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (1.32)$$

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot L_\alpha, \text{ м}^3/\text{м}^3 \dots\dots\dots (1.33)$$

Загальна кількість продуктів горіння складає:

$$V_\alpha = \Sigma V, \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (1.34)$$

Для визначення відсоткового складу продуктів горіння необхідно знати об'єм окремих складових, наприклад:

$$V(CO_2) = \frac{100}{V_\alpha} V_{CO_2} \text{ і т.д.} \quad (1.35)$$

Визначаємо об'ємну частку продуктів горіння та виписуємо у таблицю:

$\varphi(CO_2)$	$2\varphi(H_2O)$	$\varphi(N_2)$	$\varphi(O_2)$	$\Sigma$

## 2.4. ТЕМПЕРАТУРА ГОРІННЯ ПАЛИВА

Дійсний об'єм продуктів згорання буде більший теоретичного за рахунок азоту, кисню та водяної пари, яка міститься в надлишковому повітрі.

Також можлива присутність недопалу палива. Недопал — це процес, коли горючі компоненти палива не повністю згорають в межах робочого простору топки. Розрізняють хімічний (згорання палива у недостатній кількості повітря), фізичний (недостатнє перемішування) та механічний (можливий при використанні твердого і рідкого палива і обумовлений винесенням твердих кусків палива або поганим розпилюванням рідкого палива).

Процеси горіння у виробництві скла та кераміки проводять у надлишку повітря та періодичною зміною напрямку руху палива та димових газів.

Під температурою горіння палива розуміється та температура, до якої нагріваються продукти згорання за рахунок теплоти, що виділяється при горінні палива. В теорії горіння палива розрізняють три температури: калориметричну (адіабатну), теоретичну і дійсну.

### 2.4.1. Калориметрична температура і жаровидатність палива

Так, якщо припустити, що вся теплота, яка виділяється при горінні палива, піде тільки на підвищення температури продуктів згорання, то в цьому випадку їх температура буде найвищою і називається калориметричною ( $t_k$ ).

На величину калориметричної температури впливають такі фактори як підігрів повітря і палива, теплота згорання палива, хімічний недопал, коефіцієнт витрати повітря, процентний вміст кисню у повітрі.

Підігрів повітря і палива завжди підвищує калориметричну температуру. Із збільшенням коефіцієнту витрати повітря  $\alpha$  знижується  $t_k$ , тому що збільшується об'єм продуктів згорання.

Із збільшенням теплоти згорання одночасно зростає і об'єм продуктів згорання і тому, наприклад, теплота згорання водню нижча ніж метану, проте його калориметрична температура висока.

$$t_k = \frac{Q_n^p + Q_\phi + Q_n}{V_0 \cdot C_0^t}, \dots\dots\dots (1.36)$$

де  $Q_\phi$  — фізичне тепло, що вноситься з підігрівом повітрям і паливом, МДж/м<sup>3</sup> палива;

$Q_n$  — витрати тепла від недопалу палива, МДж/м<sup>3</sup> або МДж/кг палива;

$V_0$  — об'єм продуктів горіння, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> або м<sup>3</sup>/кг палива;

$C_0^t$  — середня теплоємність продуктів згорання в інтервалі температур 0 – t, МДж/м<sup>3</sup>·град.

Розрахунок калориметричної температури ведуть наближеними методами. Величина  $t_k$  обчислюється за формулою (1.34) методом послідовного наближення у зв'язку з необхідністю визначення теплоємності за величиною  $t_k$ . Також  $t_k$  можна визначити за допомогою  $i - t$  діаграм, які представлені у додатку Е або будуються за розрахованою ентальпією в залежності від температури:

$$i_k = \frac{(Q_n^p + Q_{\phi} + Q_p)}{V_0}, \text{ МДж/м}^3 \quad (1.37)$$

При температурі продуктів згорання вище  $1200^\circ\text{C}$  починаються ендотермічні реакції розкладання (дисоціації)  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$  на  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ . Ці процеси відбуваються з поглинанням тепла, внаслідок чого температура знижується.

Далі за допомогою  $i-t$  діаграми знаходять наближене значення  $t_k$  на осі  $t$ , підраховують теплоємність продуктів згорання  $C_0^t$  (1.2).

Після чого визначають калориметричну температуру за формулою

$$t_k = \frac{i_k}{C_0^t}. \quad (1.38)$$

Для того, щоб калориметрична температура була характеристикою палива, її треба визначати при однакових умовах.

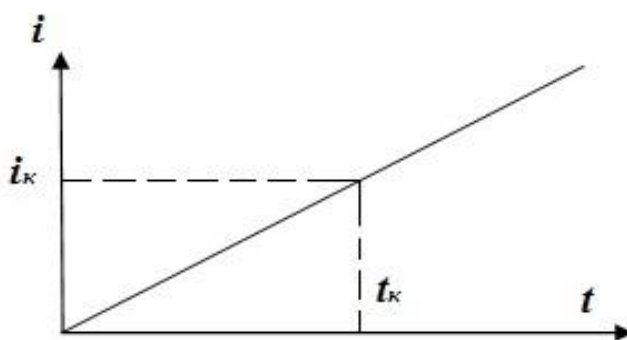


Рис. 1.2. Пояснення до визначення калориметричної температури за  $i-t$  діаграмою

Ці умови такі:

- а) температура суміші палива з повітрям дорівнює  $0^\circ\text{C}$ ;
- б) повне горіння відбувається з теоретичною кількістю повітря;
- в) у камері згорання підтримується нормальний тиск ( $p=101,3$  кПа).

В цьому разі калориметрична температура називається жаровидатністю палива. Відповідна залежність буде такою

$$t_{жс} = \frac{Q_n^p}{V_{n.з}^0 \cdot C_0^{t_{жс}}} \quad (1.39)$$

### 2.4.2 Теоретична температура

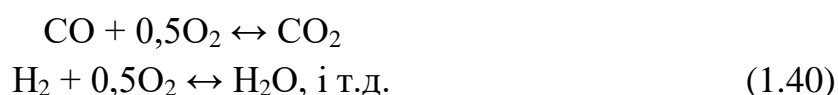
Температура, яка нижча від калориметричної на величину дисоціації на з теоретичною температурою.

При розрахунках процесів горіння палива визначають теоретичну температуру, що враховує тепловиділення без втрат теплоти назовні.

Теоретична температура горіння може бути визначена з досить високою точністю, однак дійсна температура пічних газів знаходиться приблизно внаслідок того, що розрахунком важко врахувати конструктивні особливості паливоспалюючих пристроїв і конкретні умови експлуатації печей.

Для розрахунків температур горіння складається баланс теплоти для газів, що надходять у зону горіння (горючий газ + повітря) і для газів – продуктів горіння (димові гази).

Калориметричну температуру підраховують, приймаючи, що реакції горіння ідуть до утворення вищих окислів  $CO_2$  і  $H_2O$ , тобто до кінця. Насправді реакції горіння оборотні, наприклад,



при цьому ендотермічні зворотні реакції дисоціації  $CO_2$  і  $H_2O$  призводять до зниження температури продуктів згорання. Із урахуванням дисоціації одержимо залежність для так званої теоретичної температури

$$t_{теор} = \frac{Q_n^p + Q_{ф.пал} - Q_{х.н} - Q_{дис}}{V_{n.з}^0 \cdot C_0^{t_{теор}}} \quad (1.41)$$

де  $Q_{дис}$  – теплота дисоціації.

### 2.4.3 Дійсна температура

Спалювання палива в промислових агрегатах неподільно зв'язане з тепловіддачею до нагрітих виробів, кладки, водоохолоджуваних елементів. Тому тільки частина теплоти, що виділяється при горінні палива залишається у продуктах згорання і йде на підвищення тп.з. Відповідно дійсна температура завжди нижча ніж калориметрична.

В інженерних розрахунках використовують так званий пірометричний коефіцієнт і дійсну температуру визначають таким чином:

$$t_d = \eta \cdot t_k, \quad (1.42)$$

де  $\eta$  — пірометричний коефіцієнт, що дорівнює 0,65–0,75.

## 2.5. РІВНЯННЯ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСУ

Згорання відбувається в адіабатичних умовах.

$$Q_H + C_{\text{п}} \cdot t_{\text{п}} + C_{\text{пв}} \cdot t_{\text{пв}} \cdot L_{\alpha} = V_{\alpha} \cdot i_{\text{пг}} \quad (1.43)$$

Необхідно відзначити, що висококалорійні гази, якими є природні гази, перед спалюванням звичайно попередньо не підігріваються. Тому фізичною теплотою газів можна знехтувати, а член  $C_{\text{п}} \cdot t_{\text{п}}$  також можна опустити. Базовий вираз для визначення тепломісткості продуктів згорання, а потім і всіх температур горіння, приймає наступний вигляд:

$$i_{\text{пг}} = \eta \cdot \frac{Q_H + C_{\text{пв}} \cdot t_{\text{пв}} \cdot L_{\alpha}}{V_{\alpha}}, \text{ кДж/м}^3. \quad (1.44)$$

Визначена із наведеного рівняння тепломісткість продуктів горіння ( $i_{\text{пг}} = C_{\text{пг}} \cdot t_{\text{пг}}$ ), дозволяє визначити температуру продуктів горіння —  $t_{\text{пг}}$ .

## 2.6. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ГОРІННЯ РАХУНКОВИМ СПОСОБОМ

Для визначення температури горіння палива можна користуватися таблицею ентальпій газів (додаток Г) або теплоємності газів (додаток Д). За їхньою допомогою неважко розрахувати і побудувати відповідну  $i$ - $t$  діаграму для будь-якого складу продуктів горіння. При цьому варто пам'ятати, що загальна тепломісткість адитивно складається з тепломісткостей всіх компонентів продуктів горіння:

$$I_{\text{пг}} = 0,01 (i_{\text{CO}_2} \phi \text{ CO}_2 + i_{\text{H}_2\text{O}} \phi \text{ H}_2\text{O} + \dots), \text{ кДж/м}^3 \quad (1.45)$$

## 2.7. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ГОРІННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ *i-t* ДІАГРАМ

Для визначення температур горіння палива використовують *i-t* діаграми, які приведені у додатку Е.

Найперше визначають ентальпію повітря за допомогою *i-t* діаграми. Ентальтія повітря визначається відповідно до заданої температури повітря. Від значення заданої температури проводимо паралельну лінію до осі абсцис до перетину кривою «повітря» та опускаємося на вісь «ентальпії». Таким чином визначаємо *i пов*.

Розраховуємо надходження теплоти, що дорівнює сумі теплоти згорання ( $Q_H$ ) та *i пов*  $La$ . Далі знаходимо тепловміст продуктів згорання як відношення надходження теплоти до об'єму продуктів згорання. За *i-t* діаграмою визначаємо температуру горіння палива: калориметрична температура згорання визначається за перетином з пунктирною лінією, а теоретична температура згорання визначається за перетином із суцільною лінією. Тепловміст продуктів горіння з урахуванням ККД визначаємо як добуток тепловмісту продуктів згорання та пірометричного ККД.

Дійсна ентальпія горіння визначається як добуток тепловмісту продуктів згорання та пірометричного ККД.

## РОЗДІЛ 3. ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ СПАЛЕНІ ПАЛИВА

В результаті виробничої діяльності людства, пов'язаної із споживанням великої кількості ресурсів і викидів у навколишнє середовище різних підходів, відбувається порушення рівноваги екологічної системи Землі. Велику проблему є забруднення території міста де зосереджені енергоємні підприємства. Значна концентрація джерел утворення шкідливих речовин на хімічних та металургійних заводах призводить до настільки сильного локального забруднення в радіусі 30–50 км від джерела, що ці підприємства в значній мірі що ці підприємства в значній мірі визначають забруднення цих районів. При цьому основна частка цих викидів утворюється в процесі спалювання палива.

Зменшення викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище в результаті удосконалення процесів спалення палива набуває в наш час особливе значення в зв'язку з тим, що методи очищення продуктів спалення шкідливих речовин для умов теплоенергетичних агрегатів чи не розроблені повністю. При цьому впровадження їх пов'язане з високим високими капітальними витратами і вимагає великих територій для розміщення систем очищення.

### 3.1. ОСНОВНІ ЗАБРУДНЮВАЧІ АТМОСФЕРИ ПРИ СПАЛЕНІ ПАЛИВА ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКА

#### *Кількісні критерії шкідливих викидів*

В якості критеріїв кількості шкідливих викидів звичайно використовують декілька кількісних показників: масова концентрація викиду, питомий вихід викиду (коефіцієнт виходу). Ці показники можуть бути висловлені в масовому або процентному відношенні до різних параметрів таких як тривалість, маса чи об'єм газів продуктивність джерела.

Які показники використовуються для контролю викидів від джерел забруднення, в інспективних цілях для оцінки технічного рівня виробництва і режимів спалення палива, а також для оцінювання ефективності роботи очисних пристроїв.

*Масова концентрація викидів. Гранично допустимі концентрації (ГДК).* Однією з найбільш важливих галузей використання критеріїв викидів є встановлення існуючого рівня грани з небезпечного забруднення атмосфери.

*Масова концентрація викидів*  $C^x$  це маса виділених забруднюючих речовин, яка віднесена до одиниці об'єму газу, стандартизованих за температурою і тиском. Цей показник виражають у  $\text{мг/м}^3$ . В деяких випадках використовують інші одиниці вимірювання: %, р.р.м. (частки на мільйон), моль/літр.

Якщо концентрацію речовини в  $\text{мг}/\text{м}^3$  позначити через  $C$ , то для інших одиниць вимірювання отримано такі співвідношення:

$$C^x, \% = \frac{8314,7 \cdot 10^{-4} \cdot C \cdot T}{MP}, \quad (3.1)$$

$$C_{p.p.m.} = \frac{8314,7 \cdot C \cdot T}{MP}, \quad (3.2)$$

$$C_{\text{моль/л}} = \frac{10^{-6} C}{M}, \quad (3.3)$$

де  $T$  – температура,  $K$ ;

$P$  – тиск,  $Pa$ ;

$M$  – молекулярна маса речовини,  $kg/\text{моль}$ .

Масова концентрація шкідливих речовин використовується для граничного допустимих концентрації (ГДК). ГДК характеризує таку кількість шкідливих речовин у повітрі, при якій на людей і навколишнє середовище не впливає ні пряма, ні побічна дія. Норма ГДК встановлюється за відношенням до порогових величин з деяким запасом. Для особливо небезпечних речовин значення ГДК встановлюється з більшим запасом наприклад бензопірен має 10 разовий запас.

На практиці використовують ГДК для населених пунктів і робочих зон. ГДК для робочої зони (ГДК<sub>р.з.</sub>) значно більше, ніж для населених пунктів, тому що враховується тривалість роботи, яка дорівнює 7–8 годин ГДК населених пунктів поділяється на: максимальну разовий за 20 хвилин (ГДК<sub>м.р.</sub>), середньодобовий (ГДК<sub>с.д.</sub>). При цьому маються на увазі середньодобова концентрація речовин за рік, а не середня за добу.

Деякі шкідливі речовини, поступаючи в атмосферу, перетворюються в інші речовини часто більш токсичні в цьому випадку треба зробити відповідні перерахунки прикладом можуть бути оксиди нітрогену.

При спаленні палива в залежності від умов спалення і теплообміну в агрегаті кількість  $NO$  і  $NO_2$  продукти згорання може коливатися. Але концентрація  $NO$  завжди більше і дорівнює 80-97 % від  $NO$  і  $NO_2 = NO_x$ . Однак ГДК для  $NO$  і  $NO_2$  значно відрізняються (у 7 разів). Біля 80%  $NO$  окиснюється в атмосферному повітрі до  $NO_2$ , тому розрахункову величину ГДК для оксидів нітрогену необхідно провести до нових значень концентрації  $NO$  і  $NO_2$ , з урахуванням зміни молекулярної маси в процесі до окиснення  $NO$ .

Зазначені ГДК для різних забруднювачів наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Значення ГДК основних шкідливих речовин

№ з/п	Речовина	Для населених пунктів		ГДК <sub>Р.З.</sub> , мг/м <sup>3</sup>	А, мг/м <sup>3</sup>
		ГДК <sub>М.Р.</sub> , мг/м <sup>3</sup>	ГДК <sub>М.Р.</sub> , мг/м <sup>3</sup>		
1	Нітроген(IV) оксид, NO <sub>2</sub>	0,085	0,04	2,0	–
2	Нітроген(II) оксид, NO	0,6	0,06	5,0	–
3	Бензопірен, C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	–	1·10 <sup>-6</sup>	1,5·10 <sup>-4</sup>	12,6·10 <sup>-5</sup>
4	Карбон(II) оксид, CO	5	3	20	–
5	Сульфур(IV) оксид, SO <sub>2</sub>	0,5	0,05	10,0	16,5
6	Гідроген сульфід, H <sub>2</sub> S	0,08	–	10,0	–
7	Сажа	0,15	0,05	–	–

А — коефіцієнт відносної агресивності забруднюючої речовини, який використовують для оцінювання економічної шкоди.

Початкові значення концентрації оксидів нітрогену:

$$C_{NO_x} = C_{NO} + C_{NO_2} \quad (3.4)$$

Концентрація NO<sub>2</sub>, яка одержана за рахунок до окиснення NO:

$$C'_{NO_2} = C_{NO} \cdot K \frac{M_{NO_2}}{M_{NO}}, \quad (3.5)$$

Залишок NO:

$$C'_{NO} = C_{NO}^{1-k}, \quad (3.6)$$

Таким чином, кінцеве значення оксидів нітрогену в повітрі буде наступним:

$$C'_{NO} = C_{NO_2} + C'_{NO_2} + C'_{NO} \quad (3.7)$$

*Визначення масового (валового) потоку викиду.*

Масовий потік вихід це маса виділених забруднюючих речовин в одиницю часу (кг/с, кг/годину, т/ рік). Цей критерій дає відомості про загальну кількість видів і є балансовими критерієм він використовується для визначення сумарного ступеня забруднення атмосфери при виконанні регіональних і галузевих аналізів. Масовий потік у забруднювачів у продуктах згорання дорівнює:

$$M_x = C_x \cdot 10^{-6} \cdot V_d, \text{ кг/с} \quad (3.8)$$

$$M_x = C_x \cdot 10^{-9} \cdot V \cdot V_d \cdot K_p \cdot 31,5 \cdot 10^6, \text{ кг/с} \quad (3.9)$$

де  $C_x$  — концентрація, мг/м<sup>3</sup>;  $V_d$  — витрата диму, м<sup>3</sup>/с;  $31,5 \cdot 10^6$  — кількість робочого часу протягом року, секунд;  $K_p$  — коефіцієнт, що враховує безперервність роботи агрегату.

Витрати диму можна визначити експериментальним шляхом, вимірюючи середній динамічний тиск потоку розрахунково-експериментальним шляхом, (за коефіцієнтом витрати повітря, визначивши хімічний склад диму), та за допомогою емпіричних формул.

*Питомий вихід викиду (коефіцієнт викиду)*

Коефіцієнт викиду — це відношення маси утвореної шкідливої речовини до маси або до іншої величини, яка висловлює кількість продукції промислового джерела. Цей коефіцієнт виражають в кг/ГДж (кг/Гкал). Коефіцієнт викиду є виробничо-технологічної показником і часто використовується для порівняння показників роботи на аналогічних агрегатах.

## **3.2. СПОСОБИ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН ПРИ СПАЛЮВАННІ ПАЛИВА**

В результаті життєдіяльності людини і явищ, що проходять на Землі, відбувається забруднення навколишнього середовища. Ці забруднення здійснюють негативну дію на живу природу (людина, тварини та рослини) і неживі складові природи (вода, земля, будівлі).

З двохсот шкідливих речовин на які встановлені норми гранично допустимих концентрацій ГДК виділяють п'ять основних:

1) тверді частинки (пил, зола, сажа);

2) оксиди сульфуру;

3) оксиди нітрогену;

4) оксиди карбону;

5) вуглеводи, які складають 90–98 % валового викиду шкідливих речовин в більшості міст, а також бензопірен (C<sub>20</sub>H<sub>12</sub>).

Для більшості промислових регіонів характерні вагові співвідношення існування цих речовин в атмосферному повітрі: оксиду карбону — 50 %; оксид сульфуру — 20 %, тверді частинки — 16–20 %, оксиди нітрогену 6–8 %, вуглеводні — 25%.

До основних забруднювачів атмосферного повітря відносять амоніак, гідроген сульфід, озон, альдегіди, поліциклічні ароматичні вуглеводи, хлорорганічні сполуки, хлориди, сполуки свинцю, кадмію, ртуті, ряд багатокомпонентних, в тому числі, сполуки сульфуру (SO<sub>2</sub> і SO<sub>3</sub>).

### 3.2.1. Тверді частинки

Основними промисловими джерелами викидів в атмосферу твердих частинок є електростанції, промислові котельні, металургійні, цементні заводи, вугле- та нафтозбагувальні підприємства.

Більше 60 % загальної кількості аерозолів, які попадаються атмосферне повітря з промислових джерел, складають тверді частинки, які утворюються при спалюванні вугілля. Це, головним чином зола, пил, в значно менших концентраціях сажа, в деяких випадках аерозолі з мікроконцентраціями канцерогенних речовин. Викиди золи при спалюванні твердого палива залежать від складу палива, типу топкового пристрою (шарова, камерна топка з сухим або рідким шлаковидаленням) та від ефективності пилозатримуючих пристроїв).

В зв'язку з використанням низькосортowego вугілля із вмістом мінеральної частини спостерігається тенденція до підвищення викиду твердих частинок. Однак, внаслідок безперервного підвищення ефективності золоутримання (на кращих енергоблоках більше 98 %) і збільшення частки газу і мазуту в паливному балансі, загальний рівень пилу в повітрі зменшується.

В процесі спалення вугілля з кількістю мінеральної частки  $\omega(A^P) = 16\text{--}20\%$  в камерних топках винесення твердих речовин палива за межі топкової камери складає до 20 % від його маси.

Річні викиди часток пилу можна розрахувати за допомогою формули:

$$M_{\text{ТВ}} = 0,01 B \left[ \alpha_{\text{УН}} \omega(A^P) - q_{\text{Н}}^{\text{УН}} \left( \frac{Q_{\text{Н}}^P}{32680} \right) \right] \cdot (1 - \eta_3), \quad (3.10)$$

*де B - витрати палива, т/рік;*

*$\omega(A^P)$  - зольність на робочу масу. %;*

*$\alpha_{\text{УН}}$  - частка золи у викидах;*

*$q_{\text{Н}}^{\text{УН}}$  - частка втрати тепла від механічного недопалу;*

*$Q_{\text{Н}}^P$  - теплота згорання палива, кДж/кг;*

*$\eta_3$  - ККД золоутримання.*

При відсутності систем пилозатримання в котельних установках малої потужності з шаровими топками викид твердих частинок в атмосферу порівнюються з викидами цих часу часточок на ТЕЦ, які обладнані обчислювальним пристроями.

Викиди твердих часток повітря все що є одним із головних видів забруднення, які утворюються в процесі спалювання палива.

Якщо для крупних котельних установок покращення систем із затримання і будівництво високих труб дозволяє значною мірою зменшити частину проблеми, то для малих котельних установок з шаровими топками практично єдиним радикальним рішенням є перехід їх на мазут або на природний газ. Тверде паливо поставляє в атмосферу в 100–200 разів більше твердих частинок, ніж рідке паливо.

При спаленні рідкого палива утворюється значна кількість дрібнодисперсної стажі, яка має більш високу токсичність ніж звичайний пил, а також несприятливо діє на прозорість атмосфери.

Однак, в зв'язку з безперервним покращенням систем пилозатримання при роботі парогенераторів на твердому паливі із зміною паливного балансу, кількість твердих часточок, які викидаються при спаленні вугілля, дорівнює викидом твердих часточок при спаленні рідкого палива.

Шкідлива дія пилу на організм людини залежить від багатьох факторів (концентрації в повітрі, хімічного складу, розміру часточок, дисперсності, твердості, електрзарядженості пилу).

Характерні дії газоподібних шкідливих речовин на людину різні.

Так, ознаки легкого отруєння спостерігаються, коли концентрація CO складає 115-575 мг/м<sup>3</sup>, для SO<sub>2</sub> 65-130 мг/м<sup>3</sup>, для NO<sub>2</sub> - 20 мг/м<sup>3</sup>, а короткочасна весна дія при концентраціях CO – 5700 мг/м<sup>3</sup>, SO<sub>2</sub> – 1600 мг/м<sup>3</sup>, NO<sub>2</sub> - 150 мг/м<sup>3</sup> вже смертельно небезпечна для людини.

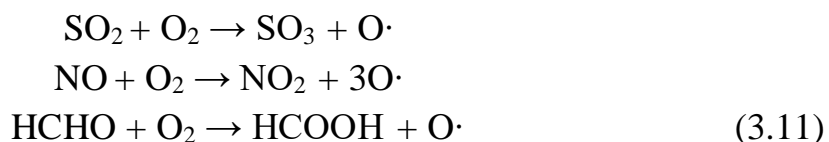
При оцінюванні забруднення навколишнього середовища треба врахувати час, протягом якого шкідливі речовини зберігаються в атмосфері  
таблиця 3.2.

Таблиця 3.2. Час зберігання речовин в атмосфері

№ з/п	Сполука		Середній час зберігання в атмосфері
1	Азот	N <sub>2</sub>	10 <sup>7</sup> років
2	Кисень	O <sub>2</sub>	10 <sup>6</sup> -2·10 <sup>7</sup> років
3	Карбон (IV) оксид	CO <sub>2</sub>	5-10 років
4	Водень	H <sub>2</sub>	4-8 років
5	Метан	CH <sub>4</sub>	4-7 років
6	Нітроген (IV) оксид	NO <sub>2</sub>	8-11 діб
7	Нітороген (II)оксид	NO	9 діб
8	Амоніак	NH <sub>3</sub>	5-6 діб
9	Скульфур (IV) оксид	SO <sub>2</sub>	2-4 доби
10	Органічний вуглець (за винятком зв'язаного)		2 доби

Після виходу з джерела утворення шкідливі речовини не залишаються в атмосфері в незмінному вигляді. При цьому можуть проходити шкідливі хімічні реакції, температурні зміни, які призводять до конденсації газів і парів, і утворюють тумани, краплі рідини. Сонячне випромінювання впливає на хімічні реакції, які проходять між забруднюючими речовинами і навколишнім середовищем.

До числа речовин, що поглинають ультрафіолетове випромінювання ( $h\nu$ ) відносять  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ , а також альдегіди:



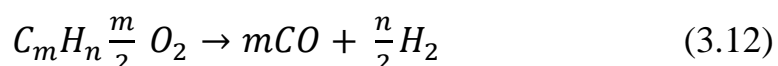
Значно впливає на емісію шкідливих речовин енергоспоживання. Так, дійсні витрати енергії перевищують теоретичні при виробленні сталі, алюмінію, цементу, нафти, паперу відповідно в 4, 6, 15, 9, 125 разів. Темпи росту енергоспоживання значно вищі, ніж темпи росту населення. Так, подвоєння використання енергоресурсів відбулося за 20–25 років, електроенергії — 20 років, ядерної енергії — 5–8 років, а подвійне зростання населення — за 40 років.

### 3.2.2. Утворення оксидів карбону при спалюванні газоподібного палива

При спалюванні газоподібного палива утворюються карбон (IV) оксид та карбон (II) оксид. CO — це безбарвний правильний без запаху, токсичний. Він здатний реагувати з гемоглобіном крові і швидкістю майже в 200 разів перевищує швидкість зв'язування кисню з гемоглобіном. CO — несолетвірний оксид, не взаємодіє з водою, кислотами, лугами. При високих температурах він використовується як відновник багатьох оксидів метал. Карбон (II) оксид утворюється при спалюванні вуглеводневих палив як з недоліком, так і з надлишком кисню тільки в першому випадку CO є кінцевим продуктом, а в другому проміжним.

При повному спалюванні вуглеводів на початковій ділянці горіння відбувається накопичення CO, а потім його доопалення по довжині факела. Наприклад, при горінні метану у факелі на відстані 0–2d звичайно міститься 2–3 відсотки CO, а на відстані 10d — 0,1–0,01 % в залежності від інтенсивності перемішування компонентів горіння і відводу продуктів згорання.

В загальному вигляді хімічна реакція утворення CO при спалюванні вуглеводів виглядає:



У дійсності ця реакція має ланцюгових характер з утворенням проміжних продуктів.

Концентрація CO значною мірою залежить від температури. При спалюванні природного газу з  $\alpha=1,2$  продукти згорання містять такі значення CO: 1500 К — 0,003 %, 2000 К — 0,06 %, 2800 К — 1,7 %.

Суха суміш CO з киснем поводить ся інертно, і нагріта до 700 °С, практично не реагує. Однак додавання у цю суміш водяних парів призводить до різкого зростання швидкості реакції, тому, що в цьому випадку утворюються проміжні компоненти (H і OH). За результатами багатьох досліджень швидкість окиснення CO прямопропорційна величині (H<sub>2</sub>O)<sup>0,5</sup>.

Незважаючи на все зростаючі обсяги переробки паливних копалин, за останнє сторіччя помітного збільшення концентрації CO в атмосфері не спостерігається. Це пояснюється природними процесами зниження концентрації CO. В цьому випадку найважливіше значення має окиснення гідроксильними радикалами, які утворюються в результаті фотохімічних реакцій води і атомів кисню:



Концентрація гідроксильних радикалів достатньо висока ( $1,5 \cdot 10^6$  молекул/см<sup>3</sup>) для ефективного видалення CO:



Таким чином, гідроксильний радикал бере участь як при спалюванні CO у факелі, так і в процесі його вилучення з атмосфери шляхом окиснення до CO<sub>2</sub>.

### **3.2.3. Утворення оксидів сульфуру і способи їх зменшення**

Сульфур — один з головних токсичних компонентів, що міститься в органічному паливі. При згоранні він окиснюється до оксидів SO<sub>x</sub>. До 80% викидів оксидів сульфуру SO<sub>x</sub> припадає на котельні установки. Разом з тим оксиди сульфуру належать до найнебезпечніших і значних забруднень навколишнього середовища, для тваринного і рослинного світу, споруджень із металу та каменю.

При взаємодії SO<sub>2</sub> з водяною парою повітря утворюються аерозолі сульфатної кислоти H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, що призводить до утворення «кислотних дощів». SO<sub>2</sub> вважається найнебезпечнішим забруднювачем для металів і будівельних матеріалів (вапняку, мармуру, шиферу й ін.). Особливо чутливі до впливу SO<sub>2</sub> синтетичні тканини. При вмісті SO<sub>2</sub> у повітрі 0,008–0,015% уже можливі

серйозні отруєння через 30 хв., при 0,06% короткочасна дія небезпечна для життя людини. Сульфур(IV) оксид взаємодіє з киснем повітря та утворює SO<sub>3</sub>, причому найбільш сприятливі умови протікання цієї реакції знаходяться у межах озонового шару атмосфери, де в процесі розпаду молекул озону генерується атомарний кисень. У результаті в стратосфері на висоті 18 км присутній шар з високою концентрацією SO<sub>3</sub>. Оксиди сульфуру активно взаємодіють в атмосфері з оксидами нітрогену, утворюючи токсичні комплекси, дія яких значно сильніша, ніж їхніх окремих компонентів. Це приклад взаємного підсилення дії шкідливих речовин. Основна кількість сульфуру (близько 99%) окиснюється до SO<sub>2</sub>, тому її масовий викид в атмосферу визначається за цим оксидом, г/с.

Наявність у димових газах сульфур(IV) оксиду обумовлено постійною її присутністю в твердому і рідкому паливі (і в природному газі деяких родовищ) різних сполук сульфуру — сульфідів та органічних сполук. При окиснювальному спалюванні палива сульфур окиснюється до сульфур(IV) оксиду:



Відновне спалювання з метою отримання генераторного газу дозволяє отримати H<sub>2</sub>S, який потім згорає, утворюючи той же сульфур(IV) оксид:



Сульфур(IV) оксид, що міститься в димових газах, практично не впливає на процес виробництва енергії. Сульфур (VI) оксид SO<sub>3</sub> обумовлює сіркокислу точку роси. За нею вибирають температуру відхідних газів котлів, і вона є одним з основних факторів ефективної роботи газоочищення.

Але практична відсутність впливу SO<sub>2</sub> на процес виробництва енергії «компенсується» активним впливом цієї речовини на навколишнє середовище: сульфур(IV) оксид в атмосфері під впливом озону, що утворюється з кисню повітря під дією сонячного світла, окислюється до сульфур(VI) оксид, який з'єднується з водяною парою і утворює пари сульфатної кислоти.

Щільність парів сульфатної кислоти, так само як і парів нітратної кислоти в 3–4 рази більше щільності повітря. Ці пари під дією гравітації та з атмосферними опадами надходять в ґрунт. В результаті прісноводні водойми та річки закислюються, що призводить до втрати частини флори і фауни та заміни їх іншими, більш стійкими, які не забезпечують необхідну регенерацію води. Крім того, суміш сульфатної та нітратної кислот постійно розчиняє важкі метали, вносить їх у прісну воду і таким чином впливає на живі організми.

Скорочення викидів сполук сульфуру під час спалювання палива може бути здійснено трьома способами:

- шляхом очищення палива від сполук сульфуру до його спалювання;
- зв'язуванням сульфуру в процесі горіння;
- в результаті очищення димових газів.

Методи зменшення викидів оксидів сульфуру на стадії підготовки палива до спалювання широко використовуються для рідкого і значно рідше для твердого палива. Сульфур з нафти видаляється на нафтопереробних заводах у процесі гідрогенізації (або каталітичного гідратіровання) у присутності кобальт-молібденового каталізатора за температури 250–500 ° С і тиску 1,4–10 МПа. У ході каталітичних реакцій відбувається розпад сульфоровмісних органічних сполук з утворенням газоподібного гідроген сульфід, який відокремлюється і відновлюється до елементарного сульфуру.

У вугіллі сульфур присутній у піриті (колчеданий сульфур  $\text{FeS}_2$ ) і органічних сполуках, які видаляються: піритовий сульфур — фізичними методами; сульфур в органічних сполуках — термічними або хімічними методами.

При фізичних методах вугілля дроблять та видаляють використовуючи способи розділення сумішей, які засновані на різниці густин вугілля і піриту або їх поверхневих властивостях.

Найбільш поширеним способом зв'язування сульфуру в процесі горіння є спосіб спалювання вугілля у киплячому шарі. Застосування киплячого шару при спалюванні сірчастого вугілля дозволяє значно зменшити вміст оксидів сульфуру і нітрогену в димових газах. Для утворення киплячого шару на нерухомій решітці, через яку подається повітря під тиском, використовується суміш дробленого вугілля з розмірами частинок 1,5–6 мм, інертного матеріалу (піску, золи та ін) і вапняку. Під дією висхідного потоку повітря утворюється суспензійний киплячий шар. Одночасно з процесом горіння протікає процес десульфуризації, оскільки в киплячий шар безперервно вводиться вапняк, який складається в основному з  $\text{CaCO}_3$ .

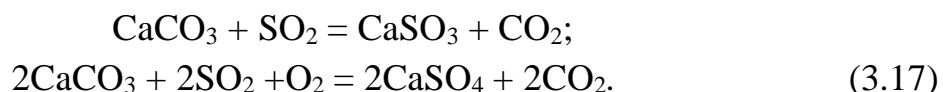
У результаті реакції, що протікає за температури  $t = 800\text{--}850$  ° С, утворюється гіпс. Ефективність видалення сульфуру в цьому випадку залежить від кількості вапняку. Підтримання співвідношення  $\text{Ca} / \text{S}$  приблизно в 1,5 рази більше стехіометричного дозволяє на 80% зв'язати  $\text{SO}_2$  і на виході з топки отримувати його з концентрацією до 200 мг / м<sup>3</sup>.

В даний час широко застосовуються різні варіанти і модифікації процесу мокрої абсорбційної газоочистки з використанням в якості сорбенту суспензій на основі вапняку  $\text{CaCO}_3$  або вапна  $\text{CaO}$  (мокрый вапняковий спосіб). Значно рідше використовуються методи мокрого очищення із

застосуванням натрій сульфату  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ , амоній сульфату  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$  та інших компонентів.

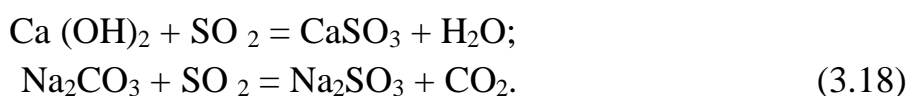
Мокрий вапняковий спосіб заснований на інтенсивній промивці димових газів в абсорбері, вапнякового суспензією з отриманням двоводного гіпсу  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Ця технологія є абсолютно безпечною, оскільки і вапняк і гіпс — нейтральні малорозчинні речовини.

У результаті контакту  $\text{SO}_2$  з краплями суспензії відбувається зв'язування  $\text{SO}_2$  за реакціями:



Кальцій сульфід доокиснюється в сульфат за рахунок пропуску повітря через пульпу. У результаті реакцій може бути отриманий товарний гіпс ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Ступінь десульфуризації газів при реалізації мокрого вапнякового методу може досягати 90%. Останнім часом все більше поширення знаходить *моро-сухий спосіб* очищення від оксидів сульфуру вапном  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  або содою  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

Моро-сухим називається такий спосіб, коли в порожнистий абсорбер, що продувається димовими газами, впорскують суспензію, яка зв'язує сульфур(IV) оксид, а рідина суспензії за рахунок теплоти димових газів повністю випаровується. При цьому мають місце реакції з утворенням сульфідів кальцію або натрію:



Ефективність очищення димових газів цим методом може досягати 90%. До переваг моро-сухого способу належать: простота технологічної схеми; менші, ніж при мокрому вапняковому способі, капітальні витрати; меншу витрату теплової енергії на підігрів димових газів порівняно зі схемою мокрого вапнякового способу; відсутність стічних вод.

Недоліками способу є: значне енергоспоживання; підвищена витрата дорогих реагентів (вапна або соди); низька якість сухих відходів (відсутність гіпсових в'язучих речовин); необхідність установки системи очищення димових газів від твердих частинок (продуктів реакцій) після абсорбера.

### 3.2.4. Утворення оксидів нітрогену і способи зменшення їх вмісту у викидах

Нітроген — один з найпоширеніших елементів у природі. Це газ без кольору і запаху. У біосфері нітроген існує в газоподібній формі ( $\text{N}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}$ ,

NO<sub>2</sub>), у вигляді сполук нітратної HNO<sub>3</sub> і нітратної HNO<sub>2</sub> кислот, солей амонію, а також входить до складу різноманітних органічних сполук.

Джерелом утворення оксидів нітрогену служить азот повітря і палива при спалюванні у технологічних агрегатах для спалювання палива. В даний час добре вивчені три принципово різних джерела утворення оксидів нітрогену:

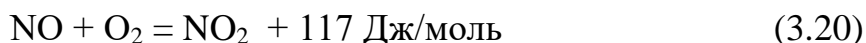
- *термічних* NO<sub>x</sub> з молекулярного азоту повітря за температури вище 1300 °С;
- NO<sub>x</sub> з нітрогену, що міститься в паливі (*паливні* NO<sub>x</sub>);
- NO<sub>x</sub> шляхом реакції молекулярного азоту повітря з вуглеводневими радикалами (*«швидкі»* NO<sub>x</sub>).

Оксиди нітрогену утворюються в процесі термічного окиснювання азоту повітря та палива при спалюванні палива в топках котлів, у циліндрах двигунів внутрішнього згорання, у камерах промислових печей.

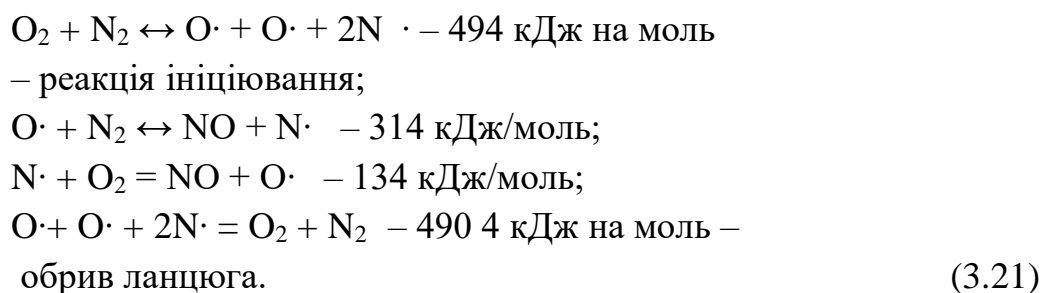
Реакція окиснення атмосферного азоту описується за допомогою рівняння:



На повітрі NO доокиснюється до NO<sub>2</sub>:



Термічна природа утворення NO з молекулярного азоту розроблена Я.Б. Зелюдовичем, де розглядається сукупність ланцюгових реакцій за участю кисню і азоту:

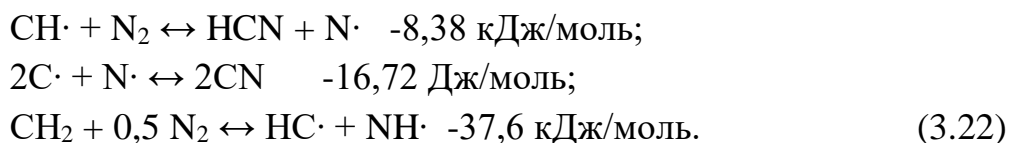


Оскільки енергія активації NO велика, то вона визначається, в основному, температурою, тому, ці оксиди нітрогену називаються термічними.

Останні дослідження показали, що при спалюванні палива виявляються більш високі швидкості утворення оксидів нітрогену NO<sub>x</sub>, ніж розрахункові. Ці оксиди нітрогену називають «швидкісними». Наприклад, для одержання рівноважних концентрацій NO при спалюванні метано-повітряної суміші

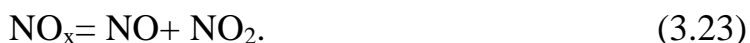
потрібно період  $10^{-2}$ – $10^{-3}$  секунд, однак час горіння складає близько  $10^{-4}$  секунди. Разом з цих у факелах міститься до до 40–50 р.р.м. NO.

Механізм утворення швидких NO був запропонований С. Фенімором, відповідно до якого швидкість утворення NO пояснюється зв'язування молекули газу радикалами  $\text{CH}\cdot$ ,  $\text{C}\cdot$  і  $\text{CH}_2\cdot$ , в реакціях з дуже малим значенням енергії активації:



«Швидкі» NO утворюється в початковій частині факела в межах відносно низьких температур (1000-1200 °С), причому їх концентрація мало залежить від коефіцієнта витрати повітря  $\alpha$  і температури.

Паливні оксиди нітрогену утворюється при спалюванні палив, які мають у своєму складі азотовмісні сполуки: аміни, амінокислоти, похідні сечовини та інші. Вміст зв'язаного азоту залежить від виду палива. Найвищий вміст якого у вугіллі. При контролі складу атмосфери звичайно фіксується сума оксидів нітрогену  $\text{NO}_x$ :



Основна частка оксидів нітрогену знаходиться у вигляді NO, однак викиди оксидів нітрогену розраховують за  $\text{NO}_2$  так як проходить окиснення NO в атмосферному повітрі до  $\text{NO}_2$ . За присутності вологи або крапель дощу в атмосфері  $\text{NO}_2$  перетворюється на нітратну кислоту  $\text{HNO}_3$ . Проникнувши в ґрунт, кислота утворить із його сполуками природні добрива, але вони вимиваються із ґрунту в річки і озера та викликають шкідливе цвітіння водойм, розносяться повітряними потоками. Азотні сполуки, особливо нітрати, шкідливі, можуть стати причиною отруєння людей. Допускається вміст нітратів у продуктах до 300 мг/кг, гранично допустиме споживання нітратів для людини складає  $\sim 500$  мг/доб. У багатьох випадках виявляється перевищення вмісту нітратів в овочах, мг/м<sup>3</sup> : томати – ГДК=60, фактично – 85; капуста: ГДК=300, фактично – 892; огірки – ГДК=150, фактично – 283 і т. д. До числа найбільш шкідливих у професійному відношенні сполук нітрогену належать: нітратна кислота, амоніак, аміносполуки, а також суміші оксидів нітрогену або нітратів ( $\text{N}_2\text{O}$ , NO,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}_5$ ).

Найбільш небезпечними викидами горіння палива є оксиди нітрогену. Вміст яких визначає токсичність продуктів згорання вугілля і мазуту на 40–50%, а природного газу — на 90–95%. Крім того, оксиди нітрогену під впливом ультрафіолетового випромінювання активно беруть участь у фотохімічних

реакціях в атмосфері з утворенням інших шкідливих газів.

Серед різних оксидів нітрогену практичне значення в екологічному аспекті мають нітроген(I) оксид NO і нітроген(II) оксид NO<sub>2</sub>, суму яких позначають NO<sub>x</sub>.

Основними факторами, що впливають на вихід оксидів нітрогену є температура і пов'язані з нею параметри — коефіцієнт витрати повітря підігрівання компонентів горіння і збагачення повітря киснем), а також принцип змішування компонентів горіння під час перебування реагентів в осередку горіння.

Залежність концентрації NO<sub>x</sub> від коефіцієнта витрати повітря ( $\alpha$ ) має екстремальний характер. Згідно з формальною кінетикою горіння, максимальний вихід NO<sub>x</sub> повинен бути при горінні суміші із складом, близьким до стехіометричного ( $\alpha \approx 1$ , коли температура горіння максимальна). Однак, на промислових установках  $\alpha = 1,05-1,2$  через погане перемішування компонентів горіння. Слід зазначити, що при забезпеченні гарного молекулярного або близько до нього перемішування коли паливно-повітряна суміш витримували протягом декількох годин значення  $\alpha$  досягала 0,9.

Останні дослідження показали, що при спалюванні палива появляються більш високій швидкості утворення оксидів нітрогену NO<sub>x</sub> ніж розрахункові. Ці оксиди нітрогену називаються «швидкими» або «швидкісними».

Зменшення утворення NO<sub>x</sub> досягається реалізацією первинних заходів, спрямованих: на зниження температури горіння; на зменшення часу перебування продуктів згорання в області високих температур; створення зон реакцій з відновлювальної атмосферою (надлишок повітря менше одиниці), де утворення NO з нітрогену палива утруднено, і відновлення оксидів нітрогену йде до молекулярного азоту.

Для зниження викидів оксидів нітрогену проводять такі первинні або режимно-технологічні заходи:

- використання пальників, які забезпечують низький викид NO<sub>x</sub>;
- ступеневе спалювання палива;
- ступінчаста подача повітря;
- рециркуляція димових газів;
- впорскування води (або водомазутних емульсій) в ядро факела;
- комбінація первинних заходів.

Первинні заходи малозатратних, і тому їх застосовують насамперед для забезпечення нормованих викидів оксидів нітрогену.

Другим шляхом зниження викидів оксидів нітрогену є очищення димових газів від вже утворених оксидів нітрогену.

Найбільшого поширення в світі отримав процес селективного каталітичного відновлення (ВКВ) оксидів нітрогену амоніаком на поверхні

каталізатора в присутності кисню при температурі 300-450 °С. В процесі ВКВ оксиди нітрогену відновлюються амоніаком на каталізаторі з утворенням молекулярного азоту і водяної пари без формування вторинних забруднювачів:



Ступінь відновлення оксидів нітрогену зростає із збільшенням кількості амоніаку. Оптимальне мольне співвідношення  $\text{NH}_3 / \text{NO}_x$  становить 0,9–1,03. Ступінь очищення газів від оксидів нітрогену може досягати 92–94%.

Хімічна реакція відновлення оксиду нітрогену до молекулярного азоту амоніаком або сечовиною при високих температурах може протікати без застосування каталізатора. Цей метод отримав назву селективного некаталітичного відновлення (СНКВ) оксидів нітрогену. Реакція відновлення протікає за температури 950–1100 °С.

### **3.2.5. Канцерогенні речовини**

Одним із основних компонентів канцерогенних речовин є бензопірен ( $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$ ). Він має високу канцерогенну активність, його ГДК дорівнює 1 нанограм/м<sup>3</sup>. Негативний вплив  $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$  на стан здоров'я людини достатньо не вивчений, але встановлено що він є причиною ракових захворювань.

Концентрація бензопірену залежить від виду палива. Так, максимальна концентрація  $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$  при спаленні палива в теплових агрегатах з коефіцієнтом витрати повітря  $\alpha=1,03$  має значення:  $2 \cdot 10^{-3}$  мг/м<sup>3</sup> — для мазуту;  $1 \cdot 10^{-3}$  мг/м<sup>3</sup> — для коксового газу і  $1 \cdot 10^{-4}$  мг/м<sup>3</sup> — для природного газу. Важливе значення в механізмі його утворення мають ацетилен і інші вуглеводні ацетиленового ряду, які утворюються при піролізі або крекінгу:



Основним засобом придушення утворення бензопірену є його доопалення з коефіцієнтом витрати повітря  $\alpha$  більше 1. При використанні вуглеводневих видів палива доцільно додавати до них водень ( $\text{H}_2$ ), тому що він гальмує радикально-ланцюгову реакцію утворення  $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$ .

### **3.2.6. Способи зменшення викидів шкідливих речовин при спалюванні палива**

На даний час використовують такі особливі способи зниження шкідливих викидів в атмосферу:

- обробка палива перед його спалювання;
- удосконалення режимів спалювання палива;
- використання нових пристроїв з мінімальними виходом оксидів нітрогену;

- впровадження заходів пов'язаних з заощадливим використанням палива;
- обробка продуктів згорання на виході з теплого агрегата;
- оптимізація паливного балансу заводу за критерієм мінімальної кількості загальної кількості викидів.

З перерахованих способів перший і останній є найбільш складними, громісткими і такими, що потребують значних капіталовкладень. У зв'язку з цим, при прийнятті рішень щодо вибору способу зниження шкідливих викидів необхідно, насамперед, впроваджувати більш прості способи, а потім якщо вони не забезпечили припустимих значень викидів використовувати, наприклад, обробку продуктів згорання на виході з теплового агрегату.

Обробка палива перед його спалюванням. Цей захід використовується тільки для палив, що містять значній кількості сульфуру і зв'язаного нітрогену: високосірчисті марки мазуту, вугілля, коксовий газ, а також попутний газ перед їх спалюванням очищають від сульфуру.

### **Запитання для самоконтролю**

1. Дати визначення палива та перерахуйте вимоги до нього.
2. Перерахуйте види природного та штучного твердого, рідкого та газоподібного палива та охарактеризуйте його.
3. Теплота згорання палива.
4. Розрахунок згорання палива за допомогою формул.
5. Розрахунок об'ємного складу продуктів згорання палива.
6. Види недопалу палива.
7. Температура горіння палива.
8. Вплив коефіцієнта витрати повітря  $\alpha$  на температуру горіння палива.
9. Розрахунок спалення палива за допомогою графіків.
10. Теплотехнічне оцінювання палива.
11. Методи підвищення КВП (коефіцієнту використання палива) з метою економії.
12. Джерела утворення твердих викидів в атмосфері.
13. Визначення масового викиду золи або пилу.
14. Джерела утворення SOx в атмосфері.
15. Способи зниження оксидів сульфуру?
16. Джерела виникнення NOx.
17. Яку шкідливу дію має NOx на атмосферу?
18. Чому розрахунок оксидів нітрогену ведеться за NO<sub>2</sub>?
19. Яку шкідливу дію має бенз(а)пірен?
20. Джерела виникнення бенз(а)пірену.
21. Умови утворення оксидів вуглецю.

## РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНКИ ГОРІННЯ ПАЛИВА

### 4.1. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ

Методику розрахунку горіння палива покажемо на прикладі газоподібного палива складу

Речовина (суха)	$CH_4^C$	$C_2H_6^C$	$C_3H_8^C$	$C_4H_{10}^C$	$C_6H_{12}^C$	$CO_2^C$	$N_2^C$	Сума
Об'ємна частка речовини у паливі ( $\varphi$ ), %	94,0	1,2	0,7	0,4	0,2	0,2	3,3	100,0

Газ спалюється з коефіцієнтом витрати повітря  $\alpha = 1,2$ . Повітря, що йде для горіння, нагрівається до температури  $800^\circ\text{C}$ , пірометричний ККД = 0,8.

#### Розрахунок:

1. Приймаємо вміст води в газі 1,0%. Перераховуємо склад сухого газу на вологий робочий газ

$$\varphi(CH_4^B) = \varphi(CH_4^C)(100 - \varphi(H_2O))/100 = 94,0 \cdot 0,99 = 93,0\%$$

і т.д.

Заносимо у таблицю склад вологого робочого газу, %

Речовина (волога)	$CH_4^B$	$C_2H_6^B$	$C_3H_8^B$	$C_4H_{10}^B$	$C_5H_{12}^B$	$CO_2^B$	$N_2^B$	$H_2O^B$	Сума
Об'ємна частка речовини у паливі ( $\varphi$ ), %	93,0	1,2	0,7	0,4	0,2	0,2	3,0	1,0	100,0

2. Визначаємо теплоту згорання газу за формулою (1.20):

$$Q_H = 358,2 \cdot 93,0 + 637,5 \cdot 1,2 + 912,5 \cdot 0,7 + 1186,5 \cdot 0,4 + 1460,8 \cdot 0,2 = 35485 \text{ кДж/м}^3$$

3. Знаходимо теоретично необхідну кількість сухого повітря за формулою (1.21):

$$L = 0,0476 \cdot (2 \cdot 93 + 3,5 \cdot 1,2 + 5 \cdot 0,7 + 6,5 \cdot 0,4 + 8 \cdot 0,2) = 0,0476 \cdot 197,9 = 9,42 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

4. Приймаємо вологовміст атмосферного повітря  $d = 10 \text{ г/кг}$  сухого повітря і знаходимо теоретично необхідну кількість атмосферного повітря з урахуванням його вологості за формулою (1.23)

$$L_d = 1,016 \cdot 9,42 = 9,57 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Враховуючи, що газ на згорання продається підготовленим і дана величина є незначною, у розрахунках горіння палива тими можна знехтувати.

5. Дійсну кількість повітря при коефіцієнті витрати  $\alpha = 1,2$  знаходимо з урахуванням формул (1.23 та 1.24):

$$\text{сухого повітря } L_\alpha = 1,2 \cdot 9,42 = 11,30 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

$$\text{атмосферного повітря } L_{d\alpha} = 1,2 \cdot 9,57 = 11,48 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

6. Визначаємо кількість і склад продуктів горіння за формулами (1.25-1.26):

$$V_{CO_2} = 0,01 \cdot (0,2 + 93,0 + 2 \cdot 1,2 + 3 \cdot 0,7 + 4 \cdot 0,4 + 5 \cdot 0,2) = 1,003 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

$$V_{H_2O} = 0,01 (2 \cdot 93,0 + 3 \cdot 1,2 + 4 \cdot 0,7 + 5 \cdot 0,4 + 6 \cdot 0,2 + 1,0 + 0,16 \cdot 10 \cdot 11,3) = 2,146 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

$$V_{N_2} = 0,01 \cdot 3,3 + 0,79 \cdot 11,3 = 8,953 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (1,2 - 1) \cdot 9,42 = 0,396 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Загальна кількість продуктів горіння складає:

$$V_\alpha = 1,003 + 2,146 + 8,953 + 0,396 = 12,498 \approx 12,50 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

7. Визначаємо об'ємну частку продуктів горіння:

$$\varphi(CO_2) = \frac{1,003 \cdot 100}{12,5} = 8,0\%; \quad \varphi(H_2O) = \frac{2,146 \cdot 100}{12,5} = 17,2\%;$$

$$\varphi(N_2) = \frac{8,953 \cdot 100}{12,5} = 71,6\%; \quad \varphi(O_2) = \frac{0,396 \cdot 100}{12,5} = 3,2\%.$$

Переведення  $\text{м}^3$  у  $\text{кг}$  робимо шляхом множення на щільність  $\rho$  та складаємо матеріальний баланс процесу горіння на  $100 \text{ м}^3$  газу при за умови  $\alpha = 1,2$ .

## 4.2. МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ГОРІННЯ ПАЛИВА З ВИКОРИСТАННЯМ ТАБЛИЦЬ ЕНТАЛЬПІЙ АБО ТЕПЛОЄМНОСТІ ГАЗІВ

Визначення температур горіння палива можна проводити з використанням таблиць ентальпій газів (додаток Г) або теплоємності газів (додаток Д).

Визначаємо теоретичну температуру горіння. Для цього знаходимо теплоємність продуктів горіння з урахуванням підігріву повітря до  $t_{\text{пов}} = 800^\circ\text{C}$  при  $\alpha = 1,2$ . У додатку Г знаходимо ентальпію нагріву атмосферного повітря:

	Речовина		Σ
	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	
Об'ємна частка (φ), %	79	21	100
Ентальпія, кДж/моль	1093,6	1159,8	Σ
Ентальпія, кДж	863,944	243,558	1107,502

Приймаємо  $i_{\text{пв}} = 1110 \text{ кДж/м}^3$ .

$$\text{Тоді } i_{\text{пр}} = \frac{35485}{12,5} + \frac{11,48 \cdot 1110,0}{12,5} = 3850 \text{ кДж/м}^3.$$

Для порівняння визначимо калориметричну температуру горіння за допомогою таблиць ентальпій. Задаємося температурами  $t_1 = 2300^\circ$  і  $t_2 = 2400^\circ$ . Теплота продуктів горіння для температур  $t_1$  і  $t_2$  визначається за допомогою додатку Е.

При  $t_1 = 2300^\circ$

$$\Delta H(\text{CO}_2) = 0,080 \cdot 5658,7 = 452,7$$

$$\Delta H(\text{H}_2\text{O}) = 0,172 \cdot 4643,8 = 798,7$$

$$\Delta H(\text{N}_2) = 0,716 \cdot 3452,6 = 2472,1$$

$$\Delta H(\text{O}_2) = 0,032 \cdot 3656,5 = 117,0$$

$$i_1 = 3840,5 \text{ кДж/м}^3$$

Отже:  $4026,5 > i_{\text{пр}} > 3840,5$

При  $t_2 = 2400^\circ$

$$\Delta H(\text{CO}_2) = 0,080 \cdot 5930,9 = 474,5$$

$$\Delta H(\text{H}_2\text{O}) = 0,172 \cdot 4887,9 = 840,7$$

$$\Delta H(\text{N}_2) = 0,716 \cdot 3615,5 = 2588,7$$

$$\Delta H(\text{O}_2) = 0,032 \cdot 3831,5 = 122,6$$

$$i_2 = 4026,5 \text{ кДж/м}^3$$

$$4026,5 - 3840,5 = 186,0 \text{ відповідає } 100^\circ;$$

$$3850,0 - 3840,5 = 9,5 \text{ відповідає } \Delta t;$$

$$\Delta t = \frac{9,5 \cdot 100}{186} = 5^\circ, \text{ звідси } t_k = 2300 + 5 = 2305^\circ.$$

### 4.3. МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ГОРІННЯ ПАЛИВА З ВИКОРИСТАННЯМ І-Т ДІАГРАМ

#### 1. Визначаємо ентальпію повітря за і-t діаграмою (рис. 4.1)

і-t діаграми приведені у додатку Е.

Ентальгія повітря визначається по рис. 4.1 (відповідно до заданої температури). Наприклад, якщо температура повітря дорівнює 800 °С, то *i<sub>пов</sub>* буде дорівнювати 1110 кДж/м<sup>3</sup>.

Визначаємо ентальпію повітря:  $i_{пов} = 1100 \text{ кДж/м}^3$

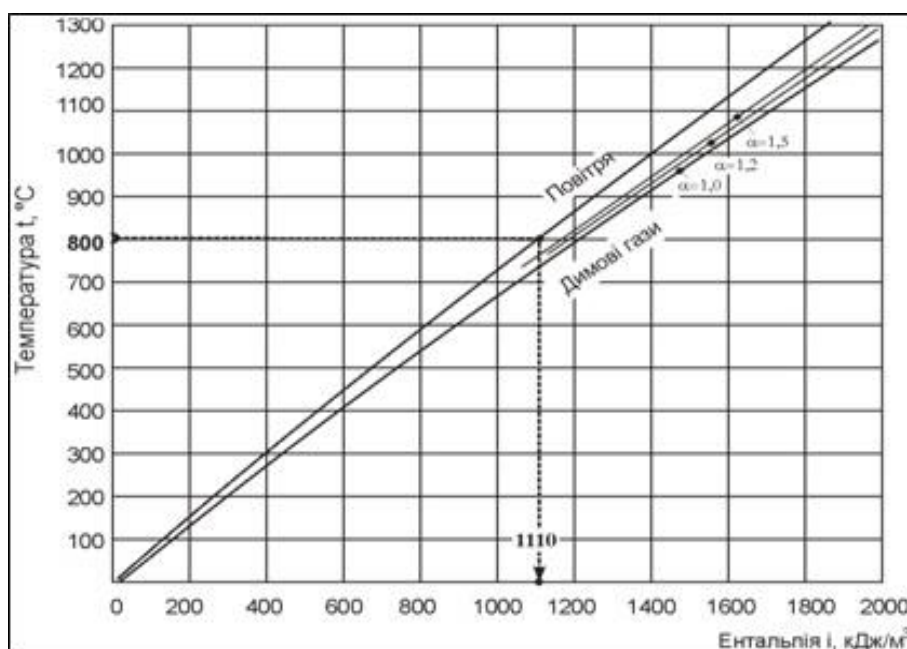


Рис. 4.1 і-t діаграма

#### 2. Розраховуємо надходження теплоти

Надходження теплоти = Теплота згорання ( $Q_n$ ) +  $i_{пов} \cdot La = (\text{кДж/м}^3)$

#### 3. Знаходимо тепловміст продуктів згорання

Тепловміст продуктів згорання = надходження теплоти / об'єм продуктів згорання = (кДж/м<sup>3</sup>)

#### 4. Визначаємо температуру горіння палива за і-t діаграмою (рис. 4.2)

Так як тепловміст продуктів згорання дорівнює 3850 кДж/м<sup>3</sup>, то калориметрична температура згорання буде дорівнювати 2310 °С, а теоретична температура згорання буде дорівнювати 2190 °С.

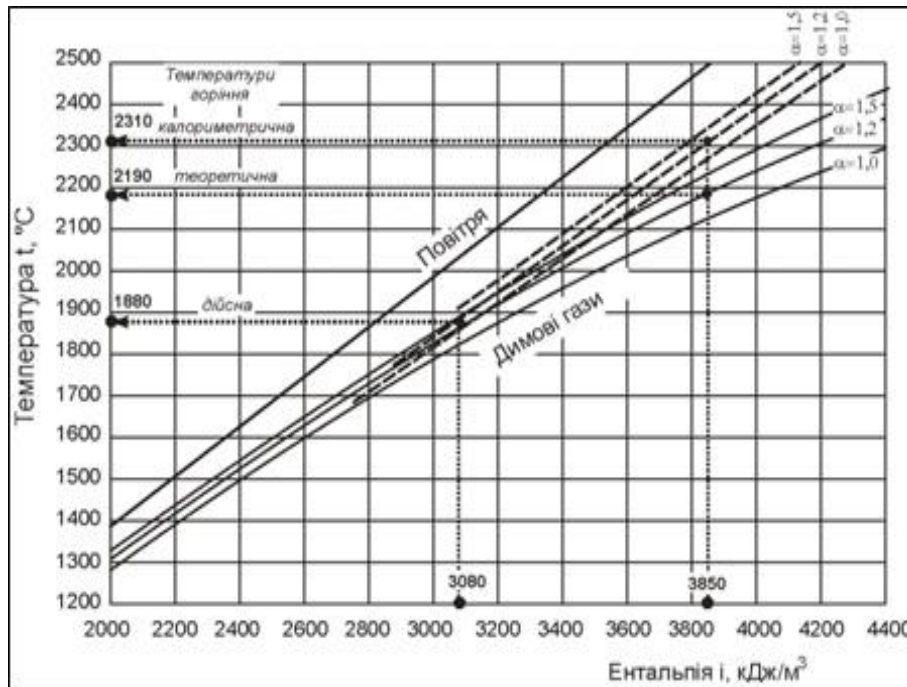


Рис. 4.2 i-t діаграма

#### 5. Визначаємо тепловміст продуктів горіння з урахуванням ККД

Тепловміст продуктів горіння з урахуванням ККД тепловміст продуктів згорання дорівнює добутку тепловмісту продуктів згорання на пірометричний ККД.

#### 6. Визначення дійсної температури згорання

Дійсна температура згорання горіння визначається як добуток тепловмісту продуктів згорання та пірометричного КПД. Що дає там дійсну ентальпію, за якою ми визначаємо дійсну температуру горіння.

Тепловміст продуктів згорання – 3855 кДж/м<sup>3</sup>

Пірометричний коефіцієнт – 0,8

Тоді  $3855 \times 0,8 = 3080$  °С

По рис. 4.2. знаходимо дійсну температуру, вона дорівнює 1880 °С.

### 4.4. МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

У розлі «Паливо та його характеристики. Розрахунок горіння палива відповідно до навчальної робочої програми» передбачається виконання контрольної роботи.

Вихідні дані для розрахунку:

Речовина, об'ємна частка речовини у природному газі, %			$\alpha$	Т пов., °С	Пірометричний ККД
СН <sub>4</sub>	С <sub>2</sub> Н <sub>6</sub>	С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub>			
96	2	2	1,3	800	0,7

1. Розрахунок починається з складу палива, який відомий:

Склад робочого газу, %

$\varphi(\text{CH}_4)$	$\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$	$\varphi(\text{C}_3\text{H}_8)$	Сума
96	2	2	100,0

2. Визначаємо теплоту згорання газу за формулою:

$$Q_H = 0,01 \cdot (35820\varphi(\text{CH}_4) + 63750\varphi(\text{C}_2\text{H}_6) + 91250\varphi(\text{C}_3\text{H}_8) + \dots) \text{ кДж/м}^3,$$

де: 35820, 63750, 91250 – теплотвірна здатність (Додаток В) метану, етану, пропану і т.д, кДж/м<sup>3</sup>.

3. Витрата повітря на горіння палива

Необхідна кількість повітря для горіння палива визначається за теоретичною кількістю кисню, що вступає в реакції горіння з урахуванням деякого надлишку, що забезпечує повне згорання палива.

В розрахунках приймають наступний склад повітря: азот – 79,0% і кисень – 21,0% за об'ємом.

3.1. Теоретично необхідна витрата повітря для горіння, що використовується в пічній теплотехніці позначається  $L$  та розраховується за формулою:

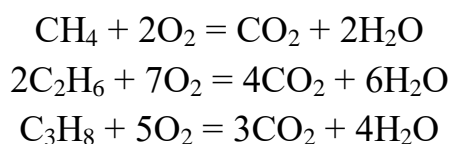
$$L = 4,76 \cdot V_{O_2}, \text{ м}^3/\text{м}^3$$

де 4,76 – 100/21,  $V_{O_2}$  — теоретично необхідний об'єм кисню.

3.2. Теоретично необхідна для горіння витрата сухого повітря для природного газу визначається за наступною формулою, де враховується вміст вуглеводнів у паливі:

$$L = 0,0476 \cdot 2\varphi(\text{CH}_4) + 3,5\varphi(\text{C}_2\text{H}_6) + 5\varphi(\text{C}_3\text{H}_8) + \dots, \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Множники: 2; 3,5; 5 – це мольні співвідношення вуглеводню і кисню у відповідних реакціях горіння:



3.3. Для повноти згорання передбачають надлишок повітря  $L\alpha$

Коефіцієнт надлишку повітря приймає значення:  $\alpha = 1,05 \div 1,5$  та показує відношення дійсної кількості повітря, введеного для горіння у порівнянні з теоретично необхідним:

$$\alpha = \frac{L_\alpha}{L}$$

3.4. Дійсна витрата сухого повітря з урахуванням коефіцієнта витрати повітря дорівнює:

$$L_\alpha = \alpha L, \text{ м}^3/\text{м}^3$$

На спалювання 1 м<sup>3</sup> природного газу теоретично необхідно:

3.5. Витрата кисню:

$$V(O_2) = 0,01 \cdot 2 \cdot \varphi(CH_4) + 3,5 \cdot \varphi(C_2H_6) + 5 \cdot \varphi(C_3H_8) + \dots, \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Кисню (з урахуванням  $\alpha$ ):

$$V(O_2) \cdot \alpha$$

3.6. Витрата азоту:

$$V(N_2) = 3,76 \cdot V(O_2) \text{ м}^3,$$

Коефіцієнт 3,76 визначається як співвідношення вмісту азоту у повітрі до вмісту кисню (79/21).

Азоту (з урахуванням  $\alpha$ ):

$$V(N_2) \cdot \alpha$$

4. Розрахунок кількості димових газів

При повному горінні будь-якого палива утворюються продукти горіння у виді CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O в пароподібному стані, N<sub>2</sub> і SO<sub>2</sub>.

Якщо горіння відбувається з надлишковою кількістю повітря, то в димових газах буде також присутній кисень O<sub>2</sub>.

4.1. Об'єм продуктів горіння газоподібного палива (природного газу) знаходиться за формулами:

$$V_{CO_2} = 0,01(1\varphi(CH_4) + 2\varphi(C_2H_6) + 3\varphi(C_3H_8) + \dots), \text{ м}^3/\text{м}^3$$

$$V_{H_2O} = 0,01(2\varphi(CO_2) + 3\varphi(C_2H_6) + 4\varphi(C_3H_8) + \dots), \text{ м}^3/\text{м}^3$$

а також:

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot L, \text{ м}^3/\text{м}^3$$

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot L_\alpha, \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Загальна кількість продуктів горіння складає:

$$V_a = \alpha V, \text{ м}^3/\text{м}^3$$

4.2. Визначення складу продуктів горіння.

Для визначення відсоткового складу продуктів горіння необхідно знати об'єм окремих складових. Приклад розрахунку:

$$\Phi(CO_2) = 100 \cdot V_{CO_2} / V_a \text{ і т.д.}$$

Визначаємо об'ємні частки всіх продуктів горіння та заповнюємо таблицю.

$\varphi(CO_2)$	$\varphi(H_2O)$	$\varphi(N_2)$	$\varphi(O_2)$	$\Sigma$

5. Визначення ентальпії повітря за *i-t* діаграмою (додатк Е).

Ентальгія повітря (*i пов*) визначається за *i-t* діаграмою (відповідно до заданої температури повітря).

Результати записуємо:

Визначаємо ентальпію повітря  $i \text{ пов} = \boxed{\phantom{000000}} \text{ кДж/м}^3$

6. Розраховуємо надходження теплоти

Надходження теплоти = Теплота згорання ( $Q_H$ ) +  $i \text{ пов} \cdot L_a$

Результати записуємо:

Надходження теплоти

$\text{кДж/м}^3$

7. Знаходимо тепловміст продуктів згорання

Тепловміст продуктів згорання = надходження теплоти / об'єм продуктів згорання.

Тепловміст продуктів згорання

$\text{кДж/м}^3$

8. Визначаємо температуру горіння палива за i-t діаграмі (Додаток Е)

Калориметрична температура

$^{\circ}\text{C}$

Теоретична температура

$^{\circ}\text{C}$

9. Визначаємо тепловміст продуктів горіння з урахуванням ККД

Тепловміст продуктів горіння з урахуванням ККД тепловміст продуктів згорання дорівнює тепловміст продуктів згорання помножено на пірометричний ККД

З урахуванням ККД тепловміст продуктів згорання

$\text{кДж/м}^3$

10. Визначення дійсної температури згорання

Дійсна температура горіння визначається як добуток тепловмісту продуктів згорання та пірометричного ККД і дає там дійсну ентальпію, за якою ми визначаємо дійсну температуру горіння.

Результати записуємо:

Дійсна температура горіння

$^{\circ}\text{C}$

Розрахунок горіння палива можна проводити з використанням ПК за допомогою спеціальної програми, що дозволяє пришвидшити розрахунки (рис. 4.3).

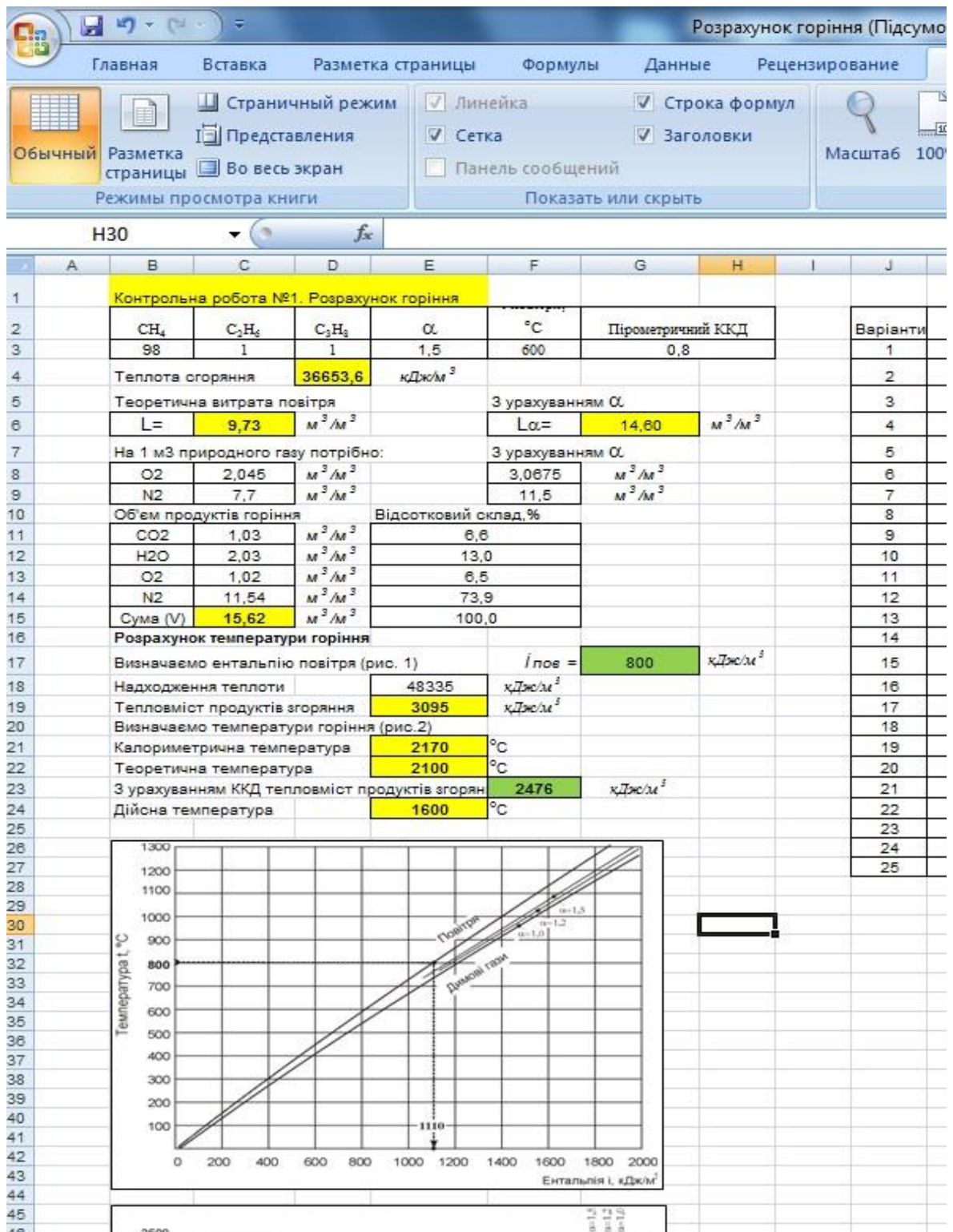


Рис. 4.3. Скриншот програми для проведення розрахунків горіння палива

Контрольна робота виконується студентами відповідно до завдання. Результати розрахунків заносяться до спеціального бланку (рис. 4.4)

Контрольна робота №1.					
Розрахунок горіння палива					
Варіант	Група		Студент		
CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	α	t повітря, °C	Пирометричний ККД
Теплота <u>згорання</u>			кДж/м <sup>3</sup>		
Теоретична витрата повітря			З урахуванням <input type="checkbox"/>		
L=		м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	Lα=		м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>
На 1 м <sup>3</sup> природного газу потрібно:			З урахуванням <input type="checkbox"/>		
O <sub>2</sub>		м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>			м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>
N <sub>2</sub>		м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>			м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>
Об'єм продуктів горіння		Відсотковий склад, %			
CO <sub>2</sub>		м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>			
H <sub>2</sub> O		м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>			
O <sub>2</sub>		м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>			
N <sub>2</sub>		м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>			
Сума (V)		м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>			
Розрахунок температури горіння					
Визначаємо ентальпію повітря (рис. 1)			<i>h<sub>пов</sub></i> =		кДж/м <sup>3</sup>
Надходження теплоти			кДж/м <sup>3</sup>		
Тепловміст продуктів згорання			кДж/м <sup>3</sup>		
Визначаємо температури горіння (рис.2)					
Калориметрична температура			°C		
Теоретична температура			°C		
З урахуванням ККД тепловміст продуктів згорання					кДж/м <sup>3</sup>
Дійсна температура			°C		

Рис. 2.4. Бланк контрольної роботи

Контрольна робота виконується аудиторно.

## ЛІТЕРАТУРА

### Основна :

1. Сухий М.П., Карпенка О.О. Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів. Навчальний посібник. – Дніпропетровськ: УДХТУ, 2006. – 202 с.
2. Величко Ю.М., Племянников М.М., Яценко А.П., Корнілович Б.Ю. Хімія і технологія кераміки. Високотемпературні процеси / Навчальний посібник. – К.: «Освіта України», 2016. – 160 с.
3. Племянников М.М., Яценко А.П., Корнілович Б.Ю. Хімія і технологія скла. Високотемпературні процеси: Навчальний посібник. – К.: «Освіта України», 2015. – 183 с.

### Допоміжна:

1. Левченко П.В. Расчеты печей и сушил силикатной промышленности. М.: Высш. шк., – 1968. – 367 с.
2. Лейтес И.Л., Сосна М.Х., Семенов В.П. Теория и практика химической энерготехнологии. М., Химия, 1988. – 280 с.
3. Племянников М.М., Крупа А.А. Хімія та теплофізика скла. Навчальний посібник. – К.: НТУУ «КПІ» 2000.– 560с.
4. Ралко А.В., Крупа А.А., Племянников Н.Н. Теплотехника, тепловые процессы и агрегаты в технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов., Киев, УМК ВО, 1993. – 397 с.
5. Ралко А.В., Крупа А.А., Племянников Н.Н., Алексенко Н.В., Зинько Ю.Д. Тепловые процессы в технологии силикатов: Высш. шк., Головное изд-во, 1986. – 232 с.
6. Смит Р., Клемеш Й., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.П. Основы интеграции тепловых процессов. Харьков., НТУ «ХПИ», 2000. – 456 с.
7. Степанов В.С. Анализ энергетического совершенства технологических процессов. Новосибирск, наука, 1984. – 273 с.
8. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Анишко О.Б., Ведь В.Е. Энерготехнология химико-технологических производств. Харків, ХГПУ, 1998. – 84с.

## ДОДАТКИ

Додаток А. Усереднені характеристики твердого і рідкого палива

Вид палива	Склад палива, % мас.							$Q_H^p$ , кДж/кг
	C	H	S	N	O	A	W	
Деревина	48-52	6-7	–	0,1-0,6	43-45	1,5-2,0	30-40	10000– 12600
Торф	48-65	4,7-7	1,2-2,5	0,6-3,8	30-40	5-30	40-55	8400– 10500
Буре вугілля	65-75	4,3-6,3	0,3-5,9	0,6-1,7	18,1-23,9	12-35	17-39	10000– 17700
Кам'яне вугілля	75-90,5	4,2-6,3	0,4-6,8	1,3-2,7	2,1-16,5	9,5-45	4-13	20300– 30700
Антрацит	91-94	1,8-3,5	1,9-2,1	0,8-1,3	1,3-2,6	6,0-20,5	4,0-7,5	24100– 30300
Горючі сланці	60-90	6,7-11,8	1,8-5,7	0,3-18,1	11,3-18,1	40-60	11-14	4600– 10300
Мазут	87-88	10-12	0,5-2,0	0,3-1,0	0,3-1,0	0,1-1,5	0-1,5	40000– 41500

Додаток Б. Усереднені характеристики газоподібного палива

Газ	Склад газу, об. %											Теплота згорання Q <sub>H</sub> , кДж/м <sup>3</sup>
	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>	CO	H <sub>2</sub> S	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	
Природний	76,7-98,9	0,1-4,5	0,1-1,7	0,01-0,80	0-0,65	0,1-14,5	0,1-0,4	-	0,1-0,6	-	-	33100- 36950
Попутний (нафтовий)	51,1-85,0	2,8-17,2	0-17,0	0,3-15,0	0-4,0	0-30,0	0,3-11,0	-	0,2-1,1	-	-	33500- 63500
Генераторний: повітряний	0,5	-	-	-	-	65,0	0,5	33,0	-	1,0	0,2	460 0
Пароповітряний з кам'яного вугілля	0,5- 2,8	-	-	-	-	51,9- 52,6	5,0-5,5	26,5- 27,5	0,1- 0,2	13,5	0,2	5150- 5860
Пароповітряний з бурого вугілля	2,2	-	-	-	-	49,4	5,0	30,0	0,2	13,0	0,2	6070
Пароповітряний з торфу	3,5	-	-	-	-	45,2	8,0	28,0	0,1	15,0	0,2	6500
Пароповітряний з деревини	3,5	-	-	-	-	46,8	6,5	29,0	-	14,0	0,2	6500
Водяний з антрациту	0,5	-	-	-	-	6,3	6,0	38,5	0,5	48,0	0,2	10300
Доменний	0,3- 1,6	-	-	-	-	51,4- 58,5	10,5- 12,0	27,0- 28,0	0- 0,3	2,7- 8,0	-	3900 - 4900
Коксовий	24,4- 25,0	-	-	-	-	7,7- 7,8	2,3	6,8	0,4	57,0- 57,5	0,8	1650 0- 2060
Підземної газифікації	1,8	-	-	-	-	57,6- 63,6	9,5- 10,3	10,0- 18,4	0,6	11,1- 14,1	0,2	3600- 4350
Біогаз	55- 70	-	-	-	-	-	27- 44	-	3,0	1,0	-	224 00- 261 00
Переробітки нафти	41,0	43,0				0,2	0,5	0,8	-	14,0	-	46000 - 50000

Додаток В. Теплота згорання і щільність окремих газів

Чисті гази	Нижча $Q_H$ <i>кДж/м<sup>3</sup></i>	Щільність $\rho_0$ , <i>кг/м<sup>3</sup></i>
Водень $H_2$	10760	0,0898
Окис вуглецю $CO$	12636	1,250
Сірководень $H_2S$	23150	1,539
Метан $CH_4$	35820	0,717
Етилен $C_2H_4$	58690	1,261
Етан $C_2H_6$	63751	1,356
Пропан $C_3H_8$	91256	2,020
Бутан $C_4H_{10}$	118651	2,840
Пентан $C_5H_{12}$	145833	3,218
Гексан $C_6H_{14}$	162112	3,840
Кисень $O_2$	–	1,429
Азот $N_2$	–	1,251
Двоокис вуглецю $CO_2$	–	1,977
Водяна пара $H_2O$	–	0,804
Сірчистий газ $SO_2$	–	2,852

Додаток Г. Ентальпія газів, кДж/м<sup>3</sup> (101 кН/м<sup>2</sup>)

$t, ^\circ\text{C}$	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
100	170,0	150,7	129,8	131,9
200	357,6	304,4	260,0	267,1
300	558,9	462,7	391,9	407,0
400	772,1	626,4	526,7	551,0
500	994,4	795,1	664,1	699,2
600	1224,7	968,9	804,3	850,0
700	1462,1	1148,9	947,5	1004,0
800	1704,9	1334,4	1093,6	1159,8
900	1952,4	1526,2	1241,9	1318,1
1000	2203,6	1722,9	1391,7	1477,6
1100	2458,6	1925,2	1543,7	1638,4
1200	2716,5	2132,4	1697,4	1800,8
1300	2976,9	2343,9	1852,7	1963,7
1400	3239,1	2559,1	2008,9	2128,2
1500	3503,3	2779,3	2166,3	2294,5
1600	3769,1	3002,1	2324,6	2460,7
1700	4036,7	3229,4	2484,1	2628,6
1800	4305,1	3458,5	2643,7	2797,7
1900	4574,3	3690,4	2804,4	2967,3
2000	4844,4	3925,7	2965,2	3138,6
2100	5115,7	4163,5	3127,7	3309,4
2200	5387,0	4402,2	3289,3	3482,7
2300	5658,7'	4643,8	3452,6	3656,5
2400	5930,9	4887,9	3615,5	3831,5
2500	6203,0	5132,4	3778,8	4007,0

Додаток Д. Середні теплоємності газів за різних температурах,  $\text{кДж/м}^3 \cdot \text{град}$

t°C	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Сухе повітря
0	1,5998	1,4943	1,2946	1,3059	1,2971
100	1,7003	1,5052	1,2959	1,3176	1,3005
200	1,7874	1,5224	1,2996	1,3352	1,3076
300	1,8628	1,5425	1,3068	1,3562	1,3177
400	1,9298	1,5655	1,3164	1,3775	1,3294
500	2,9888	1,5898	1,3277	1,3980	1,3428
600	2,0412	1,6149	1,3402	1,4168	1,3570
700	2,0885	1,6413	1,3537	1,4345	1,3712
800	2,1312	1,6681	1,3670	1,4500	1,3846
900	2,1693	1,6957	1,3796	1,4646	1,3976
1000	2,2036	1,7230	1,3918	1,4776	1,4098
1100	2,2350	1,7502	1,4035	1,4893	1,4219
1200	2,2639	1,7770	1,4144	1,5006	1,4328
1300	2,2899	1,8029	1,4253	1,5107	1,4437
1400	2,3137	1,8280	1,4349	1,5203	1,4537
1500	2,3355	1,8527	1,4441	1,5295	1,4629
1600	2,3556	1,8762	1,4529	1,5379	1,4717
1700	2,3745	1,8996	1,4613	1,5463	1,4797
1800	2,3916	1,9214	1,4688	1,5542	1,4872
1800	2,3916	1,9214	1,4688	1,5542	1,4872
1900	2,4075	1,9424	1,4759	1,5618	1,4948
2000	2,4222	1,9629	1,4826	1,5693	1,5015
2100	2,4360	1,9825	1,4893	1,5760	1,5082
2200	2,4480	2,0010	1,4952	1,5831	1,5140
2300	2,4603	2,0190	1,5010	1,5898	1,5203
2400	2,4712	2,0366	1,5065	1,5965	1,5257
2500	2,4812	2,0529	1,5115	1,6028	1,5312

### Додаток Е. I-t діаграми

