Міністерство освіти і науки України
Дніпродзержинський державний технічний університет

А. П. Рижов

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни

«Паливо та теорія горіння, спалюючі пристрої»

для студентів денної форми навчання

за напрямом 6.050601 «Теплоенергетика»

Затверджено

редакційно-видавничою секцією
науково-методичної ради ДДТУ
_____ ,протокол № _____
(дата)

Дніпродзержинськ
2014

Розповсюдження і тиражування без офіційного дозволу Дніпродзержинського державного технічного університету заборонено.

Конспект лекцій по дисципліні «Паливо та теорія горіння, спалюючі пристрої» для студентів денної форми навчання за напрямом 6.050601 «Теплоенергетика»/ Укл. Рижов А. П., —Дніпродзержинськ:ДДТУ, 2014.–96 с.

Укладач: А. П. Рижов, кандидат технічних наук
Рецензент: І. С. Долгополов, кандидат технічних наук
Відповідальний за випуск: зав. кафедрою Теплоенергетики,
докт. техн. наук Горбунов О. Д.

Затверджено на засіданні кафедри Теплоенергетики
Протокол № _____від _____

Конспект лекцій призначений для студентів 3-го курсу денної форми навчання за напрямом 6.050601 «Теплоенергетика». У конспекті розглядаються всі розділи, які вивчаються на протязі двох семестрів і які цілком відповідають робочій програмі по курсу «Паливо та теорія горіння, спалюючі пристрої». Конспект лекцій містить ілюстраційний матеріал, який допомагає більш досконаліше ознайомитися з конструкціями та роботою спалюючих пристроїв на виробництві.

Дана розробка буде корисна для студентів 3-го курсу денної форми навчання спеціальності «Теплоенергетика» при вивченні дисципліни «Паливо та теорія горіння, спалюючі пристрої»

ВСТУП

Учбова дисципліна „Паливо та теорія горіння” поряд з дисциплінами „Термодинаміка”, „Тепломасообмін”, „Гідрогазодинаміка” є базовою у системі підготовки спеціалістів з промислової вогнетехніки. Задачами цієї дисципліни є вивчення фізико-хімічних властивостей та закономірностей горіння органічного палива.

З органічного палива, основними видами якого є вугілля, нафта і природний газ, зараз видобувається приблизно 90% всієї споживаємої енергії. З кожним роком зростає споживання енергії в промисловості, сільському господарстві, транспорті і побуті - кожні останні 15 років воно зростало вдвічі. В той же час невпинно скорочуються розвідані запаси, зростають витрати на видобуток, переробку і транспортування палива. Ера дешевого палива закінчилась. І якщо в колишньому Радянському Союзі паливно-енергетична проблема розв’язувалась переважно екстенсивним шляхом, то з утворенням самостійних держав, що не мають запасів палива, реально стає загроза енергетичної кризи. На Україні практично витрачені відомі родовища нафти і газу, значно скоротився видобуток вугілля у Донбасі.

Тому, найважливіше значення має підвищення ефективності споживання палива. Досить сказати, що питомі витрати палива у промисловості вдвічі і більше перевищують показники, досягнуті розвиненими країнами Європи, США, Японією.

Актуальні завдання по економному і 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

заліків і екзаменів. Для більш детального вивчення окремих розділів слід звернутися до рекомендованої літератури

І ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПАЛИВО

1.1 Паливо і його значення

Серед різних джерел енергії органічному паливу належить провідна роль. Крім органічного палива важливу роль відіграє ядерне паливо, що виділяє енергію за рахунок реакції розпаду або синтезу ядер. Однак для України органічне паливо залишається основним джерелом енергії на найближчі 100 років.

Значення палива для світової цивілізації 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 окислення, 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: вуглець і водень, а також їх сполуки – вуглеводні, що складають основу будь-якого палива.

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 поставок з Росії і Туркменістану. У Росії в 2010-2012 р. закуплено нафти відповідно 46,6 і 33,4 млн. т, у Білорусії - 23.3 і 0,6 млн. т.

В той же час власний видобуток енергоресурсів в останні роки невпинно скорочувався (табл.. 1.1) і в 2010-2012 роках склав: природного газу відповідно 24,4 і 20,9 млрд. $м^3$, нафти – 4,1-3,6 млн. т. Це становить 25-28% газу і 10-12% нафти від потреби України.

Таблиця 1.1- Видобуток окремих видів палива на Україні

Роки	Нафта (включаючи газовий конденсат) млн.т	Газ, млрд. $м^3$	Вугілля (всього млн.. т)	В тому числі	
				кам'яне	буре
1980	7,5	56,7	197,1	188,2	8,9
1985	5,8	42,9	189,0	180,5	8,5
1986	5,7	39,7	193,1	184,0	9,1
1987	5,6	35,6	192,0	182,7	9,3
1990	5,4	43,4	191,7	181,8	9,9
2010	5,3	28,1	164,8	155,5	9,3

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.

1.3 Класифікація палива

В основу загальної класифікації палива покладені знаки його агрегатного стану та походження (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 - Загальна класифікація палива

Агрегатний стан	Походження	
	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 гази та інші

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.

2 СКЛАД ПАЛИВА

Всі види палива містять у своєму складі поряд з горючими речовинами також негорючі компоненти - баласт.

Горюча частина твердого і рідкого палива являє собою переважно органічний матеріал, створений з п’яти хімічних елементів – вуглецю (C), водню (H), сірки (S), кисню (O) та азоту (N). Азот і кисень не приймають участі в тепловиділенні і тому вони є внутрішнім баластом палива. Виходячи з цього їх включення до горючої частини умовно, однак вони входять у склад речовин, які в цілому горючі.

Горюча частина також включає до себе сполуку FeS_2 (піріт).

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.

Складові частини твердого палива вказані на рис. 2.1.

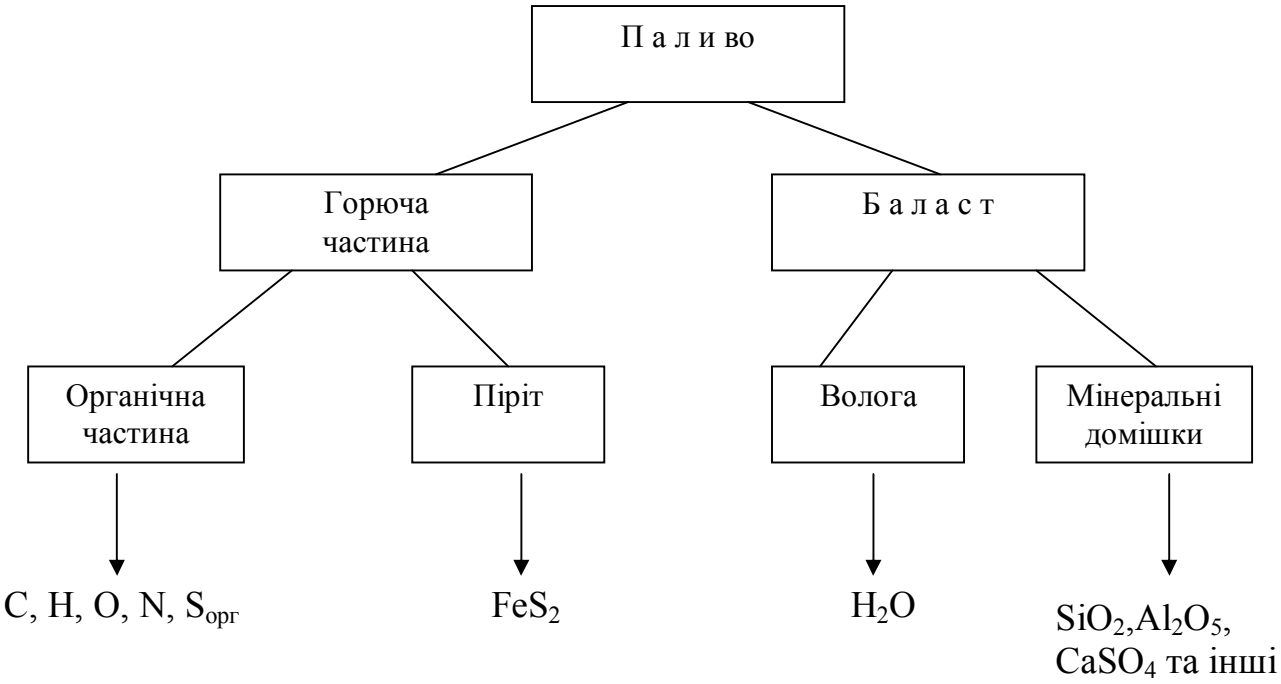

Рис. 2.1 Склад твердого палива

Важливою характеристикою енергетичного палива є його сірчастість. З рис. 2.1 можна побачити, що в твердому паливі сірка є в органічній речо-

вині ($S_{ор}$), а також у складі горючих (піритна сірка $S_{п}$) та негорючих (сульфатна сірка $S_{сфт}$) мінеральних речовин. Таким чином будемо мати

$$S_{заг} = S_{ор} + S_{п} + S_{сфт}, \qquad (2.1)$$

де $S_{заг}$ – загальна сірчастість;

$S_{ор}$ – органічна сірка;

$S_{п}$ – піритна сірка;

$S_{сфт}$ – сульфатна сірка.

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

Індекс	Склад							∑
	C	H	N	O	S	A	W	100
O	органічна маса							100
Г	горюча маса							100
C	суха маса							100
P	робоча маса							

Методика елементарного аналізу достатньо складна, тому такий аналіз проводять періодично. У виробничих умовах виконують технічний аналіз, внаслідок якого визначається вміст вологи, золи, вихід летючих і вихід нелетючого залишку – коксу.

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

$$C^{p} + H^{P} + O^{p} + N^{p} + S^{p} + A^{P} + W^{P} = 100\%; \qquad (2.2)$$

суха маса – паливо без вологи

$$C^{c} + H^{c} + O^{c} + N^{c} + S^{c} + A^{c} = 100\%; \qquad (2.3)$$

горюча маса – паливо без вологи і золи

$$C^{r} + H^{r} + O^{r} + N^{r} + S^{r} = 100\%; \qquad (2.4)$$

органічна маса – горюча маса за відрахуванням сірки

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

Перерахунок з однієї маси на іншу виконується з використанням рівнянь (2.2) – (2.5) і закону збереження маси.

Наприклад, розглянемо перерахунок з горючої маси на робочу. Для цього в рівнянні (2.2) перенесемо в праву частину $A^р$ і $W^р$ і розділимо обидві частини рівняння на відповідні частини рівняння (2.4), будемо мати

$$\frac{C^р + H^р + O^р + N^р + S^р}{C^г + H^г + O^г + N^г + S^г} = \frac{100 - A^р - W^р}{100} = K, \qquad (2.6)$$

де К – коефіцієнт перерахунку.

Таким чином

$$X^р = KX^п, \qquad (2.7)$$

де X - елементи складу палива.

Газове паливо являє собою механічну суміш індивідуальних компонентів – газоподібних та пароподібних. Склад газового палива визначають за допомогою газоаналізаторів чи хроматографів. При цьому одержують склад сухого газу у об’ємних процентах, а вміст вологи у паливі визначають у грамах на $м^3$ сухого газу.

До горючих компонентів газоподібного палива відносяться окис вуглецю (CO), водень (H_2), вуглеводні (CH_4, C_2H_6, ... та інші), сірководень (H_2S). До негорючих компонентів відносяться: вуглекислий газ (CO_2), пара (H_2)), азот (N_2), кисень (O_2).

Перерахунок складу сухого газу на вологий виконується за допомогою коефіцієнта перерахунку

$$К = \frac{100 - H_2O}{100}, \qquad (2.8)$$

де $H_2O = \frac{100 \cdot d_г}{803{,}6 + d_Г}$;

$d_г$ – вміст вологи, $г/м^3$.

3 ТЕПЛОТА ЗГОРАННЯ ПАЛИВА

3.1 Основні поняття

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

Термін „повне згорання” означає, що водень і вуглець окислюються до стану вищих окисів цих елементів – H_2O і CO_2, сірка перетворюється у SO_2, а азот 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:

$$Q^p + Q^c + Q^т + Q^o.$$

За одиницю кількості газового палива приймають 1 $м^3$ суми всіх його компонентів при нормальних умовах (P = 101,3 кПа, t = 0^oC).

3.2 Нижча і вища теплота згорання

Розглянемо реакції горіння водню

$$H_{2,газ}+0,5O_2=H_2O_{рід}+ 286 \text{ МДж/кмоль}, \quad (3.1)$$

$$H_{2,газ}+0,5O_2=H_2O_{газ}+ 242 \text{ МДж/кмоль}. \quad (3.2)$$

З рівнянь (3.1) і (3.2) можна побачити, що теплота згорання водню при умові 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 зветься вищою і позначається $Q_в$.

Кількість теплоти, що виділяється при повному згоранні одиниці палива без конденсації водяної пари зветься нижчою теплотою згорання і позначається $Q_н$.

У більшості технологічних процесів, зв'язаних із згорянням палива, продукти згорання викидаються до атмосфери при температурі вище 100°С, коли пара практично повністю залишається у газовій фазі. Тому теплотехнічні розрахунки ведуть з використанням $Q_н$.

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°С;

2. для газоподібного палива і рідкого з температурою кипіння вище 250°С.

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

$$Q_н^р = 340C^р + 1030H^р + 109\left(S_р - O^р\right) - 25W^р, \qquad (3.3)$$

де $Q_н^р$ - нижча теплота згорання, кДж/кг;

$C^р, H^р, O^р, S^р, W^р$ - вміст відповідних елементів у робочій масі палива, %.

З формули (3.3) видно, що найбільш енергетично цінним є водень, а присутність у горючій масі кисню суттєво знижує теплоту згорання палива.

Розрахунок теплоти згорання газоподібного палива виконується за його компонентним складом:

$$Q = \sum_{i=1}^{k} \frac{C_i}{100}, \qquad (3.4)$$

де К – число горючих компонентів у паливі;

C_i – процентний вміст у паливі і-го компонента;

Q_i – теплота згорання і-го компонента.

Звичайно склад газоподібного палива виражається у об'ємних процентах, значення Q_i відносять до одиниці об'єму і-го компонента, а Q – до одиниці об'єму палива (при нормальних умовах).

Для того, щоб за допомогою формули (3.4) розрахувати нижчу теплоту згорання суміші, до неї треба підставити значення Q_i , що відповідають нижчим теплотам згорання компонентів. Будемо мати

$$Q_н^c = 108H_2 + 127{,}7CO + 358CH_4 + 555C_2H_2 + 636C_2H_6 + \\ + 913C_3H_8 + +1185C_4H_{10} + 1465C_5H_{12} + ... + 234H_2S, \text{ кДж/м}^3. \quad (3.5)$$

$$Q_н^c = 108H_2 + 126{,}3CO + 358{,}2CH_4 + 560{,}5C_2H_2 + 637{,}3C_2H_6 + \\ + 912{,}3C_3H_8 + +1186{,}2C_4H_{10} + 1460C_5H_{12} + 590{,}6C_2H_4 + 859{,}8C_3H_6 + \\ + 1134C_4H_8 + 1404C_6H_6 + 235H_2S$$

Для перерахунку на вологий газ використовується залежність

$$Q_н^p = Q_н^c \frac{100}{100 + 0{,}124d_г}. \quad (3.6)$$

Із аналізу формули (3.5) витікає, що в розрахунку на одиницю об'єму найменшу теплоту згорання має водень із-за його малої густини. Також мала теплота згорання оксиду вуглецю в зв’язку з наявністю у його складі внутрішнього баласту – кисню. Найбільш цінними компонентами газового палива є вуглеводні.

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 зветься таке паливо, теплота згорання якого складає 29,3 мДж/кг (7000 ккал/кг). Приблизно таку теплоту згорання має добре кам'яне вугілля.

$$W^п = \frac{W^p}{Q_н^p}, \qquad A^п = \frac{A^p}{Q_н^p}, \quad S^п = \frac{S_г^p}{Q_н^p}, \qquad Э = \frac{Q_н^p}{Q_{усл}} - \text{тепловий еквівалент.}$$

4 ВИДИ ПАЛИВА

4.1 Тверде паливо

У наш час найбільше значення мають кам'яне та буре вугілля. У незначних обсягах використовують торф. Буре вугілля поділяють на 3 групи в залежності від вологості W^p, % - Б1 більш 40%, Б2 – 30-40%, Б3 менш 30%.

Розрізняють буре вугілля, кам'яне та антрацити. Буре вугілля отримало свою назву внаслідок характерного кольору: від світло-бурого до темно-бурого. Основне родовище цього вугілля на Україні Олександрійське (Дніпровський басейн), на території колишнього Союзу – це Канско-Ачинський басейн, Екібастузьке родовище та інші.

У натуральному вигляді буре вугілля містить значну кількість вологи, що досягає 60% від маси палива. Зольність змінюється в широких границях, A^p=5-40%. Нижча теплота згорання залежить від вологості і зольності і в середньому оцінюється у 16 МДЖ/кг (Дніпровського не перевищує 8,5 МДЖ/кг).

Недоліками бурого вугілля є: мала механічна міцність, низька термічна стійкість, внаслідок чого відбувається швидке його руйнування при транспортних операціях та нагріванні.

Кам'яне вугілля характеризується високим вмістом вуглецю, високою міцністю та густиною, невеликою вологістю (W^p = 3-13%), більш низьким в порівнянні з бурим вугіллям виходом летючих речовин. Кольор кам'яного вугілля – чорний. Основні родовища – Донецький басейн на Україні (Львівсько-Волинський басейн), Кузнецький – в Росії, Карагандинський – у Казахстані.

В основу класифікації кам'яного вугілля покладені такі властивості, як вихід летючих та властивості коксу. Наприклад, класифікація кам'яного вугілля Донецького басейну має вигляд:

Таблиця 4.1 – Класифікація кам'яного вугілля Донецького басейну

Марка	Назва вугілля	Вихід летючих, %	Теплота згорання, МДж/кг	Органічна маса, %				Характеристика коксового залишку
				C	H	N	O	
Д	Довгополум'яне	42	31-33	76-84	4-6	1,8	10-17,5	Порошкоподібний, неспіклий
Г	Газове	35-44	32-44	78-86	4,5-5,5	1,7	6,8-15	Спіклий, сплавлений
ПЖ	Паровичне жирне	26-35	33,5-36,5	84-90	4-5,4	1,7	4-10	Спіклий, сплавлений, густий
К	Коксове	18-20	35-37	87-92	4-5,2	1,5	2,5-7	Спіклий, сплавлений, дуже міцний
ПС	Паровичне спікливе	12-18	35,5-37,5	89-92	3,5-4,9	1,5	3-5	Спіклий, помірно густий
П	Пісне (короткополум'яне)	17	35-36,5	90-93	3,4-4,4	1,2	2,6-4,5	Неспікливий, порошкоподібний або малозлиплий
А	Антрацит	2-9	35-29,5	95-97	1-3	1	1-2	Неспікливий

Як видно з таблиці 4.1, антрацити мають невеликий вихід летючих речовин (2-9%), та теплоту згорання меншу ніж у пісного вугілля.

Летючими звуться газо- та пароподібні речовини, що виділяються з вугілля при його нагріванні без доступу повітря при температурі 850^{o}С. Нелитючий залишок, що утворюється після видалення летючих зветься коксовим залишком. Летючі речовини у паливі в готовому вигляді не містяться, а утворюються при його термічному розкладі його горючої маси.

Вихід летючих визначає характер полум'я: із зменшенням летючих довжина факелу зменшується, а густина коксу поступово збільшується, досягаючи свого максимуму у коксового вугілля, далі поступово зменшується.

Із штучного твердого палива найбільше значення мають кокс і напівкокс.

Кокс одержують внаслідок процесу коксування, що являє собою процес термічної переробки палива при нагріванні його до температури 900-1100^{o}С без доступу повітря.

В залежності від міцності та пористості кокс поділяється на доменний (пористість 45-55% і ливарний (пористість менше 45%). Тут під пористістю розуміється відношення об'єму пор до загального об'єму куска палива. Кокс повинен містити мінімум золи та сірки і зберігати міцністні характеристики при температурах 1500-1600^{o}С. Сировиною для одержання такого коксу є шихта з вугілля марок К, ПС, ПЖ, Г.

Процес напівкоксування іде при температурах 500-550^{o}С. При цьому з палива виділяються смоляна пара та горючі гази. Твердий залишок – напівкокс є енергетичним паливом.

4.2 Рідке паливо

Єдиним представником натуральних рідких палив на планеті є нафта. Нафта у сирому вигляді практично не споживається, а переробляється в інші види палива: бензин, мазут та інше.

Мазути, що є основним видом котельного та пічного палива, поділяються на ряд марок в залежності від їхньої в'язкості. При цьому береться до уваги ве-

личина умовної в'язкості, що являє собою відношення часу витікання 200 $см^3$ мазуту крізь трубку малого діаметру до часу витікання такого ж об'єму дистильованої води. Умовна в'язкість виражається у градусах умовної в'язкості ($^oУВ$).

У відповідності з ГОСТ 10585-75 мазут розділяється на такі марки: флотський Ф5 і Ф12; топкові 40 і 100. Флотський мазут призначений для судових котлів, газових турбін, двигунів. Наприклад, флотський мазут характеризується умовною в'язкістю при температурі 50$^oС$ не більше 5$^oУВ$. Мазут марки 40 використовується у судових котлах, промислових печах, котлах і рідко на електростанціях. Мазут марки 100 призначений для спалювання на електростанціях.

У межах марок мазути розділяються на три сорти в залежності від вмісту сірки: малосірчасті ($S^p < 0,5\%$), сірчасті ($S^p < 0,5 - 2,0\%$), високосірчасті ($S^p > 2,0\%$).

Важливими характеристиками мазуту є температура спалаху і температура займання. Температурою спалаху зветься така температура, при якій з рідкого палива виділяється достатня кількість пари, що спалахує на повітрі від джерела запалювання. При цьому горіння відразу ж припиняється. Мазути, що не містять парафіни, мають температуру спалаху у межах 135-237$^oС$ температура спалаху парафіністих мазутів близька до 60$^oС$. Температуру займання іноді називають верхньою межою температури спалаху, тому що при цій температурі після спалаху пари горіння триває не менше 5 с. Різниця між температурами спалаху і займання складає не більше 60-70$^oС$.

Значно вище знаходиться температура самозаймання, що характеризує ступінь нагрівання мазуту, при якій займається без зовнішнього джерела. Для мазутів ця температура знаходиться у межах 500-600$^oС$.

4.3 Газоподібне паливо

Найбільше значення для економіки має природний газ, що являє собою суміш газів, яка видобувається з надр землі і складається в основному з метану та важких вуглеводнів.

Розрізняють два основних види газів:

А) гази вулканічного походження. Ці гази в основному складаються з метану (94% і вище) і звуться сухими;

Б) попутні гази (нафтопромислові) одержують при розробці нафтових родовищ. Нафта в глибинах землі знаходиться під тиском, при виході її із свердловини тиск знижується, що призводить до виділення розчинених у нафті газів. Їх кількість складає 10-15% маси нафти. Основним вуглеводнем цих газів також є метан, однак, крім нього до складу горючої частини відносяться етан, пропан, бутан та інші важкі вуглеводні. Попутні гази інколи називають жирними газами.

Приблизний склад природних газів наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Приблизний склад природних і попутних газів різних родовищ колишнього СРСР

Родовище	Склад газу, % (об'ємн.)							Теплота згорання, МДж/м^3
	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	CO_2	N_2	
Природний газ								
Дашавське	98,3	0,30	0,12	0,15	-	0,10	1,03	35,8
Шебелинське	93,5	4,00	1,00	0,50	05	0,10	0,4	38,3
Червоножовтневе	78,3	6,40	1,80	-	-	0,7	12,8	34,0
Елшанське	92,2	2,80	0,70	0,5	-	0,30	3,5	36,0
Березовське	95,1	1,10	0,30	0,08	-	0,40	3,0	35,1
Попутний газ								
Туймазинське	39,5	20,0	18,5	7,7	4,3	0,4	10,0	59,4
Муханівське	57,5	15,0	11,0	8,0	4,0	1,5	3,0	56,0
Ромашкінське	40,0	19,5	18,0	7,5	4,9	0,1	3,3	60,0

Як видно з табл. 4.2, баласт природного газового палива представляється азотом та вуглекислим газом, однак їх сумарний склад не великий.

Природний газ доставляють до районів споживання за допомогою магістральних газопроводів. Попутний газ піддають зрідженню і у вигляді пропан-бутанової суміші перевозять у спеціальних цистернах.

Із штучних газів найбільше значення мають коксовий і доменний гази. Коксовий газ одержують як побічний продукт процесу коксування. Зжатий сирий газ містить пару смол, аміак, сірководень, які уловлюють при первинній очистці газу. Газ, що пройшов первинну очистку, звуть зворотним. Зворотний газ піддають додатковому очищенню для вилучення з нього ціану, окису азоту та сірки. Одержаний газ звуть очищеним коксовим газом. В умовах Дніпродзержинського промвузла очищений газ направляють до об'єднання "Азот", де з нього вилучають водень, що призводить до підвищення теплоти згорання газу. Такий газ звуть багатим коксовим газом і використовують для спалювання у промислових печах. Теплота згорання багатого газу складає в середньому $Q_н^р = 20$ МДж/м^3. Достатньо висока теплота згорання та добра випромінювальна здатність факелу обумовлюють цінність цього газу для металургійної промисловості.

Доменний газ є побічним продуктом виробництва при плавці чавуну у доменних печах. Доменний газ утворюється внаслідок горіння коксу у шарі великої товщини. Продукти згорання, що проходять крізь шар шихти, утворюють доменний газ , склад якого обумовлюють реакції

$$CO_2 + C = 2CO,$$
$$FeO + C = Fe + CO.$$

Приблизний склад газу такий, % об'ємних:

$CO = 29 - 30;$ $CH_4 = 0{,}1 - 0{,}4;$ $H_2 = 1{,}5 - 2{,}5;$ $CO_2 = 10 - 12;$ $N_2 = 56 - 58.$

Внаслідок того, що газ забаластований азотом і вуглекислим газом, його теплота згорання мала і складає 3,7 – 4 МДж/м^3. Доменний газ використовують для власних потреб на металургійних заводах.

5 КІЛЬКІСТЬ ПОВІТРЯ ДЛЯ ГОРІННЯ ПАЛИВА

5.1 Склад повітря

$$O_2^c = 21\%; \qquad N_2^c = 79\%.$$

В теплотехнічних розрахунках склад сухого атмосферного повітря приймають таким (в об'ємних процентах): $O_2^c = 21\%$; $N_2^c = 79\%$.

При цьому умовно вуглекислий газ, а також аргон, неон та інші благородні гази відносять до азоту, як баластної частини повітря. Тоді на одну об'ємну частину кисню, що надходить на горіння з повітря, вводиться

79 : 21 = 3,76 об'ємних частин азоту.

Практично завжди у повітрі знаходиться водяна пара. В середньому для всієї земної атмосфери вміст водяної пари такий: H_2O=0,9%. Тому в перерахунку на вологе повітря одержимо

$$O_2^{вл\,р} = 20{,}8\%; \qquad N_2^p = 78{,}3\%; \qquad H_2O = 0{,}9\%.$$

5.2 Кількість кисню для горіння палива

Кількість кисню для горіння твердого та рідкого палива розраховується на 1 кг, а при горінні газоподібного – на 1 м^3 при нормальних умовах. Для цього використовують хімічні реакції горіння окремих складових

$$C + O_2 = CO_2 \tag{5.1}$$

$$S + O_2 = SO_2 \tag{5.2}$$

$$H_2 + 0{,}5O_2 = H_2O \tag{5.3}$$

$$CO + 0{,}5O_2 = CO_2 \tag{5.4}$$

$$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O \tag{5.5}$$

$$C_mH_m + \left(m + \frac{n}{4}\right)O_2 = mCO_2 + \frac{n}{2}H_2O \tag{5.6}$$

Розглянемо реакцію (5.1). маса вуглецю в паливі C^p/100 кг на 1 кг робочої маси. Кількість кіломолей вуглецю палива C^p/100·12. За законом Авогадро кі-

ломоль газу займає об'єм 22,4 м^3, оскільки за реакцією (5.1) на 1 кмоль вуглецю витрачається 1 кмоль кисню, то кількість кисню буде дорівнювати

$\frac{22,4 \cdot C^р}{100 \cdot 12}$ м^3 на 1 кг палива.

Цілковито так само можемо одержати співвідношення для інших елементарних реакцій горіння складових твердого або рідкого палива. Сумарна залежність буде такою

$$V_{O_2}^{теор} = 0,01\left[1,867C^р + 5,6H^р + 0,7\left(S^р - O^р\right)\right] \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (5.7)$$

Для газоподібного палива сумарна залежність визначається на основі стехіометричних коефіцієнтів у відповідних елементарних реакціях горіння. Будемо мати

$$V_{O_2}^{теор} = 0,01\left[0,5CO^р + 0,5H_2^р + \left(m + \frac{n}{4}\right)\left(C_mH_n\right)^р - O_2^р\right] \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (5.8)$$

5.3 Кількість повітря для горіння палива

Кількість повітря, що відповідає реакціям горіння називають теоретичною.

Теоретична кількість повітря визначається за формулою

$$L_o = \frac{V_{O_2}^{теор}}{K_{O_2}}, \quad (5.9)$$

де K_{O_2} - об'ємна доля кисню в повітрі.

Враховуючи, що для сухого атмосферного повітря $K_{O_2} = 0,21$, одержимо формули для розрахунку потрібної кількості повітря:

а) при спалюванні твердого або рідкого палива

$$L_o^{с.п.} = 0,0889C^р + 0,267H^р + 0,033\left(S^р - O^р\right) \text{ м}^3/\text{кг}; \quad (5.10)$$

$$V^o = 0,0889\left(C^р + 0,3755^р\right) + 0,265H^р - 0,03330^р$$

б) при спалюванні газоподібного палива

$$L_o^{с.п.} = 0,01\left(2,38CO^р + 2,38H_2^р + 9,52CH_4^р + \ldots - 4,760O_2^р\right) \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (5.11)$$

$$V^{o} = 0{,}0476\left(0{,}5CO + 0{,}5H_2 + 1{,}5H_2 + 1{,}5H_2S\right) + \Sigma\left(m + \frac{n}{4}\right)C_mH_n - O_2$$

Однак відомо, що в повітрі міститься волога, нехай її вміст буде d_n у грамах на 1 м^3 сухого повітря. Тоді об'єм водяної пари в 1 м^3 сухого повітря буде

$$\frac{22{,}4d_n}{18 \cdot 1000} = 0{,}00124d_n,\ \text{м}^3.$$

Звідкіля об'єм вологого повітря на одиницю палива буде

$$L_o^{в.п.} = \left(1 + 0{,}00124d_n\right)L_o^{с.п.}\ \text{м}^3/\text{м}^3. \qquad (5.12)$$

$$V^{o}_{вп.в} = \left(1 + 0{,}00124d_в\right)V^{o}$$

На практиці завжди подають повітря в кількості більшій ніж теоретична. Пояснюється це тим, що процес горіння протікає в реальному фізичному середовищі, коли хімічні перетворення супроводжуються дифузією, масообміном та іншими явищами. Це потребує подавати на спалювання деякий надлишок повітря.

Відношення дійсної кількості повітря до теоретично необхідної носить назву коефіцієнту витрати повітря

$$\alpha_n = \frac{L_д}{L_o}. \qquad \alpha_в = \frac{V}{V^{o}} \qquad (5.13)$$

Якщо $\alpha_n = 1,$ то це теоретичне спалювання.

Якщо ж $\alpha_n < 1,$ то виникає так званий хімічний недопал, тобто в продуктах згорання поряд з CO_2, SO_2, H_2O, N_2 з'являються CO, H_2, CH_4 та інші вуглеводні. В найбільш поширеному випадку $\alpha_n > 1.$

1. При цьому кількість надлишкового повітря

$$L_{над} = L_д - L_o = \alpha_т L_o - L_o = \left(\alpha_n - 1\right)L_o. \qquad (5.14)$$

На цю ж величину збільшується об'єм продуктів згорання.

6 СКЛАД І КІЛЬКІСТЬ ПРОДУКТІВ ЗГОРАННЯ ПАЛИВА

При визначенні складу продуктів згорання будемо використовувати ті ж рівняння горіння (5.1) – (5.6). Обмежимося випадком повного спалювання палива. Тоді при теоретичному горінні ($\alpha_п$=1) продукти згорання будуть складатися з вуглекислого газу, сірчанистого газу, водяної пари, азоту. При надлишку повітря ($\alpha_n > 1$) в продуктах згорання з'являється кисень.

6.1 Визначення кількості продуктів повного згорання твердого і рідкого палива

Нехай склад палива відомий у % на робочу масу

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S^p + A^p + W^p = 100\%.$$

З реакції горіння вуглецю одержимо

$$V_{CO_2} = \frac{C^p \cdot 22{,}4}{100 \cdot 12} = 0{,}01\left(1{,}867C^p\right) \text{ м}^3/\text{кг}. \qquad (6.1)$$

Аналогічно

$$V_{SO_2} = \frac{S^p \cdot 22{,}4}{100 \cdot 32} = 0{,}01\left(0{,}7S^p\right) \text{ м}^3/\text{кг}. \qquad (6.2)$$

Звичайно, коли виконують аналіз складу продуктів згорання, то визначають суму вуглекислого і сірчанистого газу, тобто

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2} = 0{,}01\left(1{,}867C^p + 0{,}7S^p\right) \text{ м}^3/\text{кг}. \qquad (6.3)$$

Об'єм водяної пари за реакцією (6.3) буде

$$V'_{H_2O} = \frac{H^p \cdot 22{,}4}{100 \cdot 2} = 0{,}01\left(11{,}2H^p\right) \text{ м}^3/\text{кг}. \qquad (6.4)$$

Крім того, в паливі міститься волога в кількості W^p, яка випаровується у процесі горіння і у вигляді водяної пари переходить до складу продуктів згорання

$$V''_{H_2O} = \frac{W^p \cdot 22{,}4}{100 \cdot 18} = 0{,}01\left(1{,}242W^p\right) \text{ м}^3/\text{кг}. \qquad (6.5)$$

Також водяна пара міститься у повітрі, що подається на горіння.

Її об'єм буде

$$V_{H_2O}''' = \frac{d_п \cdot 22{,}4 \cdot L_д}{1000 \cdot 18} = 0{,}00124 d_п L_д \ м^3/кг, \quad (6.6)$$

де $L_д$ – дійсна кількість сухого повітря.

Сумарно будемо мати

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}' + V_{H_2O}'' + V_{H_2O}''' = 0{,}01(11{,}2H^р + 1{,}242W^р) + 0{,}00124 d_п L_д, \ м^3/кг. \quad (6.7)$$

Вміст азоту у продуктах згорання складається з азоту палива та азоту повітря. З паливом вводиться азоту

$$V_{N_2}' = \frac{N^р \cdot 22{,}4}{100 \cdot 28} = 0{,}008 N^р, \ м^3/кг \quad (6.8)$$

З повітря вводиться азоту

$$V_{N_2}'' = 0{,}79 L_д \ м^3 \quad (6.9)$$

Всього вводиться азоту

$$\mathbf{V_{N_2} = V_{N_2}' + V_{N_2}'' = 0{,}008 N^р + 0{,}79 L_д}, \ м^3/кг. \quad (6.10)$$

При надлишку повітря об’єм надлишкового кисню буде

$$\mathbf{V_{O_2} = 0{,}21(\alpha_п - 1) L_o}, \ м^3/кг. \quad (6.11)$$

де L_o – теоретична кількість сухого повітря.

Тоді кількість продуктів повного згорання твердого та рідкого палива буде

$$\mathbf{V_{п.з.} = V_{RO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2}} \ м^3/кг. \quad (6.12)$$

6.2 Визначення кількості продуктів повного згорання газоподібного палива

Нехай відомий склад палива та його вологість $d_г$, г/м^3 сухого газу.

При визначенні кількості продуктів згорання також використовуються елементарні реакції горіння, з яких одержимо

$$\mathbf{V_{CO_2} = 0{,}01\left(CO_2 + CO + CH_4 + \sum_m mC_mH_n \right)}, \ м^3/м^3. \quad (6.13)$$

Аналогічно будемо мати

$$\mathbf{V_{SO_2} = 0{,}01H_2S}\ \text{м}^3/\text{м}^3. \qquad (6.14)$$

Можемо записати

$$\mathbf{V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2}}$$

Об'єм водяної пари буде

$$\mathbf{V_{H_2O} = 0{,}01\left(H_2 + 2CH_4 + \sum C_m H_n \right) + 0{,}00124d_г + 0{,}00124d_п L_д},\ \text{м}^3/\text{м}^3. \qquad (6.15)$$

Об'єм азоту

$$\mathbf{V_{N_2} = 0{,}01N_2 + 0{,}79L_д = V^o_{N_2} + 0{,}79(\alpha_п - 1)L_o},\ \text{м}^3/\text{м}^3. \qquad (6.16)$$

де $\mathbf{V^o_{N_2}}$ - об'єм азоту при теоретичному спалюванні, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Об'єм надлишкового кисню

$$\mathbf{V_{O_2} = 0{,}21(\alpha_п - 1)L_o},\ ,\ \text{м}^3/\text{м}^3. \qquad (6.17)$$

За нагальний об'єм продуктів згорання

$$\mathbf{V_{п.з.} = V_{RO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2} = V^o_{п.з.} + (\alpha_п - 1)L_o}, \qquad (6.18)$$

де де $\mathbf{V^o_{п.з.}}$ - об'єм продуктів згорання при теоретичному спалюванні.

Процентний склад продуктів згорання визначається так

$$\mathbf{R_{O_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_{п.з.}} \cdot 100\%;} \qquad \mathbf{H_2O = \frac{V_{H_2O}}{V_{п.з.}} \cdot 100\%;} \quad \mathbf{N_2 = \frac{V_{N_2}}{V_{п.з.}} \cdot 100\%;} \quad \mathbf{O_2 = \frac{V_{RO_2}}{V_{п.з.}} \cdot 100\%.}$$

7 ТЕМПЕРАТУРА ГОРІННЯ ПАЛИВА

Під температурою горіння палива розуміється та температура, до якої нагріваються продукти згорання за рахунок теплоти, що виділяється при горінні палива.

7.1 Калориметрична температура

В залежності від способу визначення кількості теплоти, що іде на підвищення температури продуктів згорання, розрахункові температури будуть різними.

Так, якщо припустити, що вся теплота, котра виділяється при горінні палива, піде тільки на підвищення температури продуктів згорання, то в цьому випадку їх температура буде найвищою і зветься калориметричною.

Коли паливо і повітря до спалювання не підігріваються, а також відсутній хімічний недопал, залежність для калориметричної температури має вигляд

$$\mathbf{t_k = \frac{Q_н^{hp}}{V_{п.з.} C_o^{t_k}}}, \qquad (7.1)$$

де $\mathbf{C_o^{t_k}}$ - середня об'мна теплоємкість продуктів згорання в інтервалі температур від 0^oC до t_k.

Однак, на практиці застосовують підігрів як палива, так і повітря, тому треба враховувати їх фізичну теплоту, яка іде на підвищення температури продуктів згорання. В той же час хімічний недопал зменшує теплоту згорання палива. Формула для розрахунку калориметричної температури у загальному випадку має вигляд

$$\mathbf{t_k = \frac{Q_н^p + Q_{ф.пов.} + Q_{ф.пал.} - Q_{х.н.}}{V_{п.з.} C_o^{t_k}}}, \qquad (7.2)$$

де $Q_{ф.пов.}$ – фізична теплота підігрітого повітря;

$Q_{ф.пал.}$ - фізична теплота підігрітого палива;

$Q_{х.н.}$ – теплота, що загублена внаслідок хімічного недопалу, віднесена до одиниці палива.

Фізична теплота повітря розраховується за формулою

$$\mathbf{Q_{ф.пов.} = L_д C_o^{t_{пов}} t_{пов.}}, \quad (7.3)$$

де $\mathbf{C_o^{t_{пов}}}$ - середня об'ємна теплоємкість повітря в інтервалі температур від 0^oC до $t_{пов.}$;

$t_{пов}$ – температура підігріві повітря.

Аналогічно

$$\mathbf{Q_{ф.пал.} = C_o^{t_{пал}} t_{пал.}}, \quad (7.4)$$

де $\mathbf{C_o^{t_{пал}}}$ - середня теплоємкість палива в інтервалі температур від 0^oC до $t_{пал.}$;

$t_{пал}$ – температура підігріву палива.

Величина хімічного недопалу може бути розрахована за формулою

$$\mathbf{Q_{х.н.} = 0{,}01\left(12{,}77CO^{п.з.} + 10{,}8H_2^{п.з.} + 35{,}8CH_4^{п.з.}\right)V_{п.з.}}, \quad (7.5)$$

де $\mathbf{Q_{х.н.}}$ вимірюється у МДж/кг, або МДж/$м^3$;

$\mathbf{CO^{п.з.}, H_2^{п.з.}, CH_4^{п.з.}}$ - об'ємний процентний вміст горючих компонентів у сухих продуктах згорання;

$\mathbf{V_{п.з.}}$ - об'єм сухих продуктів згорання.

Таким чином на величину калориметричної температури впливають такі фактори:

а) підігрів повітря і палива;

б) теплота згорання палива;

в) хімічний недопал;

г) коефіцієнт витрати повітря;

д) процентний вміст кисню у повітрі.

Підігрів повітря і палива завжди підвищує калориметричну температуру. Із збільшенням коефіцієнту витрати повітря $t_к$ знижується, тому що збільшується об'єм продуктів згорання. Збільшуючи частку кисню в повітрі, ми зменшуємо об'єм продуктів згорання і таким чином підвищуємо $t_к$.

Вз збільшенням теплоти згорання одночасно згорає і об'єм продуктів згорання і тому, наприклад, теплота згорання водню нижча ніж метану, проте його калориметрична температура велика.

Розрахунок калориметричної температури ведуть наближеними методами. Орієнтоване значення $t_к$ можна знайти з використанням i – t діаграми (рис. 6.1). На цій діаграмі

$\mathbf{V_L = \frac{L_д - L_o}{V_{п.з.}} \cdot 100\% -}$ процентний вміст надлишкового повітря у продуктах згорання.

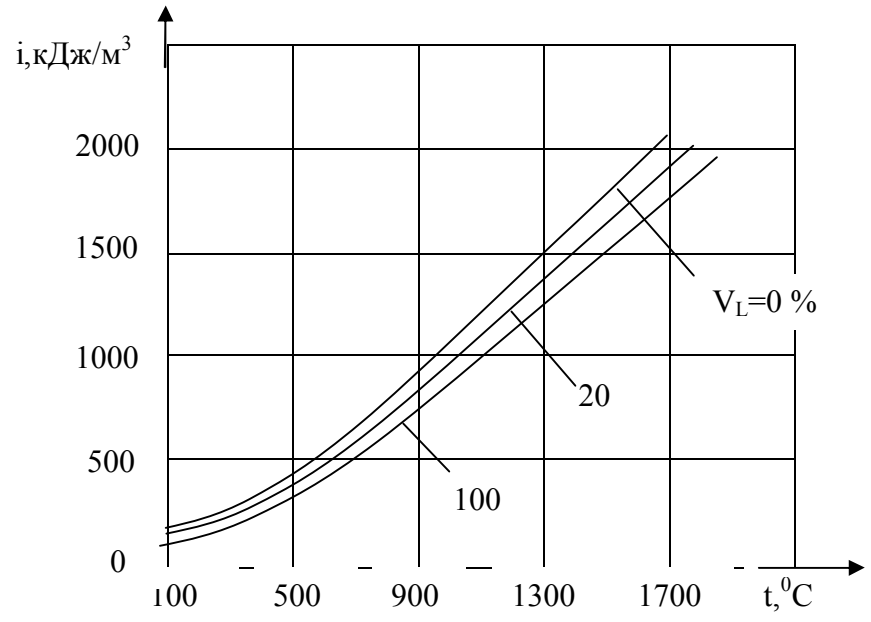

Рисунок 6.1- I-t діаграма продуктів згорання

Спочатку підраховують калориметричну ентальпію за формулою

$$\mathbf{i_k = \frac{Q^p_н + Q_{ф.пов.} + Q_{ф.пал.} - Q_{х.н.}}{V_{п.з.}}} \qquad (7.6)$$

Далі за допомогою і – t діаграми знаходять наближене значення $\mathbf{t_k = t'}$, підраховують теплоємкість продуктів згорання $\mathbf{C_o^{t'}}$, а тоді визначають

$$\mathbf{t_k = \frac{i_k}{C_o^{t'}}}. \qquad (7.7)$$

7.2 Жаровидатність палива

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

Ці умови такі:

а) температура суміші палива з повітрям дорівнює 0^oC;

б) повне горіння відбувається з теоретичною кількістю повітря;

в) у камері горіння підтримується нормальний тиск (р=101,3 кПа).

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

$$\mathbf{t_ж = \frac{Q_н^p}{V_{п.з.}^o \cdot C_o^{tж'}}}. \qquad (7.8)$$

7.3 Теоретична температура

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,

$$CO + 0{,}5O_2 \rightleftharpoons CO_2$$

$$H_2 + 0{,}5O_2 \rightleftharpoons H_2O,$$

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

$$t_{теор} = \frac{Q_н^р + Q_{ф.пал.} + Q_{ф.пов.} - Q_{х.н.} - Q_{дис}}{V_{п.з.} \cdot C_o^{t_{теор}}}, \quad (7.9)$$

де $Q_{дис.}$ – теплота дисоціації.

7.4 Дійсна температура

Спалювання палива в промислових агрегатах неподільно зв'язане з тепловіддачею до нагріваємих виробів, кладки, водоохолоджуваних елементів. Тому тільки частина теплоти, що виділяється при горіння палива залишається у продуктах згорання і іде на підвищення $t_{п.з.}$ Відповідно дійсна температура завжди нижча ніж калориметрична.

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

$$t_д = \eta t_к, \quad (7.10)$$

де η - пірометричний коефіцієнт, що дорівнює 0,65-0,75.

8 КІНЕТИКА РЕАКЦІЙ ГОРІННЯ

Горіння, як вже відзначалось, це хімічна реакція окислення. Механізм та загальні закономірності протікання хімічних реакцій у часі вивчаються у розділі фізичної хімії – хімічній кінетиці.

Деякі положення хімічної кінетики стосовно до реакцій горіння розглядаються нижче.

8.1 Швидкість реакцій горіння

Хімічні реакції можуть протікати в одній фазі, наприклад, горіння газових сумішей. Тоді вони звуться гомогенними. Горіння твердого палива – це гетерогенний процес, що протікає на межі поділу твердої та газової фази.

Під швидкістю гомогенної реакції розуміють зміну кількості речовини, що реагує в одиниці об’єму за одиницю часу. Відповідно, під швидкістю гетерогенної реакції розуміють зміну кількості речовини, що реагує на одиниці поверхні поділу фаз, за одиницю часу.

Наприклад, для гомогенної реакції горіння можемо записати

$$\overline{\mathbf{W}} = \frac{\Delta \mathbf{C}}{\Delta \tau}, \qquad (8.1)$$

де $\overline{\mathbf{W}}$ - середня швидкість гомогенної реакції, кмоль/м^3·с;

ΔC – зміна концентрації палива за проміжок часу $\Delta\tau$, кмоль/м^3.

Якщо перейти до границі $\Delta\tau \to 0$, то одержимо дійсну швидкість реакції

$$W = \lim_{\Delta\tau \to o} \frac{\Delta C}{\Delta \tau} = \frac{d\varepsilon}{d\tau}. \qquad (8.2)$$

8.2 Закон діючих мас

Під час горіння речовини вступають до реакцій у різних мольних співвідношеннях

$$\alpha A + \beta B = \gamma M + \delta N, \qquad (8.3)$$

де $\alpha,\beta,\gamma,\delta$ - стехіометричні коефіцієнти, або число молей речовин А, В, М, N.

А, В, М, N – хімічні символи реагуючих речовин.

Для того, щоб в газовій суміші виникла хімічна реакція насамперед необхідно зіткнення молекул реагуючих речовин. З теорії імовірностей випливає, що імовірність зустрічі двох молекул різних речовин А і В пропорціональна добутку їх концентрацій $C_A \cdot C_B$. У загальному випадку імовірність одночасного удару α молекул речовини А і β молекул речовини В дорівнює добутку $\mathbf{C_A^\alpha \cdot C_B^\beta}$.

Закон діючих мас формулюється таким чином: в однорідному середовищі при постійній температурі швидкість хімічної реакції пропорціональна добутку концентрацій реагуючих речовин із степенями, що дорівнюють відповідним стехіометричним коефіцієнтам, тобто

$$\mathbf{W = kC_A^\alpha \cdot C_B^\beta}, \qquad (8.4)$$

де К – константа швидкості реакції.

8.3 Закон Ареніуса

Закон Ареніуса встановлює залежність константи швидкості хімічної реакції від температури

$$K = K_o \exp(-E / R_M T), \qquad (8.5)$$

де Е – енергія активації, Дж/кмоль;

R_M = 8314 Дж/кмоль·К – універсальна газова стала;

Т – температура, К;

K_o – коефіцієнт пропорціональності.

У залежності (8.5) енергія активації – це та мінімальна енергія, яку повинні мати активні молекули. Цю енергію визначають експериментальним шляхом. Чисельні значення енергії активації реакцій горіння знаходяться у межах 83,7-167,5 МДж/кмоль.

Згідно з законом Больцмана число активних молекул, що мають енергію рівну або вищу, ніж енергія активації, пропорціонально комплексу $\mathbf{exp(-E/R_M T)}$, що зветься комплексом активності. У графічному вигляді цей комплекс зображений на рис. 8.1, з якого випливає значний ріст швидкості реакції в залежності від температури.

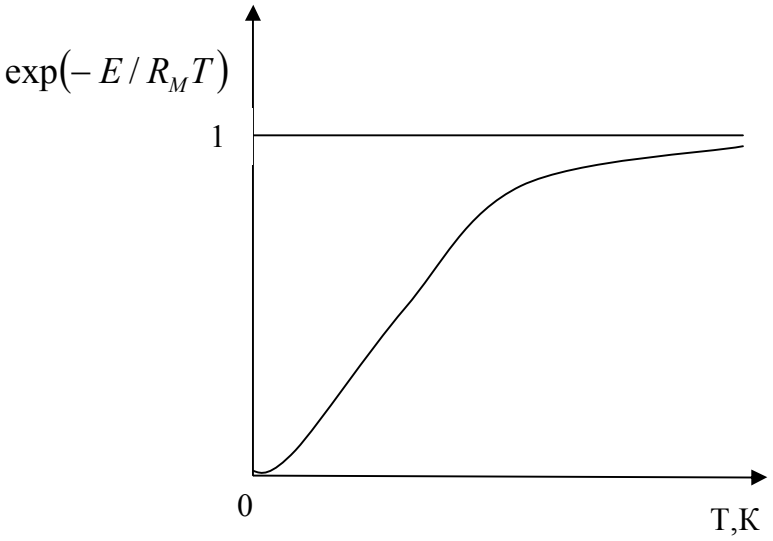

Рисунок 8.1 - Залежність комплексу активності від температури

8.4 Ланцюгові реакції

Реакції горіння ніколи не відбуваються безпосередньо між молекулами палива та окислювача, а протікають через проміжні стадії, в яких утворюються активні продукти – вільні радикали і атоми. Останні вступають до реакції із вихідними речовинами, створюючи як кінцеві, так і нові активні продукти, що продовжують реакції.

Як приклад, розглянемо реакцію горіння водню. Спочатку яка-небудь активна молекула М розщеплює молекулу водню на два атоми

$$\mathbf{H_2 + M = H + H + M.} \qquad (8.6)$$

Будь який з атомів водню, перебуваючи у нестійкому стані, стикаючись з молекулою кисню, розщеплює її в свою чергу з утворенням гідроксилу та атома кисню

$$\mathbf{H + O_2 + OH + O.} \qquad (8.7)$$

Активний атом кисню, що залишився вільним, стикаючись з новою молекулою водню, розщеплює її та приєднує до себе атом водню, утворюючи гідроксил

$$\mathbf{O + H_2 = OH + H.} \qquad (8.8)$$

Гідроксил, стикаючись з молекулою водню, розщеплює її, приєднуючи до себе атом водню, перетворюючись нарешті у молекулу води

$$\mathbf{OH + H_2 = H_2O + H.} \qquad (8.9)$$

Підсумовуючи реакції (8.7), (8.8) і подвоєну реакції (8.9), будемо мати

$$\mathbf{H + 3H_2 + O_2 = 3H + 2H_2O.} \qquad (8.10)$$

Із рівняння (8.10) видно, що вступ одного атому водню в реакцію викликає появу трьох нових атомів водню. Ці три атоми водню у свою чергу починають діяти, що призводить до появи 9 атомів водню і т.д. Причому реакція одержує дуже сильний само розгін, практично миттєво поширюючись по об'єму реагуючої суміші, тобто має вибуховий характер. Схема розвитку ланцюгової реакції зображена на рис. 8.2.

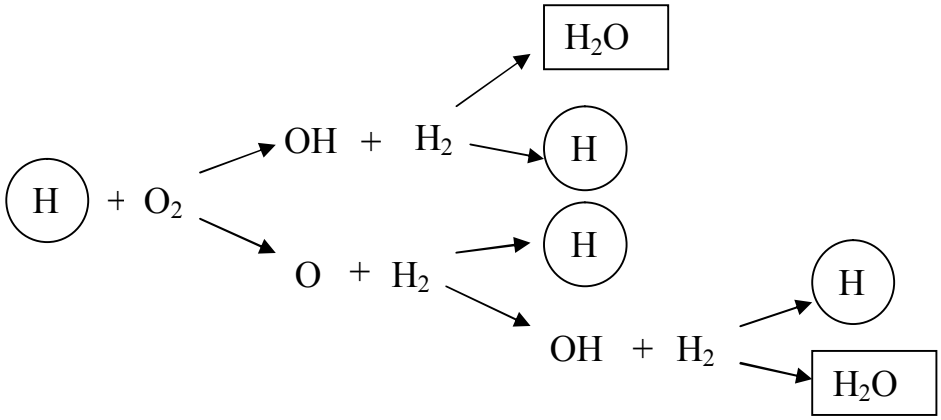

Рисунок 8.2 - Схема розвитку ланцюгової реакції горіння водню

Така ланцюгова реакція зветься розгалуженою. По розгалуженим ланцюговим реакціям також протікає горіння окису вуглецю, метану та інших вуглеводних.

9 ХІМІЧНА РІВНОВАГА РЕАКЦІЙ ГОРІННЯ

9.1 Оборотність реакцій і константа рівноваги реакцій

Хімічні реакції звичайно протікають в двох протилежних напрямках: як у бік утворення кінцевих продуктів, так і в бік утворення вихідних речовин внаслідок реагування кінцевих продуктів. Протікання реакції в двох протилежних напрямках зветься хімічною оборотністю і записується рівнянням у вигляді

$$\alpha A + \beta B \rightleftarrows \gamma M + \delta N, \qquad (9.1)$$

де A, B, M, N – хімічні символи реагуючих речовин;

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ - стехіометричні коефіцієнти.

Верхня стрілка вказує на утворення з вихідних речовин кінцевих продуктів, а нижня – на протікання реакції в бік утворення вихідних речовин. Швидкість реакції зліва направо позначимо W_1, а справа наліво – W_2. Під час протікання прямої реакції концентрація вихідних речовин зменшується, тому її швидкість зменшується у відповідності до закону діючих мас. Швидкість же зворотної реакції навпаки збільшується. Результуюча швидкість реакції

$$W = W_1 - W_2 \qquad (9.2)$$

буде поступово зменшуватися до нуля.

Настає так звана динамічна хімічна рівновага, коли кількість речовин у системі залишається незмінною і здається, що реакція зупинилась. Насправді реакції ідуть, але з однаковими швидкостями

$$\begin{aligned} W &= 0, \\ W_1 &= W_2 \end{aligned} \qquad (9.3)$$

Згідно з законом діючих мас

$$W_1 = K_1 C_A^{\alpha} C_B^{\beta}, \qquad (9.4)$$

$$W_2 = K_2 C_M^{\gamma} C_{N,}^{\delta} \qquad (9.5)$$

де C_A, C_B, C_M, C_N – поточні концентрації реагуючих речовин, кмоль/м^3;

K_1 і K_2 – константи швидкості прямої і зворотної реакції.

В момент рівноваги

$$K_1 C_A^{\alpha} C_B^{\beta} = K_2 C_M^{\gamma} C_N^{\delta}, \qquad (9.6)$$

Звідкіля будемо мати

$$K_C = \frac{K_2}{K_1} = \frac{C_A^{\alpha} C_B^{\beta}}{C_M^{\gamma} C_N^{\gamma}}. \qquad (9.7)$$

Приймаючи до уваги, що константи швидкості K_1 прямої і K_2 зворотної реакції при даній температурі є сталими величинами, приходимо до такого висновку щодо константи рівноваги K_C.

9.2 Принцип Лє-Шательє

Крім температури на константу рівноваги впливають такі фактори, як тиск і концентрація реагуючих речовин. Якщо на систему, що знаходиться в хімічній рівновазі впливати зовні, змінюючи температуру, тиск чи концентрацію реагуючих речовин, то система вийде із стану рівноваги.

Принцип Лє-Шательє встановлює напрямок зміни ходу хімічної реакції в залежності від зміни зовнішніх факторів. Принцип Лє-Шательє формулюється таким чином: якщо на систему, що знаходиться у хімічній рівновазі, впливати зовні шляхом зміни температури, тиску, чи концентрації, то у системі виникнуть самодовільні процеси, що прагнуть зменшити цей вплив.

10 ЗАЙМАННЯ ПАЛИВА

10.1 Самозаймання та запалювання

Займання – це момент переходу від повільного окислення до горіння. При цьому розрізняють запалювання та самозапалювання.

Запалювання здійснюють за допомогою іскри, розжареної поверхні або дроту, чи за допомогою відкритого полум'я (факельне запалювання).

Самозаймання – це процес виникнення горіння при підвищенні температури або тиску горючої суміші без джерела запалювання.

Мінімальну температуру горючої суміші, при досягненні якої починається розвиток процесу горіння,називають критичною. Ця температура залежить не тільки від властивостей горючої суміші. А також від умов тепловіддачі і тому не є фізико-хімічною константою. Внаслідок цього у таблицях наводять границі зміни температури самозаймання для різних сумішей газів.

Таблиця 10.1 – Температура самозаймання горючих газів

Газ	Температура самозаймання, ^{0}C	
	Від	До
Водень (H_2)	510	590
Окису вуглецю (CO)	610	658
Метан (CH_4)	545	850
Коксовий газ	500	640
Доменний газ	530	680
Природний газ	560	800

10.2 Границі запалювання

Холодна газоповітряна суміш може запалитися від контакту із вогнем лише у визначеному інтервалі співвідношень газ-повітря. Границі запалювання виражають у об'ємних процентах вмісту газу у суміші. При цьому розрізняють нижню та верхню границі. Нижня границя обмежує поширювання полум'я із-за надлишку повітря, верхня – із-за надлишку палива. Таким чином,суміші, що знаходяться поза цих границь,нездатні до поширювання полум'я і не вибухають.

У таблиці 10.2 – наведені границі займання деяких газів у суміші з повітрям.

Таблиця 10.2 – Границі запалювання, % об'ємних

Газ	Границі займання	
	Верхня	Нижня
Водень (H_2)	74,2	4,1
Окису вуглецю (CO)	74,2	12,5
Метан (CH_4)	14	5,3
Коксовий газ	31,0	5,6
Доменний газ	74,0	35,0
Природний газ	17,0	4,5

Треба мати на увазі, що при нагріванні сумішей концентраційні границі розширюються.

Формула для розрахунку границь запалювання технічних газів,що являють собою суміш газів CO, H_2,CH_4, та інших

$$N = \frac{100}{C_1/N_1 + C_2/N_2 + \dots C_i/N_i}, \% \qquad (10.1)$$

де N – границя (верхня або нижня) суміші технічного газу з повітрям;

C_1, C_2, C_i - об'ємні частини горючих компонентів у технічному газі, % об'ємних.

N_1, N_2, N_i - границі займання горючих газів у суміші з повітрям (верхня, або нижня).

10.3 Поширювання полум'я у газоповітряних сумішах

Якщо в деякому об'ємі газоповітряної суміші здійснити запалювання, то теплота,що виділяється під час запалювання буде передаватися суміжним об'ємам, що призводить до їх послідовного запалювання. Внаслідок цього горіння буде поширюватися від шару до шару по об'єму суміші і сприйматися як поширювання полум'я. Поширювання полум'я таким методом зветься тепловим.

Процес горіння відбувається у дуже тонкому шарі, котрий відокремлює продукти горіння від горючої суміші. Шар, у якому протікають хімічні реакції з виділенням теплової енергії, зветься фронтом полум'я, або зоною горіння. Товщина цього шару складає частки міліметру. Однак, такий механізм поширювання полум'я реалізується тільки у сумішах, що знаходяться у спокої, або у ламінарному русі.

Під час турбулентного руху за рахунок хаотичного переміщення об'ємів газу у потоці збільшується поверхня фронту полум'я.

У суміші, що знаходиться у спокої, полум'я буде перемішуватися із швидкістю u_n– це швидкість нормального поширювання полум'я. Вона являє собою лінійну швидкість переміщення елементу фронту полум'я відносно свіжої суміші у напрямку нормалі до цього елементу. Ця швидкість для різних сумішей не перевищує декілька метрів за секунду (0,3 – 2,5 м/с).

У теорії горіння використовують поняття масової швидкості горіння

$$u_m = \rho u_n \ , \qquad (10.2)$$

де u_m – масова швидкість горіння, кг/м^{2}с;

ρ – густина суміші, кг/м^3;

u_n - швидкість нормального поширювання полум'я, м/с.

Таким чином, u_m являє собою кількість суміші, що згоряє за одиницю часу на одиниці площі поверхні фронту полум'я.

Об'єм суміші, що згоряє за одиницю часу буде

$$V = u_n \cdot F, \quad м^3/с \ , \tag{10.3}$$

Де F– поверхня фронту полум'я, м^2 .

Для інтенсифікації спалювання горючої суміші слід збільшувати поверхню фронту полум'я. Це призводить до збільшення кількості суміші, що згоряє на поверхні фронту полум'я.

11 СПАЛЮВАННЯ ГАЗОПОДІБНОГО ПАЛИВА

11.1 Методи спалювання газів

Під спалюванням палива розуміють сукупність фізичних та хімічних процесів внаслідок яких відбувається змішування палива з повітрям, займання та стале горіння палива.

Газове паливо спалюють факельним методом.

Факел – це горюча струмина газу, що має геометричну форму.

Газові факели поділяють за наступними ознаками:

а) за способом утворення горючої суміші – кінетичний, дифузійний, проміжний;

б) у залежності від режиму руху – ламінарний та турбулентний;

в) за геометрією – вільний та обмежений факел;

г) за аеродинамічною схемою руху – зустрічний та супутній факел.

Розглянемо більш детально ці ознаки.

а) При спалюванні газів у повітряному потоці можливо горіння як попередньо підготовленої суміші, так і не перемішаних газу та повітря.

У першому випадку одержуємо кінетичний факел, у другому – дифузійний.

Можливий і проміжний варіант, коли здійснюється часткове перемішування газу з повітрям.

б) Режим руху газів визначається критерієм Re

$$Re = \frac{\omega \cdot l}{\vartheta} \qquad (11.1)$$

При $Re < 2300$ – режим ламінарний, $Re > 2300$ – турбулентний.

в) Якщо поперечні розміри топкового простору перевищують радіальні розміри факелу, то останній зветься вільним.

Але якщо стінки топки заважають розвитку факелу, то такий факел зветься обмеженим.

г) Факел, що формується у середовищі, яке рухається паралельно і в напрямку його руху, розуміють як супутній факел; зустрічний факел формується у середовищі, що рухається під кутом до напрямку його руху.

11.2 Кінетичний факел

Горіння попередньо підготовленої газоповітряної суміші відбувається внаслідок поширювання у ній полум'я. В залежності від режиму руху суміші розрізняють ламінарний і турбулентний факел.

Ламінарний факел можна одержати при направленні струменя суміші вертикально угору. Це робиться, щоб запобігти деформації (турбулізації) факелу внаслідок дії продуктів згорання.

При цьому горючий струмінь набуває форму конуса.

$$l_ф = \frac{WR}{u_n} \quad - \text{довжина факелу}$$

W– швидкість витікання суміші;

u_n– швидкість нормального поширювання полум'я.

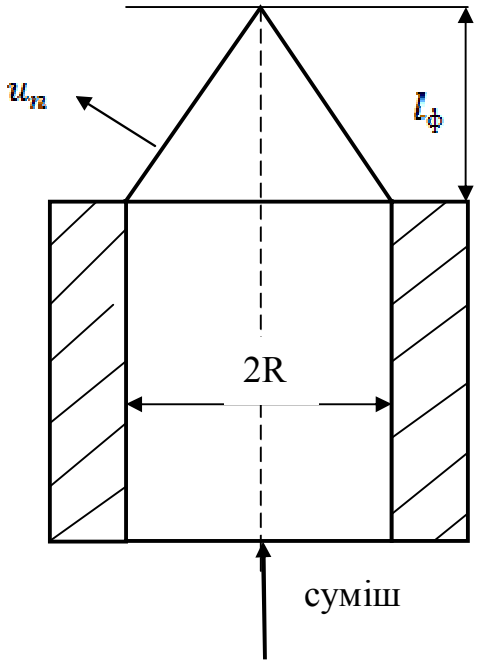

Рисунок 11.1 – Схема ламінарного кінетичного факелу

Спалювання підготовленої суміші протікає за наступною схемою: полум'я поширюється від периферії струменю до центру і одночасно зноситься потоком, внаслідок чого досягає осі струменя на деякій відстані від устя сопла, утворюючи конусоподібний факел.

Схема турбулентного кінетичного факелу наведена на рис.11.2

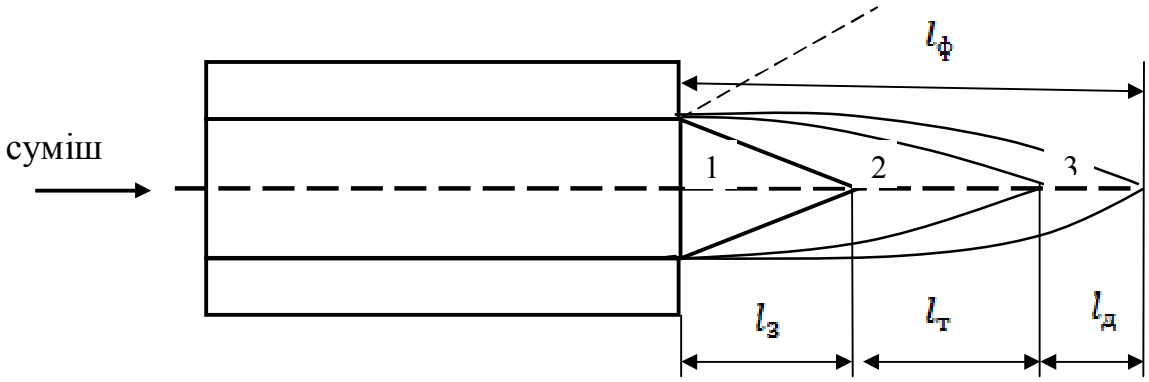

Рисунок 11.2 – Схема турбулентного кінетичного факелу

Тут можна виділити 3 зони: 1- зона займання, тобто та зона, де полум'я вперше досягає осі струменя; 2 – зона турбулентного горіння; 3 – зона догорян-ня.

$$l_ф = l_{з.з} + l_т + l_д$$

11.3 Дифузійний факел

У дифузійному факелі сумішоутворення і горіння протікають одночасно у реакційному об'ємі, тому швидкість вигорання будуть обмежувати саме проце-си утворення суміші. Дифузійний факел завжди має більшу довжину,ніж кіне-тичний. Але змінюючи інтенсивність сумішоутворення можна змінювати дов-жину факелу, що дуже важливо для технологічних процесів.

Ламінарний дифузійний факел можна одержати, якщо струмину газу на-правити з невеликою швидкістю (Re$\leqslant$2300) угору.

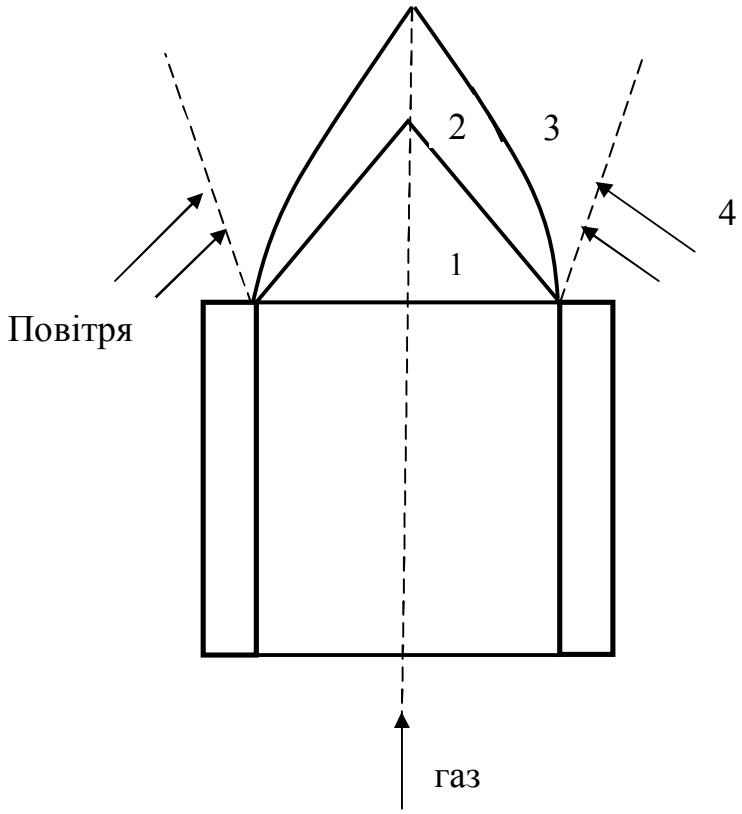

Рисунок 11.3 - Схема ламінарного факелу

Газ, що витікає із сопла за допомогою молекулярної дифузії змішується з киснем повітря, одержана горюча суміш при запалюванні утворює конусоподібний факел.

У структурі факелу можна виділити 4 зони:

1 зона – конус чистого газу; 2 – зона суміші газу з продуктами згорання; 3 – суміш повітря з продуктами згорання; 4 – зона повітря.

У ламінарному дифузійному факелі максимальна температура досягається у зоні горіння. Витікаючи із сопла газ до надходження у зону горіння нагрівається за рахунок теплоти, що поширюється шляхом теплопровідності, а також внаслідок дифузії продуктів згорання.

Інтенсивність дифузійного спалювання буде залежати від інтенсивності сумішоутворення.

Відомо, що масообмін у турбулентних потоках протікає більш інтенсивно, ніж у ламінарних, тому на практиці застосовують переважно турбулентний факел.

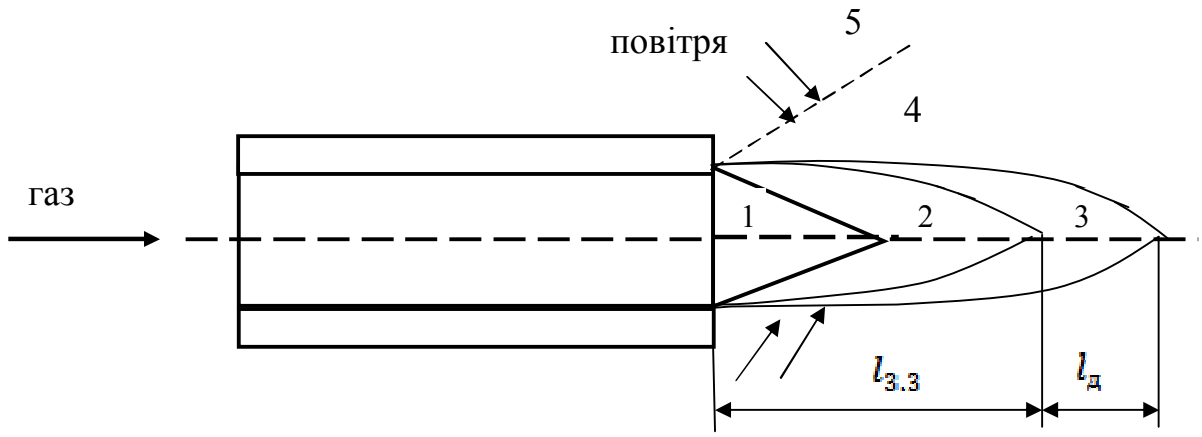

Рисунок 11.4 – Схема турбулентного дифузійного факелу

У структурі цього факелу можна виділити 5 зон:

1 – чистий газ; 2 – газ і продукти згорання; 3 - полум'я і продукти згорання; 4 – продукти згорання і повітря; 5 – повітря.

$l_ф = l_{з.з} + l_д$

де $l_{з.з}$ – довжина зони займання; $l_д$ – довжина зони догоряння.

12 КОНСТРУКЦІЇ І РОЗРАХУНОК ГАЗОВИХ ПАЛЬНИКІВ

12.1 Вимоги, що пред'являються до пальників. Класифікація пальників.

Пристрої, за допомогою яких спалюють газоподібне паливо, називають газовими пальниками.

Вимоги, що пред'являються до газових пальників :

1) Довжина факела, що створюється пальником, не повинне перевищувати довжини робочого простору печі.

2) Кладку промислових печей роблять з дорогих вогнетривких матеріалів. Зносостійкість кладки залежить від аеродинамічних властивостей факела. Якщо факел стикається з вогнетривкою кладкою, то кладка інтенсивно зношується і передчасно виходить з ладу. Крім того, в нагрівальних печах факел не повинен стикатися з виробами, що нагріваються. Контакт факела з металом може спричинити місцеве перегрівання або перепал металу, підвищене окалиноутворення і зневуглецювання.

3) Газові пальники мають бути прості по пристрою, недорогі при виготовленні, зручні в експлуатації, дозволяти регулювання теплової потужності в широких межах.

Класифікація пальників

Нині існує велика різноманітність конструкцій газових пальників.

Газові пальники класифікують за наступними ознаками:

1. За характером перемішування газу з повітрям (пальники з повним попереднім перемішуванням газу з повітрям; з частковим попереднім перемішуванням газу з повітрям; і пальники із зовнішнім перемішуванням газу з повітрям в процесі горіння).

2. За характером режиму руху газу (пальники ламінарні або турбулентні).

3. За величиною надмірного статичного тиску газу перед пальником (пальники низького тиску $P_и \leq 6$ кПа, пальники середнього тиску $P_и = 6 \div 80$ кПа і пальники високого тиску $P_и \geq 80$ кПа).

4. По роду стиснутого газу (пальники для спалювання доменного, коксового, природнього та ін. газів; газо - мазутні і пило - газові пальники).

5. За способом подання повітря, необхідного для горіння газу (пальники з поданням повітря окрім пальника і безпосередньо через пальник).

6. За способом організації руху повітряного потоку (пальники з примусовою подачею повітря за рахунок енергії компресії, що створюється вентилятором; пальники, в яких рух повітря створюється за рахунок кінетичної енергії самого газового струменя) і інші.

З великого числа ознак, по яких підрозділяють газові пальники, очевидно відібрати такі ознаки, які якнайповніше відбивають суть факельного процесу, а саме:

1. Факельні пальники з повним зовнішнім перемішуванням. У цих пальниках усе повітря, необхідний для горіння, зустрічається з газом поза пристроєм пальника. Змішення відбувається в топочному просторі.

2. Факельні пальники з частковим попереднім перемішуванням, де газ і частина повітря заздалегідь перемішуються один з одним до вильоту в топочний простір. А інше повітря, необхідне для повного спалювання газу, перемішується з пальним в топочному просторі в процесі горіння.

3. Пальники для безфакельного спалювання газів. В цьому випадку газ і усе повітря, необхідне для горіння, заздалегідь перемішується один з одним до вильоту в топочнтий простір.

12.2 Конструкції і розрахунок факельних пальників із зовнішнім перемішуванням

Факельні пальники із зовнішнім перемішуванням знаходять широке застосування. Їх використовують для спалювання газоподібного палива усіх видів.

12.2.1 Просте газове сопло.

Просте газове сопло круглого перерізу використовують як пальник, коли повітря, призначене для спалювання газу, підігрівають до високих температур і подають окремо - окрім пальника.

Сопла можуть бути циліндричними і конічними.

Достоїнства таких пальників - простота конструкції.

Недолік - досить велика довжина факела, оскільки повітря, що самостійно поступає, має дуже невелику швидкість.

Розрахунок газових сопел полягає у визначенні діаметру сопла і довжини факела по заданих статичному тиску газу перед пальником і витраті газу через сопло.

12.2.2 Розрахунок газових сопел низького тиску

Якщо тиск газу перед пальником такий, що щільність витікаючого газу не зазнає істотних змін, то пальники називають пальниками низького тиску. Таке допущення цілком прийнятно при значеннях швидкості витікання газу $\overline{\omega_г} \leq 0{,}4\,\overline{\omega_{кр}}$.

Розрахунок швидкості витікання газу виконують за допомогою рівняння Бернуллі для не стиснутого газу:

$$P_н + \frac{\overline{\omega_1^2}\,\rho}{2} = \frac{\overline{\omega_1^2}\,\rho_г}{2} + \sum h_{втр} \quad , \qquad (12.1)$$

де $P_н$ - надмірний статичний тиск газу перед пальником, н/м^2 ;

$\overline{\omega_1}$ - середня швидкість руху газу в патрубку, що підводиться, м/с;

$\overline{\omega_г}$- швидкість витікання газу з сопла, м/с;

$\sum h_{вт}$ - сума втрат статичного тиску газу в пальнику(втрати на тертя і втрати на місцеві опори, н/м^2).

$$\sum h_{пот} = \xi \frac{\omega_1^2 \rho}{2} = \xi \frac{d_0^4}{d_1^4} \cdot \frac{\omega_г^2 \rho_г}{2} \quad , н/м^2 \qquad (12.2)$$

де d_1 - діаметр патрубка, що підводиться, м;

ξ - коефіцієнт втрат статичного тиску в пальнику.

$$\xi = \xi_{м.с} + \mu\,{}^{l}\!/_{d} \tag{12.3}$$

де $\xi_{м.о}$ - коефіцієнт втрат на місцеві опори;

$\mu\,{}^{l}\!/_{d} = \xi_{т}$- коефіцієнт втрат на тертя.

За допомогою формул (12.2) і (12.3) рівняння (12.1) може бути перетворене таким чином:

$$\overline{\omega_{г}} = \sqrt{\frac{2P_{и}}{\rho_{г}\left[1+(\xi-1)\,{}^{d_0^4}\!/_{d_1^4}\right]}}\ \text{, м/с.} \tag{12.4}$$

Діаметр газового сопла дорівнює:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4G_{г}}{\pi\rho_{г}\overline{\omega}_{г}}}\ , \tag{12.5}$$

Якщо діаметр підводящого патрубка d_1 при конструюванні пальника вибирають таким, що $d_1/d_2 \geq 2$, і перехід з вузького до широкого досить округлий, то втратами статичного тиску в пальнику можна знехтувати, відчого формула (12.4) значно спрощується:

$$\overline{\omega_{г}} \approx \sqrt{\frac{2\,P_{и}}{\rho_{г}}}\ , \tag{12.6}$$

12.2.3 Розрахунок газових сопел середнього тиску

Коли швидкість витікання газу з сопла менша за критичну, але більше 0,4 $\omega_{кр}$, то при розрахунку сопел доводиться враховувати зміну щільності газу при витіканні. Сопла, які роблять на такому режимі, називають соплами середнього тиску. Статичний тиск газу перед пальниками цього типу змінюється приблизно від 600-700 кг/м^2, т.б. ($P_{и} = 10 \div 80$ кн/м^2).

Швидкість витікання газу з сопла визначають по рівнянню

$$\omega_г = \sqrt{2\frac{к}{к-1}RT_{нач}\left[1-(\frac{P_{окр}}{P_{нач}})^{\frac{к-1}{к}}\right]}\ , \qquad (12.7)$$

де $P_{окр}$- тиск у навколишньому середовищі, куди витікає газ, н/м^2 ;

к - показник адіабати ($к = \frac{C_p}{C_\vartheta}$)

(значення показника адіабати для різних газів залежно від температури приведені в таблиці 57 [1]).

Критична швидкість витікання

$$\omega_{кр} = \sqrt{2\frac{к}{к-1}RT_{нач}} \qquad (12.8)$$

Мінімальне значення початкового тиску, при якому досягається критичний стан, визначається за виразом:

$$\frac{P_{нач}}{P_{окр}} = \varepsilon = (\frac{2}{к+1})^{\frac{к}{к-1}} \qquad (12.9)$$

Значення ε для різних газів коливається в межах ε=1,7÷1,9 . Дозвукові швидкості витікання газів визначають при значенні початкового тиску

$$P_н < \varepsilon P_{окр} < (1{,}7 \div 1{,}9)P_{окр}$$

Відношення швидкості витікання газу до критичної швидкості називається критерієм швидкості витікання

$$\lambda = \frac{\omega}{\omega_{кр}} \qquad (12.10)$$

При адіабатичному процесі критерій λ обчислюється за формулою

$$\lambda^2 = \frac{к+1}{к-1}\left[1-(\frac{P}{P_{нач}})^{\frac{к-1}{к}}\right]\ , \qquad (12.11)$$

де P - статичний тиск в струмені витікаючого газу на зрізі сопла. При дозвукових швидкостях витікання цей тиск дорівнює тиску в навколишньому середовищі.

$P = P_{окр}$, якщо $\lambda < 1$.

Абсолютна температура і щільність витікаючого газу в усті сопла пов'язані з критерієм швидкості витікання з формули:

$$\frac{T}{T_н} = 1 - \frac{к-1}{к+1}\lambda^2 \quad ; \qquad \rho_н = \frac{P_{окр}}{R \cdot T_{нач}} \tag{12.12}$$

$$\frac{\rho}{\rho_н} = (1 - \frac{к-1}{к+1}\lambda^2)^{\frac{1}{к-1}} = \frac{1}{1 - \frac{к-1}{к+1}\lambda^2} \tag{12.13}$$

За рівняннями (12.7) - (12.13) можна робити розрахунок процесу витікання.

12.2.4 Розрахунок газового сопла високого тиску

Коли газ витікає під тиском більшим або рівним критичному ($P_н \geq P^0_{кр}$), то пальники називають пальниками високого тиску.

Розрахунок швидкості витікання газу в цьому випадку роблять по формулі

$$\omega_{кр} = \sqrt{2\frac{к}{к+1}RT_{нач}} \; ; \qquad R = \frac{8314}{\mu} \tag{12.14}$$

Щільність витікаючого газу обчислюють по рівнянню

$$\rho_г = \frac{P_{кр}}{R \cdot T_{нач}} \cdot \frac{к+1}{2} \quad , \tag{12.15}$$

де $P_{кр} = P_{нач} \left(\frac{2}{к+1}\right)^{\frac{к}{к-1}}$

Мінімальний статичний тиск $P^0_{кр}$ перед соплом, при якому виникає критична швидкість

$$P^0_{кр} = \frac{P_{окр}}{\left(\frac{2}{к+1}\right)^{\frac{к}{к-1}}} \tag{12.16}$$

Діаметр газового сопла

$$d_0 = \sqrt{\frac{4G_г}{\pi\rho_г\bar{\omega}_г}} \quad , \tag{12.17}$$

Приклад 1. Витрата природного газу через сопло $G_г$=545 кг/год= 0,151 кг/с, температура газу $t_г$ =20 ^{0}C; газова постійна R=475 нм/кгК; показник ступеню адіабати *K* =1,3. Вимагається визначити діаметр сопла, якщо надмірний тиск газу перед пальником $P_н$ = 4070 н/м^2. Тиск в навколишньому середовищі Рн.с = 99,2 кн/м^2 .

Щільність газу при $P_н$ = 4070 н/м^2 :

$$\rho_г = \frac{P_н}{R \cdot T_{поч}} = \frac{(99{,}2 + 4{,}070) \cdot 10^3}{475 \cdot 293} = 0{,}74 \text{ кг/м}^3$$

Швидкість витікання газу по спрощеній формулі

$$\overline{\omega_г} = \sqrt{\frac{2P_н}{\rho_г}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 4070}{0{,}74}} = 105 \text{ м/с}.$$

Діаметр газового сопла

$$d_0 = \sqrt{\frac{4G_г}{\pi \rho_г \overline{\omega}_г}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0{,}151}{3{,}14 \cdot 0{,}74 \cdot 105}} = 0{,}05 \text{ м}.$$

Приклад 2. Для умов попереднього прикладу розрахувати газове сопло на витрату газу $G_г$ =2100 кг/год = 0,583 кг/с при статичному тиску газу перед пальником $P_н$ = 167 кн/м^2, якщо $P_{н.с}$ = 100 кн/м^2 .

Швидкість витікання газу

$$\overline{\omega_г} = \sqrt{2\frac{к}{к-1}RT_{нач}\left[1 - \left(\frac{P_{н.с}}{P_{нач}}\right)^{\frac{к-1}{к}}\right]} =$$

$$= \sqrt{2\frac{1{,}3}{1{,}3-1} \cdot 475 \cdot 293\left[1 - \left(\frac{100}{167}\right)^{\frac{1{,}3-1}{1{,}3}}\right]} = 368 \text{ м/с}.$$

Критична швидкість витікання

$$\omega_{кр} = \sqrt{2\frac{к}{к+1}RT_{нач}} = \sqrt{2\frac{1{,}3}{1{,}3+1}475 \cdot 293} = 396 \text{ м/с}.$$

Коефіцієнт швидкості

$$\lambda = \frac{\omega}{\omega_{кр}} = \frac{368}{396} = 0{,}93$$

Густина витікаючого газу

$$\rho_г = \rho_н \frac{1}{1 - \frac{к-1}{к+1}\lambda^2} = \frac{P_{н.с}}{R \cdot T_н} \cdot \frac{1}{1 - (\frac{к-1}{к+1})\lambda^2} =$$

$$= \frac{100 \cdot 10^3}{475 \cdot 293} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{1{,}3-1}{1{,}3+1}\right) \cdot 0{,}93^2} = 0{,}811 \text{ кг/м}^3$$

Діаметр газового сопла

$$d_0 = \sqrt{\frac{4G_г}{\pi \rho_г \bar{\omega}_г}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0{,}583}{3{,}14 \cdot 0{,}811 \cdot 368}} = 0{,}05 \text{ м}.$$

Приклад 3. Розрахувати газове сопло для спалювання природнього газу в умовах попереднього прикладу, поклавши статичний тиск газу перед пальником $P_н = 400$ кн/м^2 .

Мінімальний статичний тиск перед соплом, при якому виникає критична швидкість

$$P^0_{кр} = \frac{P_{окр}}{(\frac{2}{к+1})^{\frac{к}{к-1}}} = \frac{100}{(\frac{2}{1{,}3+1})^{\frac{1{,}3}{1{,}3-1}}} = 183 \text{ кн/м}^2 < 400 \text{ кн/м}^2$$

Статичний тиск в струмені витікаючого газу на зрізі сопла

$$P_{пр} = P_н (\frac{2}{1{,}3+1})^{\frac{1{,}3}{1{,}3-1}} = 400 \cdot 0{,}546 = 218 \text{ кн/м}^2$$

Густина витікаючого газу

$$\rho_г = \frac{P_{пр}}{R \cdot T_{поч}} \cdot \frac{к+1}{2} = \frac{218 \cdot 10^3}{475 \cdot 293} \cdot \frac{(1{,}3+1)}{2} = 1{,}801 \text{ кг/м}^3$$

При $G_г = 0{,}583$ кг/с и $\omega_г = \omega_{кр} = 396$ м/с:

Діаметр сопла

$$d_0 = \sqrt{\frac{4G_г}{\pi \rho \ \omega_{кр}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0{,}583}{3{,}14 \cdot 1{,}801 \cdot 396}} = 0{,}032 \text{ м}.$$

12.2.5 Пальники типу «труба в трубі»

Пристрій такого пальника показан на рис 12.1

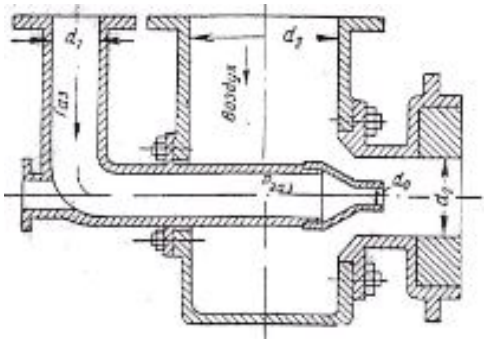

Рисунок 12.1 – Схема пальника типу «Труба в трубі»

По внутрішній трубі діаметром d_1 подається газ, який потім через сопло діаметром d_0 викидається в робочий простір печі. Повітря, необхідне для спалювання газу, подається по кільцевому проміжку між зовнішньою і внутрішньою трубами.

Пальники, як правило, працюють на низькому і середньому тиску газу. Тиск газу перед пальником зазвичай не перевищує 3,0 - 5,0 кн/м^2 .

При конструюванні пальників типу "труба в трубі" визначається діаметр сопла d_0 за приведеною раніше методикою. Діаметр внутрішньої труби d_1 вибирається з конструктивних міркувань так, щоб дотримувалася умова $d_1/ d_0 = 2 \div 3$. Діаметр зовнішньої труби d_2 розраховується з урахуванням витрати повітря і швидкості його витікання. Зазвичай швидкість витікання повітря для пальників низького тиску приймається $\omega_в = (0{,}5 \div 1{,}0)\, \omega_т$; для пальників середнього тиску $\omega_в = (0{,}2 \div 0{,}4)\, \omega_т$.

Пальники цього типу дуже прості по конструкції і зручні в експлуатації.

Основні недоліки їх полягають в наступному:

1) повітря, необхідне для горіння підігрівається до температури не вище 400 ^{0}С. Більш високе підігрівання вимагає застосування спеціальних матеріалів для виготовлення пальників.

2) витрата газу через пальники обмежуються заданою довжиною факела. При великому діаметрі сопла довжина факела може бути більше довжини робочого простору печі, що небажано.

Для зменшення довжини факела пальників а отже, для збільшення їх продуктивності можна використати:

а) більш високу швидкість витікання повітря;

б) підігрівання газу перед спалюванням до 300 - 400 ^{0}C.

Розрахунок пальників роблять точно так, як і простого газового сопла.

12.2.6 Багатосоплові пальники

Заміна одного крупнокаліберного сопла декількома дрібнішими соплами, сумарна площа перерізу яких дорівнює площі перерізу одного вкрупнокаліберного сопла, дозволяє спалювати газ в одній і тій же кількості на коротшому шляху. Це положення є принциповою особливістю, багатосоплових пальників.

Цей пальник по своєму виду нагадує пальник типу "труба в трубі". По внутрішній трубці, маючий наконечник з шістьма соплами, поступає газ. Повітря надходить нормально до осі пальника, і рухається до місця виходу по проміжку між корпусом пальника і газовою трубкою.

Перед зустріччю з газом повітря проходить через направляючий завихрювач, який дробить повітряний потік на окремі струмені, надає цим струменям спіральний напрям і створює рівномірний розподіл повітря відносно осі газової трубки.

Отвори шести газових сопел зроблені під кутом в напрямі від осі пальника. Це полегшує перемішування газу з повітрям. Такий пальник створює коротший факел, ніж пальник типу "труба в трубі".

Багатосоплові пальники можуть бути використані для спалювання усіх видів газоподібного палива. Вони можуть працювати на низькому, середньому і високому тиску газу.

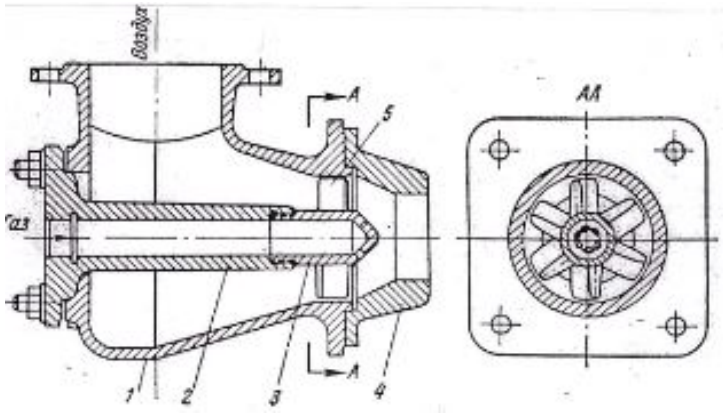

Рисунок 12.2 – Схема багатосоплового пальника

12.3 Пальники з частковим попереднім перемішуванням газу з повітрям

Попереднє перемішування газу з повітрям здійснюють двома способами:
1) газ і повітря перемішують поза пальником за допомогою спеціальних пристроїв змішувачів; до пальника підводять готову суміш;
2) газ і повітря перемішують безпосередньо усередині самого пальника.

Перший спосіб перемішування вимагає спеціальної апаратури і особливих заходів по техніці безпеки, що значною мірою ускладнює і здорожує виробництво. Тому цей спосіб застосовують рідко.

Найпростіше, зручно і дешево перемішувати газ і повітря за допомогою самих газопальникових пристроїв.

Пальники з частковим попереднім перемішуванням газу з повітрям можна підрозділити на дві групи:

1) пальники з примусовим поданням повітря за рахунок енергії компресії, що створюється вентиляторами або іншими повітродувними пристроями;

2) пальники з інжекцією первинного повітря і примусовим поданням вторинного повітря.

Ці типи пальників відрізняються один від одного як за принципом роботи, так і по конструктивному оформленню.

12.3.1 Пальники з примусовою подачею повітря

Простим пальником з частковим попереднім перемішуванням газу з повітрям може служити пальник типу "труба в трубі". Для цієї мети змішувач пальника роблять у багато разів довше, ніж це показано на рис.12.3.

Такі конструкції пальників прості за конструкцією. Але при спалюванні висококалорійних газів продольні розміри їх можуть бути дуже значними, що є істотним недоліком цих конструкцій.

Щоб зменшити довжину змішувача, пальники такого типу роблять з тангенціальним підведенням повітря, як показано на рис.12.3. Тут повітря за допомогою спіралеподібного корпусу набуває спіралеподібний рух і, зустрічаючись з газовим струменем, інтенсивно перемішується з газом усередині корпусу пальника до входу струменя в змішувач. В результаті змішувач можна виконувати коротшим, чому довжина пальника зменшується.

12.3.2 Пальники з інжекцією первинного повітря і примусовим поданням вторинного повітря

На рис. 12.3 показаний комбінований пальник, що складається з поміщеного в торці інжекційного пальника і пальника типу " труба в трубі", встановленій безпосередньо перед піччю. Первинне повітря потрапляє в пальник завдяки інжекційній дії газового струменя. Зустрічне повітря підводиться від вентилятора до пальника типу " труба в трубі". Змінюючи подачу первинного і вторинного повітря, можна регулювати довжину факела.

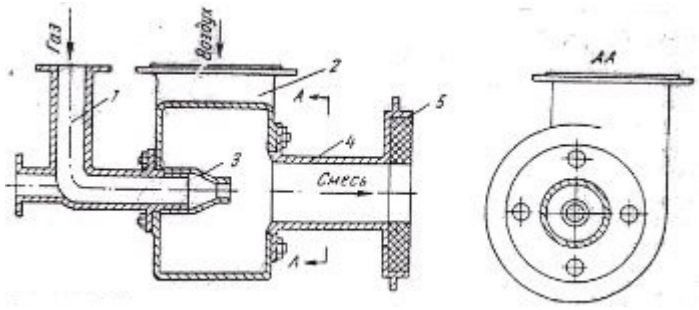

Рисунок 12.3 – Схема пальника із частковим попереднім перемішуванням газу з повітрям

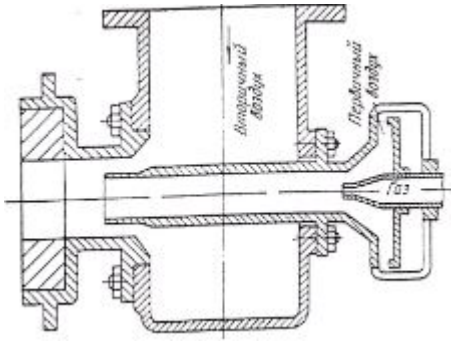

Рисунок 12.4 – Схема пальника з інжекцією первинного повітря і примусовим поданням вторинного повітря

12.4 Конструкції і розрахунок пальників з повним попереднім перемішуванням газу з повітрям

Ці пальники підрозділяють на дві групи:

1) пальники з примусовим поданням повітря вентилятором;

2) інжекційні пальники.

12.4.1 Пальників з примусовою подачею повітря

На рис. 12.5 показаний пальник конструкції ВНІІМТ для безполуменевого спалювання низькокалорійних газів. Цей пальник складається з двох основних частин: змішувача, для попереднього перемішування газу з повітрям, і тунеля, в якому відбувається згорання газоповітряної суміші.

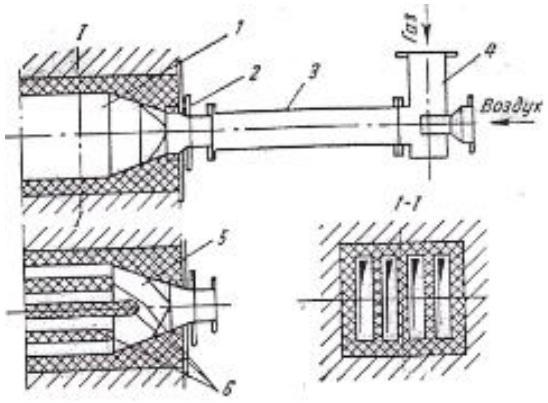

Рисунок 12.5 – Схема пальника конструкції ВНІІМТ для безполум'яного спалювання низькокалорійних газів

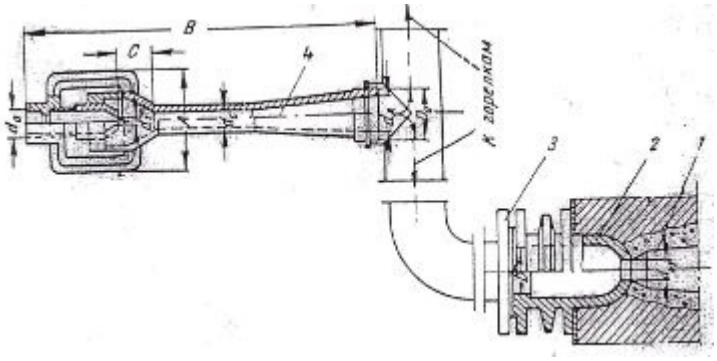

Рисунок 12.6 - Схема тунельного інжекційного пальника

Змішувач складається з корпусу і камери змішувача у вигляді прямої труби круглого або прямокутного перерізу.

Тунель є рядом вузьких каналів, викладених з вогнетривкої цеглини. Частина тунелю, що розширюється, - камера призначена для забезпечення рів-

номірного розподілу газоповітряної суміші по окремих каналах. У цій камері створюються зони завихрювання, що є джерелом запалу суміші. Тунелі викладають в масиві стін топкової камери.

Газоповітряну суміш вводять в тунель через охолоджувану водою фурму. Живий переріз фурми роблять дещо менше перерізу труби змішувача для забезпечення в нім досить великих швидкостей вдування газоповітряної суміші і рівномірного їх розподілу по перерізу для запобігання проскоку полум'я з каналів тунелю в пристрій змішувача.

Застосування водяного охолодження фурми переслідує ту ж мету.

12.4.2 Робота і розрахунок інжекційних пальників

Інжекційні пальники бувають з дифузорами і без дифузорів. Схема інжекційного пальника з дифузором представлена на мал.

Вона складається з сопла з робочим газом 1, повітропідводящої мережі 3, труби змішувача 4, дифузора 5 і направляючого наконечника 6. Для центрування газового сопла 1 є упори 2.

При спалюванні газу за рахунок холодного атмосферного повітря повітропідводяща мережа відсутня. Необхідність у повітропідводящій мережі виникає у тому випадку, коли повітря підігрівається в рекуператорах.

Робота пальника зводиться до здійснення наступних завдань :

1) Робочий струмінь газу повинне захопити певну кількість повітря, необхідне для спалювання ($G_2 = \vartheta_2 \rho_2$, кг/с), т.д. забезпечити необхідну кратність інжекції ($\varphi = G_2/G_1$), для чого в змішувач має бути відповідне розрідження

$$\Delta P_0 = P_1 - P_2,$$

де P_1 – тиск газу, що поступає;

$G_1 = \vartheta_1 \rho_1$, кг/с – витрата газу.

2. Необхідно перемішати газ з повітрям в межах пальника. Для чого потрібна певна довжина змішувача ($l_{см}$).

3. Слід забезпечити викид газоповітряної суміші в робочий простір печі із заданою швидкістю (ω_5), яка повинна перевищувати швидкість поширення полум'я щоб уникнути проскакування полум'я в корпус пальника.

4. Вимагається підвищити компресію суміші газів від тиску P_2в змішувачі P_5 в печі.

5. Здолати аеродинамічний опір усередині пальника.

Кінетична енергія газу на виході з сопла $E_1 = \frac{G_1 \cdot \omega_1^2}{2}$, кг/с. витрачається на

1) компресію повітря в пальнику $\vartheta_2(P_5 - P_0)$ нм/с;

2) компресію газу в пальнику $\vartheta_1(P_5 - P_2)$ нм/с;

3) створення кінетичної енергії суміші газу з повітрям при виході в робочий простір печі

$$\frac{G_1+G_2}{2} \cdot \omega_5^2 ; \text{ нм/с;}$$

4) подолання втрат;

а) на вхід повітря в змішувач $K_1 \frac{G_1+\omega_2^2}{2}$, нм/с;

б) на удар і тертя в змішувачі

$$G_1 \frac{(\omega_1+\omega_2)^2}{2} + G_2 \frac{(\omega_3+\omega_2)^2}{2} + \mu \frac{l_3}{d_3} \frac{G_1+G_2}{2} \cdot \omega_3^2 \text{ , нм/с.}$$

де μ - коефіцієнт втрат на тертя;

l_3, d_3- довжина і діаметр змішувача.

в) втрати в дифузорі і наконечнику пальника

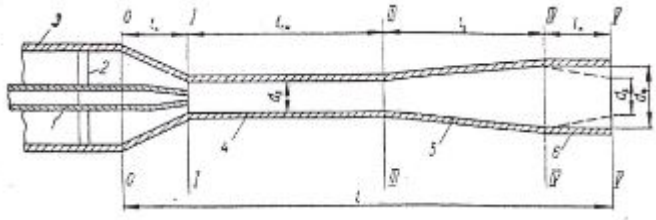

Рисунок 12.7 - Схема інжекційного пальника з дифузором

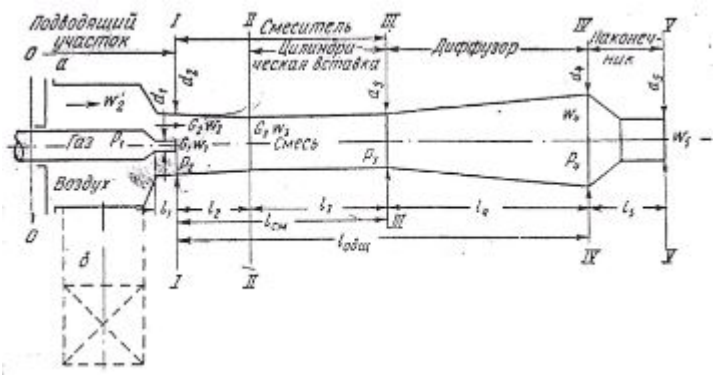

Рисунок 12.7а - Схема інжекційного пальника з дифузором

$$(1-\eta_д)\frac{G_1+G_2}{2}\left(\omega_3^2+\omega_4^2\right)+K_2\frac{G_1+G_2}{2}\left(\omega_5^2+\omega_4^2\right);$$

де $\eta_д$ – к.к.д. диффузора;

K_2 – коефіцієнт втрат при вході газоповітряної суміші в наконечник пальника.

Прирівнюючи прихід витрат, отримаємо рівняння енергетичного балансу пальника з дифузором, вирішуючи яке можна визначити необхідну швидкість витікання газу (ω_1).

Найбільш поширеним типом інжекційних пальників є тунельні, рис. , які складаються з трьох основних частин: інжекційного змішувача, головки, пальника і тунелю.

Процес горіння заздалегідь підготовленої газоповітряної суміші практично закінчується в межах тунеля і в робочий простір печі виходять вже продукти повного згорання.

Розпалені стіни тунеля є стабілізатором полум'я, що забезпечує стійке горіння.

В цілях зменшення довжини інжекційних пальників великої продуктивності доцільне застосування пальників, забезпечених не одним соплом великого діаметру, а декількома соплами меншого діаметру.

Облаштування такого пальника (багатосоплової) представлене на рис.12.8 . Такий пальник забезпечує велику теплову потужність при короткому факелі.

На рис. 12.9 показаний панельний пальник з інжекційними змішувачами. Газоповітряна суміш поступає зі змішувача 5 в розподільну камеру 3, з якої по трубках 2 розподіляється по тунелях 1, де і згорає. Тунелі влаштовані в керамічних призмах 4, що надіваються на трубки.

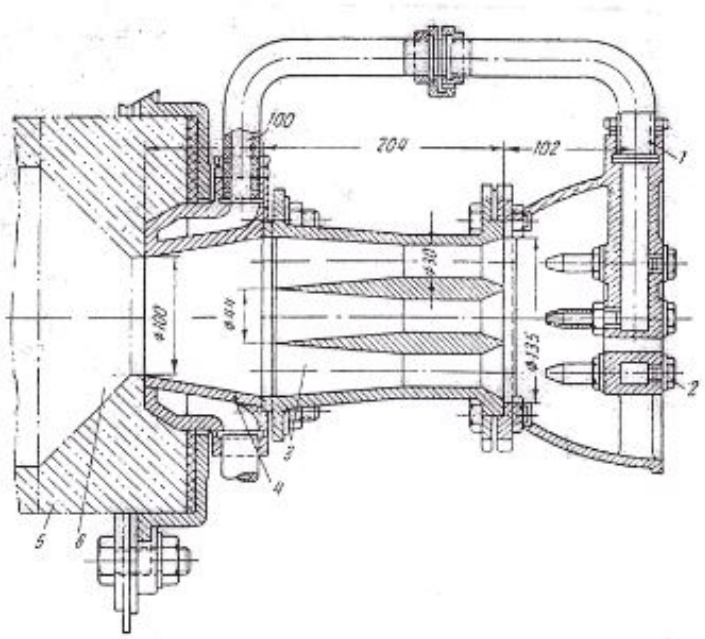

Рисунок 12.8 – Схема багатосоплового інжекційного пальника конструкції ЗІЛ з індивідуальним змішувачем

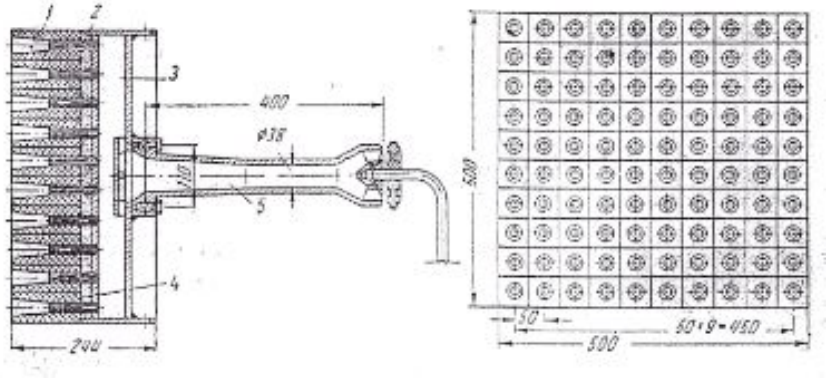

Рисунок 12.9 - Схема панельного інжекційного пальник

13 СПАЛЮВАННЯ РІДКОГО ПАЛИВА

13.1 Фізичні властивості рідкого палива

Найпоширенішим видом рідкого палива є мазут, що виходить як залишок при переробці нафти. Мазут підрозділяється на 5 марок - 20, 40, 60, 80, 100. В якості рідкого палива використовують також різні смоли і олії.

Важливими фізичними властивостями рідких палив є: щільність, в'язкість, поверхневе натягнення, температура спалаху і займання, температура застигання, теплоємність, теплопровідність і теплота плавлення.

Густина палива зазвичай визначають при температурі t=20^{0}C. Розрахунок густини палива при інших температурах роблять по формулі:

$$\rho_t = \frac{\rho_{20}}{1+\beta(t-20)} \text{ ,кг/м}^3 \qquad (13.1)$$

де β - коефіцієнт об'ємного розширення палива, 1/град.

Густина мазуту і смол залежно від їх складу змінюється від 960 до 1200 кг/м^3.

В'язкість в технічній системі одиниць вимірюється в [η, кг · сек/м^2] чи (ϑ , м^2/с).

Поверхневе натягнення. Сила поверхневого натягнення виникає в результаті зчеплення між поверхневими молекулами рідини. Поверхневе натягнення створює опір силам, які прагнуть змінити величину поверхні рідини. Тому чим більше коефіцієнта поверхневого натягнення рідини, тим важче цю рідину розпорошити. Значення коефіцієнтів поверхневого натягнення мазуту і смол при t=20 ÷ 80 ^{0}C складає близько 0,035 ÷ 0,025 нм/м^2.

Температура спалаху і займання. Температура спалаху мазуту і смол змінюється в межах від 70 до 150 ^{0}C. Чим важче паливо, тим вище температура спалаху. Температура займання мазуту і смол в середньому дорівнює 500 ÷ 600 ^{0}C. Температура підігрівання мазуту і смол має бути на 15 ÷ 20 ^{0}C менше температури спалаху.

Температура застигання. Температура застигання мазуту рівна 5 ÷ 25 ^{0}С, смол 25 ÷ 35 ^{0}С.

Мазут і смоли при охолодженні до температур, близьких до температур застигання, втрачають свою рідкотекучість, що затрудняє їх транспортування і розпилювання у форсунках.

Теплоємність, теплопровідність і теплота плавлення. Середня теплоємність мазуту при t = 20 ÷ 100 ^{0}С складає 2,0 ÷ 2,3 кДж/кг.

Теплопровідність мазуту і смол λ = 0,4 ÷ 0,6 Вт/мК. Теплота плавлення мазуту q= 168 ÷ 250 кДж/кг, а смол 210 ÷ 290 кДж/кг.

13.2 Розприскування палива

Рідке паливо перед спалюванням піддають розприскуванню. Розмір крапельок палива, вступаючих в контакт з киснем повітря, робить вирішальний вплив на хід факельного процесу.

Розприскування рідкого палива роблять за допомогою спеціальних пристроїв, що називаються форсунками. За способом розприскування форсунки підрозділяють на механічні, пароповітряні високого тиску і повітряні (вентиляторні) низького тиску.

Механічними називають форсунки, в яких паливо, проходячи під великим тиском через невеликі отвори, набувають значну швидкість і піддаються дробленню без участі стороннього розпилювача. Необхідне для горіння повітря подають поза форсункою дуттьовим вентилятором. Тонкість розприскування в цих форсунках залежить від величини тиску палива перед форсункою. Для отримання тонкого розприскування потрібний тиски вище 20 ат. При малих тисках розприскування виходить грубим з діаметром крапель 0,4÷ 1 мм. При таких розмірах крапель повністю спалити паливо в межах робочого простору дуже важко. Тому механічні форсунки не застосовують для опалювання промислових печей.

У пароповітряних і повітряних форсунках те, що розприскування палива відбувається в результаті взаємодії розпилювача і палива, що рухаються з різними швидкостями. В якості розпилювачів застосовують водяну пару або повітря. Основним джерелом енергії для дроблення рідкого струменя є кінетична енергія розпилювача. Розприскування виходить тоншим, ніж в механічних форсунках.

Пароповітряні і вентилятори форсунки широко застосовують для спалювання рідкого палива в мартенівських, методичних і інших печах.

У форсунках низького тиску в якості розпилювача використовують усе повітря, необхідне для горіння. Його подають за допомогою вентилятора під тиском 500 ÷ 1000 мм.вод.ст., що забезпечує швидкість витікання 80 - 100 м/хв.

У форсунках високого тиску розприскувач повітря або пар, подають в невеликих кількостях, але з великою швидкістю (300 ÷ 500 м/с) для повітря і пари 500 - 1000 м/с. Тиск пари перед форсункою складає 1 ÷ 1,5 Мн/м^2 (10 ÷15ат) . Мазут зазвичай витікає із швидкістю ≤ 10 м/с. Усе повітря, необхідне для горіння, подають в топочний простір окрім форсунки. Витрата розпилювача на 1 кг палива складає 0,5 ÷ 1.0 кг/кг. Менша цифра відповідає пару, велика компресорному повітрю.

13.3. Конструкції і розрахунок форсунок низького тиску

Форсунки роблять з розпилюванням усередині форсунки (у змішувачі) і з зовнішнім розпилюванням. Форсунка простої конструкції показана на рис.13. 1. Паливо підводять за допомогою внутрішньої трубки 1. Повітря поступає в корпус форсунки через патрубок 2 і зустрічається з паливом перед вильотом з форсунки.

Розприскуване паливо поступає в піч через отвір, розширюється у бік робочого простору печі. Статичний тиск повітря перед форсункою складає близько 5 кн/м^2 (500 мм.вод.ст.), що забезпечує швидкість витікання повітря 70÷ 80 м/с.

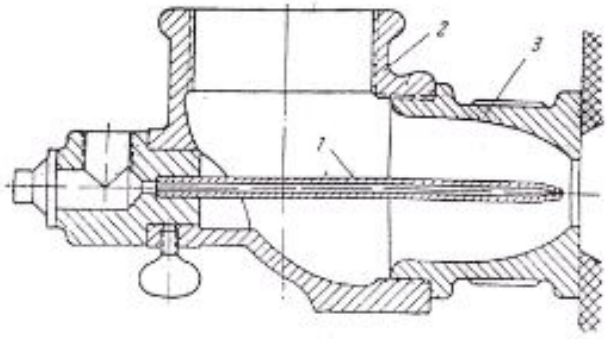

Рисунок 13.1 - Схема мазутної форсунки низького тиску

Форсунки такого типу дуже прості по конструкції і досить надійні в експлуатації. Основний недолік їх полягає в тому, що при зменшенні витрат палива і повітря швидкість витікання повітря внаслідок постійності перерізу для його проходу зменшується, від чого якість розприскування палива погіршується.

Регулювання подання палива і повітря здійснюється за допомогою спеціальних вентилів і дроселів, що призводить до втрати значної частини тиску на дроселювання. Нормальна робота форсунки виходить при повній продуктивності.

13.4 Конструкції і розрахунок форсунок високого тиску

Приклади форсунок високого тиску типу ДМетІ і УПІ показано на рис.

У форсунці ДМетІ мазут підводиться по внутрішній трубі, а розпилювач перед зустріччю з мазутом проходить через сопло Лаваля, плавне розширення якого забезпечується конусністю мазутного наконечника.

У форсунці УПІ розпилювач підводиться по внутрішній трубці, який закінчується соплом Лаваля. Мазут поступає по зовнішній трубці і проникає на сторону розпилювача через спеціальні отвори, які є у кінці сопла Лаваля. Обидві форсунки мають змішувачі, що плавно розширюються, і закінчуються направляючими циліндричними наконечниками.

Для хорошої роботи форсунок ДМетІ і УПІ рекомендується застосовувати наступні параметри розпилювачів :

Тиск повітря 600 ÷ 700 нм/м^2 з температурою 250 ÷ 300 ^{0}С. Продуктивність форсунок високого тиску на відміну від форсунок низького тиску розраховують з урахуванням зміни щільності витікаючого розпилювача. При розрахунку використовуються формули адіабатичного витікання газів.

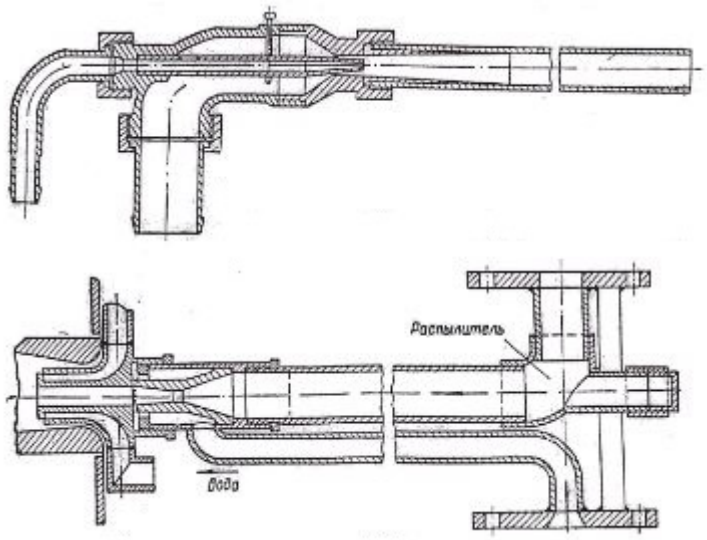

Рисунок 13.2 - Форсунки високого тиску ДМетІ і УПІ

Приклад.

Продуктивність форсунки $G_м$=2000 кг/год(0,55 кг/с); питома витрата повітря φ = 1 кг/кг; тиск і температура повітря $P_{поч}$ = 588 кн/м^2(6 ата), $t_{поч}$ = 20 ^{0}С; тип форсунки : ДМеТІ; статичний тиск розпилювача у кінці сопла Лаваля Р =98,1 кн/м^2 (1 ата). Газова постійна і показник міри адіабати повітря R = 288 Джоулів/кгК; k = 1,40.

Критична швидкість витікання газу

$$\omega_{кр}=\sqrt{2\frac{k}{k+1}RT_н}=\sqrt{2\frac{1.4}{1.4+1}288\cdot 293}=314 \text{ м/с.}$$

Критичний тиск

$$P_{кр}= P_{поч}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = 588\left(\frac{2}{1,4+1}\right)^{\frac{1,4}{1,4-1}} = 588 \cdot 0,528=311 \text{ кн/м}^2.$$

Критична температура повітря

$$T_{кр}= T_{поч}\frac{2}{k+1} = 293\frac{2}{1,4+1} = 293 \cdot 0,833 = 244 \text{ К}.$$

Густина повітря у критичному перерізі

$$\rho_{кр} = \frac{P_{кр}}{R \cdot T_{кр}} = \frac{311000}{288 \cdot 244} = 4,45 \text{ кг/м}^3.$$

Площа критичного перерізу сопла Лаваля

$$F= \frac{G_{п}}{\omega_{кр} \cdot \rho_{кр}} = \frac{0,55}{314 \cdot 4,45} = 398 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

2. Параметри повітря у кінці сопла Лаваля :

Коефіцієнт швидкості

$$\lambda^2= \frac{k+1}{k-1}\left[1 - \left(\frac{P}{P_{поч}}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right] = \frac{1,4+1}{1,4-1}\left[1 - \left(\frac{98,1}{588}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}}\right] = 2,4 ;$$

тоді λ=1,55;

- швидкість повітря

$$\omega_2= \lambda \cdot \omega_{кр} = 1,55 \cdot 314 = 485 \text{ м/с};$$

- температура повітря

$$T_2 = T_{поч}\left(1 - \frac{k-1}{k+1}\lambda^2\right) = 293\left(1 - \frac{1,4-1}{1,4+1}2,4\right) = 176 \text{ К};$$

- густина повітря у кінці сопла Лаваля

$$\rho_2 = \frac{P}{R \cdot T_2} = \frac{98100}{288 \cdot 176} = 1,94 \text{ кг/м}^3.$$

3. Площу поперечного перерізу сопла Лаваля обчислюють з виразу (переріз II - II)

$$\frac{F_2}{F_{кр}} = \frac{1}{\lambda}\left[\frac{\frac{2}{k+1}}{1 - \frac{k-1}{k+1}\lambda^2}\right]^{\frac{1}{k-1}} = \frac{1}{1,55}\left[\frac{\frac{2}{1,4+1}}{1 - \frac{1,4-1}{1,4+1}2,4}\right]^{\frac{1}{1,4-1}} = 1,49$$

Тоді F_2= 1,49 $F_{кр}$ = 1,49 ·398=593 мм^2.

Перевірка правильності розрахунку по заданій витраті повітря ($G_п$= 0,555 кг/с)

$$G_п = \omega_2 \cdot \rho_2 = 485 \cdot 593 \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}94 = 0{,}557 \text{ кг/с}.$$

4. Для розрахунку діаметру мазутного наконечника приймаємо швидкість витікання мазуту $\omega_к$=7 м/с (обычно $\omega_к$= 5 ÷ 10 м/с), густина мазута $\rho_м$=1000 кг/м^3 .

Тоді

$$F_к = \frac{G_м}{\omega_к} = \frac{0{,}555 \cdot 10^{-3}}{7} = 79{,}2 \text{ мм}$$

і

$$d_к = \sqrt{\frac{4}{\pi} F_к} = \sqrt{\frac{4}{3{,}14} 79{,}2} = 10 \text{ мм}.$$

2.5 Газомазутні пальники

Газомазутні пальники зазвичай є комбінацією форсунок високого тиску з газовими пальниками. Залежно від тиску газу газомазутні пальники можуть бути високого і низького тиску.

Необхідність в газомазутних пальниках обумовлюється або недоліком газу на заводі, внаслідок чого теплову потужність газових пальників доводиться збільшувати за рахунок підведення мазуту, або потребою в посиленні світимості газового факела. В останньому випадку мазут виконує роль карбюратора. Він збільшує міру чорноти газового факела і таким шляхом покращує теплообмін випромінюванням. Газомазутні пальники

застосовують у високотемпературних нагрівальних печах .

Приклад газомазутного пальника високого тиску для природного газу показан на рис.13.3.

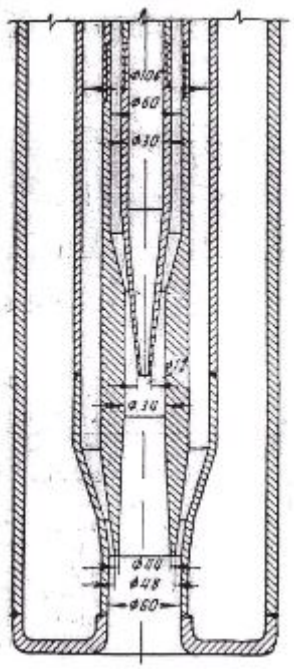

Рисунок 13.3 - Схема газомазутного пальника з форсункою ДМетІ

Ця конструкція складається з мазутної форсунки високого тиску типу ДМетІ і кільцеподібного сопла для газу. Мазут підводиться у форсунку через центральну трубку і викидається в змішувач через конічний наконечник. Розпилювач - компресорне повітря або пара, рухається по кільцю навколо мазутної трубки і через сопло Лаваля і стікає в змішувач.

Суміш дрібнодисперсного мазуту і розпилювача, пройшовши змішувач, що плавно розширюється, зустрічається з газом і разом з ним вилітає в робочий простір печі.

Повітря, необхідне для горіння, подається окрім форсунки і може підігріватися до високих температур.

Конструктивно газомазутні пальники низького тиску відрізняються від пальників високого тиску лише розміром кільцевої щілини для газу. У пальників низького тиску цю щілину роблять більше.

Розрахунок газомазутних пальників підрозділяють на дві частини. Окремо розраховують форсунку і окремо газове сопло.

14 СПАЛЮВАННЯ ТВЕРДОГО ПАЛИВА

14.1 Шаровий процес спалювання твердого палива

Простою моделлю шарового процесу може служити горіння вуглецю у вугільному каналі циліндричної форми.

На рис. 14.1 показаний хід процесу в шарі кускового палива (коксу) у міру просування газів через шар відповідно до уявлення про первинне утворення вуглекислого газу на поверхні горіння палива.

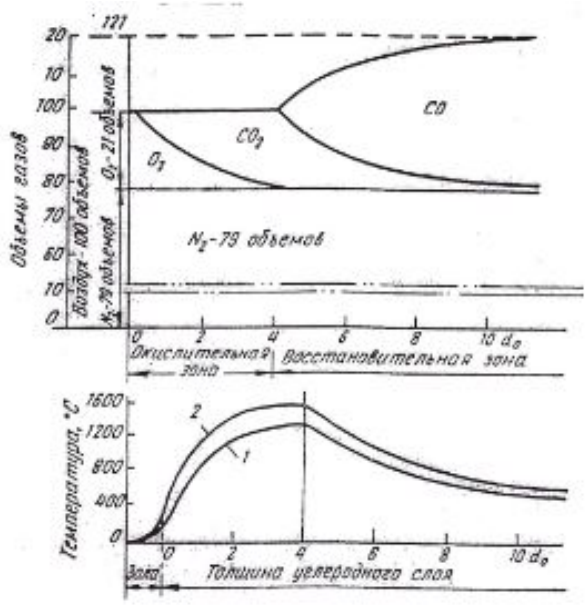

Рисунок 14.1 - Схема процесу горіння вуглецю в шарі

На осі абсцис відкладають відстань вгору від колосникової решітки. Ця відстань може бути виражена в мм або більше універсальна - через початковий діаметр d_0 шматків палива, т. б. " калібрами" . На осі ординат відкладають значення об'ємів газу, що поступає в топку і проходить через колосникові грати, т. б. об'єм повітря прийнятий за одиницю виміру. Азот як баласт проходить через паливний шар без зміни. У міру проходження повітря через шар палива, що горить, кисень витрачається; з кожної молекули його утворюється молекула вуг-

лекислого газу, виділяється тепло і підвищується температура в шарі. Загальний об'єм газів($м^3$) залишається без зміни . Кисень швидко витрачається і на відстані 3 ÷ 5 калібрів від решітки (150 ÷ 200 мм при d_0 =50 мм) практично увесь кисень переходить у вуглекислий газ. Замість 21 об'єму кисню з'являється 21 об'єм вуглекислого газу.

У цьому горизонті закінчується окислювальна зона і створюється максимальна температура в шарі.

Якщо вище цього горизонту палива немає, то топкові гази з максимальним змістом вуглекислого газу (21%) і з максимальною температурою йдуть з шару, це буде топка з повним горінням палива.

Якщо ж вище за цей горизонт є ще шар палива, т. е топка працює з товщим шаром, ніж (3 ÷ 5 d_0), то топкові гази з максимальною температурою і максимальним змістом CO_2 вступлять в цей шар і там почнеться новий процес - відновлення вуглекислого газу в окис вуглецю CO. Додатковий шар палива утворює відновлювальну зону з реакцією

$$CO_2 + C = 2CO - Q \text{ (кДж/кмоль)}$$

Замість однієї молекули CO_2 з'являється 2 молекули CO, а з 21 об'єму газу може утворитися 42 об'єму окислу CO. Отже, загальний об'єм топкових газів у відновлювальній зоні поступово зростає і у кінці зони замість 100 об'ємів первинного повітря може утворитися (N_2+CO = 79+42=121 об'єм топкових газів).

Протяжність відновлювалбної зони в 2 - 3 рази більше окисної і складає 8 - 10 d_0, т. б. близько 400 - 500 мм при d_0=50 мм.

Температура відновлювального шару по ходу газів швидко зріджується, так як реакція ендотермічна.

14.2 Загальні закономірності шарового процесу

1. Довжина і об'єм зон є основними параметрами шарового процесу. Довжина окислювальної зони залежить від початкового діаметру шматків палива. Чим більше шматків палива, тим більше довжини окислювальної зони.

2. Подання нагрітого повітря через шар палива веде до збільшення об'єму і швидкості газів, до збільшення поперечних (турбулентних) переміщень. Це збільшує загальне число ударів молекул об поверхню шматків палива в одиницю часу, чому довжина окислювальної зони повинна декілька зменшиться в порівнянні з холодним дуттям при тій же витраті маси дуття.

3. Збільшення статичного тиску газів в паливному шарі також сприяє інтенсифікації горіння палива і скороченню окислювальної зони.

4. Аналогічно окислювальній зоні поводиться і відновна зона. З тим додаванням, що чим вище температура в окислювальній зоні, тим енергійніше йдуть ендотермічні процеси у відновній зоні, тим швидше вони завершуються, тим коротше виходить відновна зона.

Таким чином, товщина паливного шару є дуже важливою технологічною величиною, її вибирають відповідно до призначення топки, з обліком вимогам, топкових газів, що пред'являються за технологією до складу, і вона залежить від початкового складу палива.

1) Топка повного горіння з максимальним змістом CO_2 в димових газах і з високою температурою газів(1500 ÷ 1700 ^{0}C). Товщина паливного шару має бути близько 3 - 5 калібрів.

2) Топка напівгазова з середньою товщиною паливного шару 6 - 8 калібрів (300 ÷ 400 мм). Тоді в газах є досить багато CO і CO_2, а температура газів не перевищує 1300 ^{0}C. Гази переходять в робочий простір печі, де є вироби, що нагріваються. Допалювання горючих елементів в газах відбуваються в робочому просторі печі шляхом підведення вторинного повітря.

Вторинне повітря подається дрібними струйками (d=10÷15 мм) з великою швидкістю (>50 м/с). Чим більше швидкість, тим енергійніше і досконаліше перемішування і допалювання. Керуючи поданням вторинного повітря, можна підтримувати по довжині печі той або інший температурний режим.

3) Газогенераторна топка працює з великою товщиною паливного шару (>500 м/с) і дає генераторний газ з мінімальним змістом CO_2 і низькою темпе-

ратурою газів (600 – 800 ^{0}C). Генераторна топка (чи просто газогенератор) може бути приєднана безпосередньо до печі або віддалена від неї на значну відстань. Одержаний генераторний газ спрямовується по газопроводах до печей, де згорає за рахунок вторинного повітря, що подається в робочий простір печі.

14.3 Конструкції топок

На рис.14.2 показана проста топка з горизонтальними колосниковими решітками. Топка має наступні елементи: топкова камера прямокутної форми 6, вікно 5 з дверцями для завантаження палива. Колосникова решітка 2, на якій лежить шар палива. Зольник 1 є камерою під решіткою для накопичення в ній золи, що провалюється через отвори решітки.

Ця камера виконує і другу дуже важливу роль - забезпечує рівномірне підведення повітря під колосникові грати, тому називається інакше "піддувайлом". Вікно з дверною 3 служить для видалення золи, прочищення отворів між колосниками і регулювання подання повітря в піддувало при роботі топки на природному припливі повітря. Якщо повітря подає вентилятор, то вікна щільно закриваються. Дуття подають в піддувало по повітропроводу через спеціальне отвори (7).

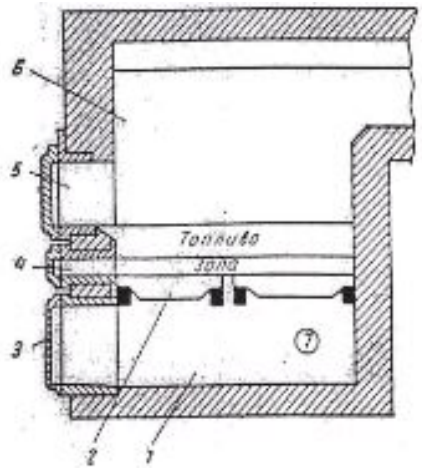

Рисунок 14.2 - Схема простої топки з горизонтальною колосниковою решіткою

Сумарна площа усіх отворів для проходу повітря через грати складають для антрациту 5 - 15 % від площі колосникової решітки, для кам'яного вугілля - 20 - 25 % , для торфу і дров 30 - 50 %. Ширину проділів роблять 8 - 10 - 15 мм

Завантаження палива в топку може бути періодичним і безперервним. Годинне завантаження палива повинне строго відповідати кількості дуття в годину. При дотриманні цієї умови товщина шару залишатиметься однаковою в часі.

Топка з похилими ступінчастою колосниковою решіткою

У потужних топках за наявності великої площі колосникової решітки, що перевищують 1 - 1,5 м, обслуговувати топку вручну дуже важко; тоді відмовляються від горизонтальних решіток і роблять її похилою, ступінчастою (рис. 14.3). При завантаженні вугілля не потрібно великі зусилля при закиданні, вугілля легко скачується по похилій площині решітки і рівномірно розподіляється по ній залежно від кута нахилу решітки до горизонту ($\beta = 35 \div 400$).

Горизонтальні сходинки похилої решітки полегшують шуровку паливного шару і видалення золи.

Паливо з бункера Б поступає самоплинно через отвір, регульований шарнірною площиною Ш (живильником), і скачується по похилій решітці.

Під бункером є вікно " О" для проштовхування палива і розрівнювання палива.

Піддувальная камера ділиться горизонтальними металевими перемичками на 2 - 3 етапи. Кожен поверх має свої дверці "Д" для обслуговування решітки і самостійне підведення повітря "В".

Топка з рухливими ланцюговими колосниковою решіткою. Схема топки показана на рисунку 14.4. Паливо з верхнього бункера 1 пересувається вниз під дією власної ваги.

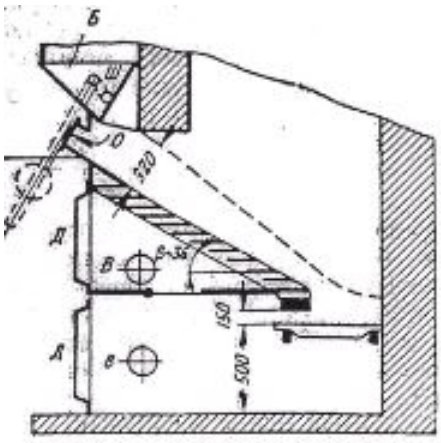

Рисунок14.3 - Схема топки з похилими ступінчастими колосниковою решіткою

Паливо з верхнього бункера 1 пересувається вниз під дією власної ваги. Лопастний барабанний живильник (дозатор) "2" контролює і регулює витрату палива. Паливо поступає на рухливі ланцюгові стрічкові колосникову решітку гусеничного типу. Стрічка повільно переміщається зубчастими колесами від бункера углиб топки. Під колосниковою стрічкою розташована дуттьова коробка, з якої повітря поступає через грати в шар палива.

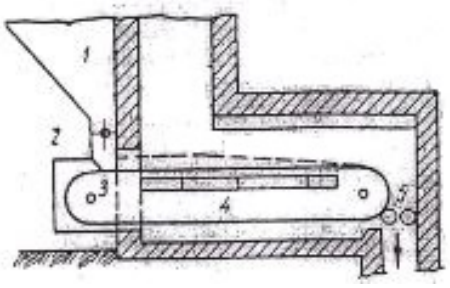

Рисунок 14.4 - Схема топки з рухливими ланцюговими колосниковою решіткою

Повітряна коробка по довжині розділена перегородками на декілька секцій, в яких підтримується необхідний тиск і витрата повітря відповідно до кількості летючих, що виділяються. Розподіл повітря по секціях

встановлюється таким, щоб в цілому по топці мало місце повне горіння палива. Коли стрічка пройде усю довжину топки і повертає вниз, на стрічці залишається лише одна зола, яка падає в золоуборочное пристосування. Усі операції в роботі топки механізовані: подання, завантаження палива і видалення золи.

14.4 Конструкції і робота газогенераторів

Газогенератор є шахтною топкою, працюючого з товстим шаром палива. Для газифікації придатні практично усі види твердого палива : дрова, торф, буре і кам'яне вугілля, антрацит, кокс, сланці. Кращим паливом вважається паливо з високою температурою плавлення золи і достатньою термостійкістю, що перешкоджає розтріскуванню шматків вугілля. Підвищений вміст летких в паливі сприяє газифікації, покращуючи якість газу. Технічний генераторний газ є сумішшю повітряного, водяного газів і летких палива.

На рис. 14.5 представлений сучасний механізований газогенератор для кам'яного вугілля.

Для завантаження палива використовують герметичні металеві коробки (2), встановлені вгорі над отвором в зведенні шахти газогенератора.

Колосникова решітка 6 виконується у вигляді гриба. Основа колосникового гриба прикріплена до великої металевої чаші, яка наповнена водою. Вода герметизує нижню частину шахти газогенератора і охолоджує золу. Чаша разом з колосниковим грибом може обертатися. Це сприяє розпушуванню нижнього шару палива, покращує розподіл повітря по перерізу шахти.

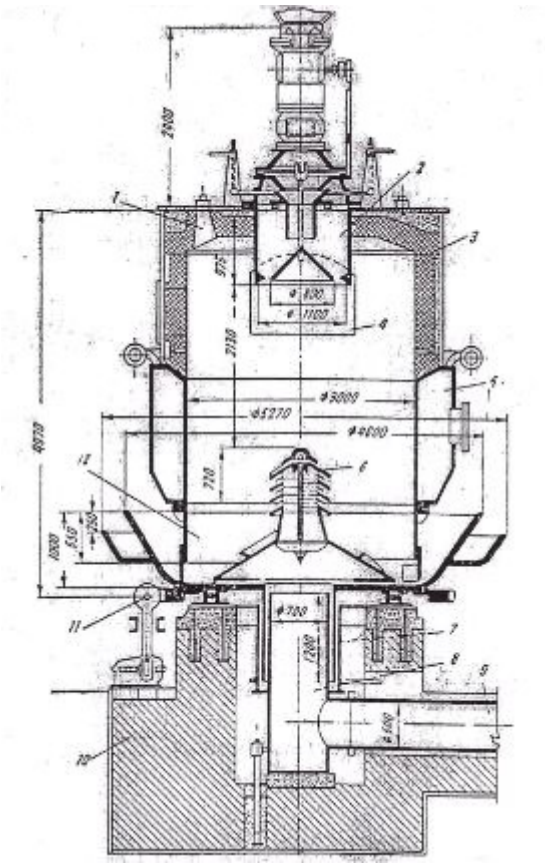

Рисунок 14.5 - Газогенератор для кам'яного вугілля

Повітря поступає від потужного вентилятора (Р=500 мм.рт.ст.) по центральному повітропроводу в колосниковий гриб, що має рівномірно розподілені отвори для виходу повітря в паливний шар.

Основним розміром газогенератора є його внутрішній діаметр (d = 3 ÷ 3,5 м).

Шахту газогенератора виконують у вигляді металевого кожуха, футерованого зсередини шамотною цеглиною ($t_{дол}$ =1300 ^{0}C).

ЛІТЕРАТУРА

1. Семикин И.Д., Аверин С.И., Радченко И.И. Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов.-М.: Металлургия, 1965.-382с.

2. Белосельский Б.С., Соляков В.К. Энергетическое топливо.-М.:Энергия, 1980.-242с.

3. Частухин В.И., Частухин В.В. Топливо и теория горения.- Киев: Вища школа, 1989.-312с.

Конспект лекцій з дисципліни „Паливо та теорія горіння” для студентів усіх форм навчання спеціальності 6.090510-Теплоенергетика.

Укл.: Анатолій Пилипович Рижов
К.т.н., доцент

51918, м. Дніпродзержинськ, вул..Дніпробудівська,2
Підписано до друку
Формат 80/34 1/16 Обсяг д.а.
Тираж екз. Замовлення _____