Міністерство освіти і науки України
Мирогощанський аграрний фаховий коледж

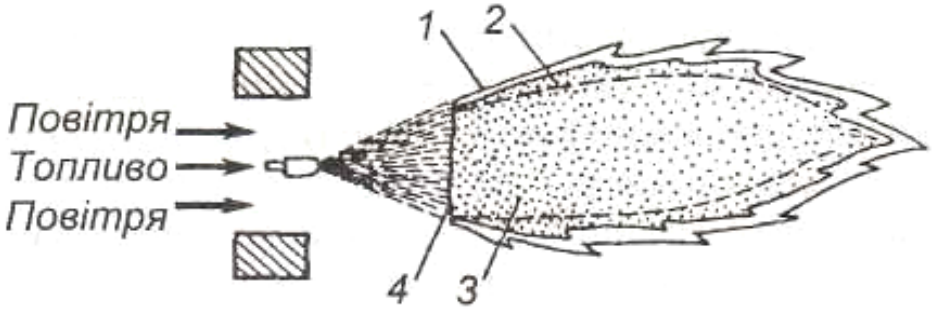

Рис. 16.2. Структура факела рідкого палива:
1 — фронт займання; 2 — зона пароповітряної суміші та продуктів горіння; 3 — зона пароповітряної суміші та краплин палива; 4 — фронт горіння

Методичні
рекомендації
з дисципліни
«Основи теплотехніки і гідравліки»

Тема: Процес горіння і способи спалювання палива.

Тема: ***Процес горіння і способи спалювання палива.***

План лекції:

1. Суть процесу горіння.
2. Теоретично необхідна і дійсна кількість повітря для горіння.
3. Коефіцієнт надлишку повітря.
4. Розрахунок об'єму продуктів згоряння.
5. Поняття про ентальпію продуктів згоряння.
6. Шаровий, факельний і вихровий способи спалювання палива.

Мета:вивчити суть процесу горіння, а також навчитись розраховувати необхідну і дійсну кількість повітря для горіння і об'єм продуктів згоряння.

Метод: усне пояснення матеріалу лекції студентам.

Матеріальне забезпечення: *методичні рекомендації до вивчення даної теми, плакати, підручник.*

Використана література:

1. Черняк О.В., Рибчинська Г.Б. **Основи теплотехніки і *гідравліки***.- Київ: Вища школа, 1982р.-223с.
2. Драганов Б.Х., Бессараб О.С. ***Теплотехніка***.- Київ: Фірма «ІНОКС», 2005.- 400с.
3. Дідур В.А., Стручаєв М.І. ***Теплотехніка, теплопостачання і використання теплоти в сільському господарстві***.- К.:Аграрна освіта, 2008.-233с.

Процес горіння і способи спалювання палива

Горінням називають процес екзотермічного окислення горючої речовини, що швидко відбувається та супроводжується інтенсивним виділенням теплоти. В основі процесу горіння лежить хімічна реакція між горючою речовиною та окислювачем. Окислювачем, звичайно, є кисень повітря.

Реакція горіння відбувається не безпосередньо між молекулами вихідних речовин (палива та окислювача), а через проміжні стадії. Цим визначається ланцюговий механізм реакції горіння, розроблений М.М.Семеновим. Реакція горіння є результатом ряду ланцюгових реакцій, що відбуваються послідовно.

Залежно від фазового стану речовин, що реагують під час горіння (тверді, рідкі, газоподібні), хімічні реакції поділяють на гомогенні, які відбуваються між компонентами, що перебувають в одній фазі (наприклад, у газоподібному стані), і гетерогенні, які відбуваються на межі двох фаз. Прикладами гомогенного горіння є горіння швидковипарюваних рідких налив. При цьому передбачається, що паливо з окислювачем перемішали до процесу горіння. Прикладами гетерогенного

горіння є горіння твердих палив і горіння крапель важких рідких палив, коли фронт горіння встановлюється на межі між паливом та окислювачем. Слід відмітити, що горіння палива є потоковим процесом і для його підтримання потрібно підводити компоненти (палива та окислювача) в зону реакції і відводити з неї продукти згоряння.

Організація процесу горіння можлива у ламінарному та турбулентному потоках окислювача. У загальному випадку тривалість горіння $\tau_г$ палива складається з тривалостей проходження фізичних $\tau_ф$ та хімічних $\tau_х$ процесів:

$$\tau_г = \tau_ф + \tau_х. \qquad (16.10)$$

Самозайманням називають ініціювання горіння в усьому обсязі реакційної суміші. Воно може статися при досягненні деякого граничного значення температури, що називається температурою самозаймання t_c суміші. Ця температура не є фізико-хімічною характеристикою і для кожного палива залежить від умов підведення й відведення теплоти та ряду інших факторів. Температура самозаймання водню 580...590 °С, оксиду вуглецю - 644...658 °С, метану - 650..750 °С.

У більшості технічних пристроїв горіння ініціюється не самозайманням, а *запалюванням* за допомогою факела або електричної іскри.

Фізичні основи процесу горіння

Для проходження реакції горіння потрібно перемішувати компоненти (окислювач і паливо) на молекулярному рівні, тобто забезпечити процес масоперенесення компонентів, що реагують. У турбулентному потоці масоперенесення здійснюється за рахунок турбулентної дифузії, а в ламінарному потоці і в пограничному шарі — за рахунок молекулярної дифузії. Для розрахунку дифузійного масообміну між компонентами, що реагують, користуються рівнянням, подібним до співвідношення Ньютона для конвективного теплообміну:

$$j=\alpha_D \Delta C, \quad (16.16)$$

де j — щільність потоку маси, кг/(м^2*С);

α_D — коефіцієнт дифузійного обміну, м/с, подібний до коефіцієнта теплообміну α;

ΔC — різниця концентрації компонентів біля поверхні розділу фаз і в потоці (середовищі), кг/м^3.

Коефіцієнт α_D визначають з критеріальних рівнянь масообміну, аналогічних критеріальним рівнянням конвективного теплообміну. Подібно до константи швидкості хімічної реакції k_x вводять поняття константи сумарної швидкості реакції k, яке оцінюється за швидкістю споживання одного з компонентів, що реагують. Константа швидкості реакції виражає також частоту активних стикань молекул, що спричинюють реакцію, але з урахуванням дифузії молекул компонентів, що реагують. Величина $1/k$, тобто опір переходу газу, що реагує, з навколишнього середовища в зону реакції, складається з опору дифузії $1/\alpha_D$ та хімічного опору $1/k_x$:

$$1/k = 1/\alpha_D + 1/k_x. \qquad (16.17)$$

Можна_ виділити два граничних режими процесу горіння. Режим, за якого $k_x > \alpha_D$, $1/k \approx 1/\alpha_D$, має назву *дифузійного*. У цьому режимі сумарна швидкість реакції визначається інтенсивністю масоперенесення компонентів, що реагують, у зону реакції. Тривалість згоряння палива лімітується в основному тривалістю сумішоутворення.

Режим, за якого $k_x < \alpha_D$, $1/k = 1/k_x$, називається *кінетичним*. Швидкість реакції визначається швидкістю реагування компонентів, горіння лімітується тривалістю самої хімічної реакції.

Дифузійний режим горіння відбувається за умови, що паливо та окислювач подаються нарізно (наприклад, при дифузійному горінні газу, горінні розпиленого рідкого і твердого палива). Він має місце за високої температури горіння. Кінетичний режим горіння здійснюється при спалюванні попередньо ретельно перемішаних сумішей газоподібного палива та окислювача, а також при низькотемпературному горінні твердих палив.

Суміш палива та окислювача згоряє, звичайно, з утворенням полум'я. При ламінарному русі палива та окислювача утворюється фронт полум'я — прошарок, що відокремлює неспалену суміш від продуктів згоряння. Для реакцій, що відбуваються в полум'ї при ламінарному режимі горіння, як основну характеристику розглядають нормальну швидкість поширення полум'я. Полум'я поширюється шляхом передачі теплоти теплопровідністю із зони горіння у свіжу суміш.

Швидкість переміщення фронту полум'я визначають за напрямком, нормальним до поверхні фронту у даній точці. Ця швидкість залежить від теплофізичних властивостей горючої суміші і тривалості згоряння. Отже, нормальна швидкість поширення полум'я певною мірою характеризує закономірність хімічних реакцій, що відбуваються в зоні горіння. Нормальне полум'я більшості паливо повітряних сумішей поширюється із швидкістю 0,3...0,5 м/с. Особливістю ламінарного горіння є розтягнутий характер факела, і тому на практиці воно застосовується рідко.

За певних умов полум'я переходить у турбулентне. Швидкість поширення турбулентного полум'я практично пропорційна інтенсивності турбулентних пульсацій. Остання, у свою чергу, пропорційна швидкості газу. Довжина турбулентного факела мало залежить від швидкості надходження суміші.

Максимальною температура полум'я буде при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha_{пов} \approx 1$ (так звана стехіометрична суміш). Розрізняють нижню ($\alpha_{пов} > 1$, бідна суміш) і верхню ($\alpha_{пов} < 1$, багата суміш) концентраційні межі поширення полум'я. Поза цими межами процес горіння не відбувається.

У деяких випадках товщина фронту, у якому змінюється тиск, співставна з довжиною пробігу молекул. При цьому утворюється фронт ударної хвилі, що призводить до детонаційного механізму поширення полум'я. Температура горіння стає високою, суміш згоряє значно швидше, ніж у нормальному полум'ї. Детонаційна хвиля рухається з великою швидкістю, що перевищує швидкість звуку, а це може призвести до вибухових явищ. Для запобігання детонації беруть паливо з досить високою температурою займання або додають у нього

антидетонатори, тобто речовини, пари яких зменшують швидкість реакції (наприклад, у карбюраторних двигунах).

Горіння твердого палива

Горіння твердого палива — це складний фізико-хімічний процес, що складається з ряду послідовних (іноді таких, що накладаються частково одна на одну) стадій:

1. підсушування палива і нагрівання до температури початку виходу летких речовин;
2. спалахування летких речовин та їх вигоряння;
3. вигоряння горючих речовин з коксу.

Для палив з низьким виходом летких речовин (пісне вугілля, антрацити) тривалість горіння визначається, в основному, тривалістю горіння коксу. Для палив, багатих на леткі речовини (дрова, торф, деякі види кам'яного вугілля), тривалість горіння визначається тривалістю горіння летких речовин.

При спалюванні твердого палива основною вважається реакція взаємодії вуглецю з киснем, що надходить до поверхні частки палива з утворенням оксиду й диоксиду вуглецю. Продукти згоряння дифундують від поверхні частки палива у середовище, що оточує її.

Якщо структура вуглецю (коксу) пориста, то процес горіння відбувається не тільки на поверхні, а й в об'ємі частки. У цьому випадку пористість коксового (вуглецевого) залишку часток твердого палива забезпечує дифузію всередину частки активних до вуглецю газів (CO_2, O_2, H_2O). Чим більша проникливість матеріалу, тим глибше проникає кисень та інші гази в саму частку і тим активніше відбувається реакція окислення.

При спалюванні часток палива велике значення має так званий *час індукції* $\tau_{інд}$, що визначається як проміжок часу, протягом якого температура частки підвищується від початкової до температури займання. Чим вища температура середовища, у яке введено частку палива, тим менший час індукції і тим ефективніше відбувається процес горіння. Тому дуже важливо забезпечити для кожного палива відповідний температурний режим горіння.

Процес горіння твердого палива характеризується швидкостями горіння $\omega_г$. При цьому розрізняють три зони горіння: кінетичну, проміжну та дифузійну.

У кінетичній зоні горіння лімітується хімічною реакцією, що посилюється з підвищенням температури процесу.

У проміжній зоні швидкості дифузії та хімічної реакції мають приблизно однакові значення. Підведений до палива окислювач головним чином витрачається на горіння.

У дифузійній зоні такою, що лімітує, стає швидкість дифузії. Залежність зміни швидкості горіння $\omega_г$ від температури t і співвідношення кінетичної та дифузійної зон згоряння зображено на рис. 16.1.

Горіння рідкого палива

Рідке паливо спалюється розпиленим до етапу крапель в потоці повітря. За наявності окислювача горіння рідкого палива можливе у стані пари, тому процесам займання та горіння краплі передує її випаровування.

Процес горіння складається з таких стадій:

1) нагрівання та випаровування палива;
2) перемішування парів палива з окислювачем (утворення горючої суміші);
3) займання горючої суміші;
4) власне горіння суміші.

Швидкість і тривалість горіння рідкого палива будуть визначатися інтенсивністю перебігу фізичного та хімічного процесів. Якщо швидкість згоряння палива значно перевищує швидкість випаровування його, то можна вважати, що швидкість горіння дорівнює швидкості випаровування $\tau_г=\tau_{вип}=\tau_ф$. В іншому разі превалює швидкість хімічної взаємодії і $\tau_г=\tau_х$, де $\tau_ф$, $\tau_х$, — тривалості відповідно фізичного і хімічного процесів.

Щоб забезпечити потрібну інтенсивність випаровування рідких палив, їх розпилюють у потоці повітря, внаслідок чого утворюється полідисперсний потік дрібних краплин розмірами ≤0,2 мм. Цим досягається велика питома поверхня випаровування, а потім і горіння. Теплота, потрібна для випаровування палива, передається поверхні краплі із зони горіння здебільшого випромінюванням і внаслідок часткової дифузії всередину парової оболонки продуктів згоряння.

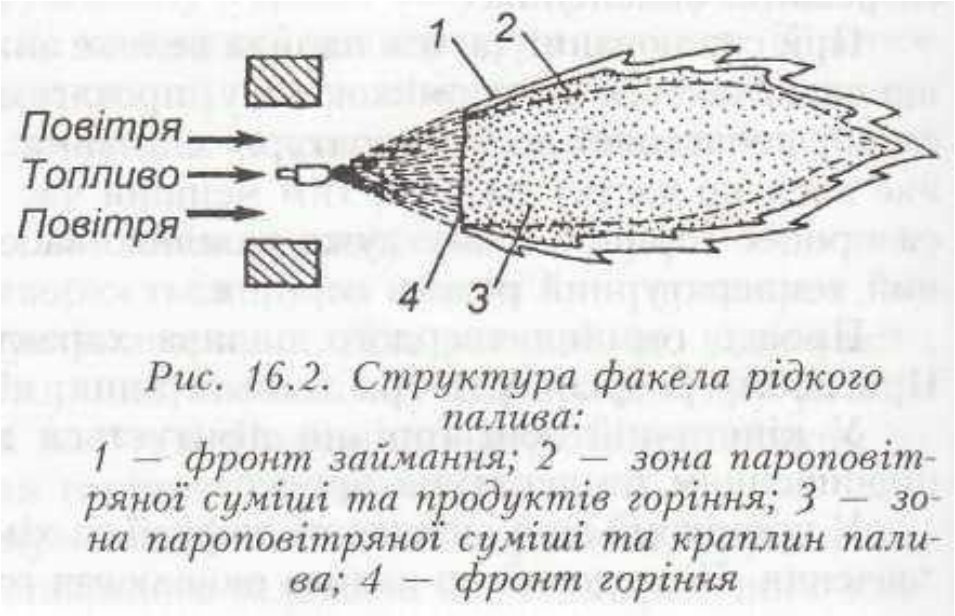

Рис. 16.2. Структура факела рідкого палива:
1 — фронт займання; 2 — зона пароповітряної суміші та продуктів горіння; 3 — зона пароповітряної суміші та краплин палива; 4 — фронт горіння

Із рідких палив застосовують переважно мазут та пічне побутове паливо. При нагріванні крапель мазуту до високої температури утворюються сажа і кокс (тверда вуглецева фаза), які вигоряють так само, як частки твердого палива. Розжарені частки сажі та коксу у полум'ї зумовлюють його світіння. Газоподібні та тверді продукти розкладання мазуту в процесі горіння істотно збільшують загальну довжину полум'я. Структуру факела рідкого палива зображено на рис. 16.2.

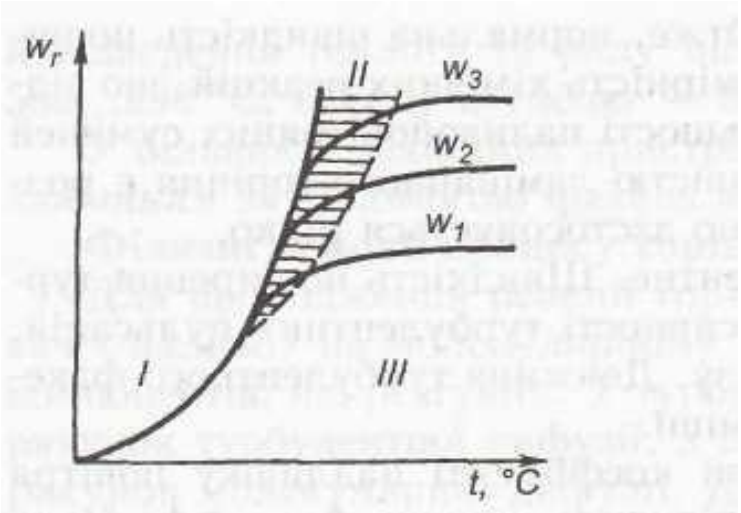

Рис. 16.1. Залежність швидкості горіння від температури:
I, II, III — відповідно кінетична, проміжна та дифузійна області

Для швидкого та економного спалювання рідкого палива слід

забезпечити такі умови: дрібне розпилювання, ретельне перемішування з окислювачем і стабілізацію горіння.

Для розпилювання рідкого палива застосовують форсунки чотирьох типів: механічні, парові, ротаційні та пневматичні.

У *механічних форсунках* розпилювання відбувається за допомогою паливного насоса. Перед форсункою паливо має бути очищене від механічних домішок, які можуть засмітити отвори форсунки. Тиск палива перед форсункою звичайно становить 1,2...1,6 МПа.

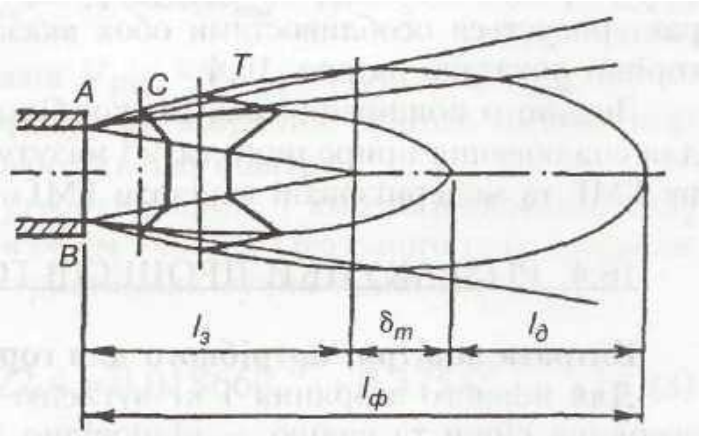

Рис. 16.3. Структура факела газоподібного палива: С — крива зміни концентрації горючої суміші; Т — крива зміни температури; $l_з$ — довжина зони займання; $l_ф$ — довжина факела; АВ — переріз сопла; $\delta_т$ — товщина фронту турбулентного горіння; $l_д$ — зона догоряння

У *парових форсунках* розпилювання відбувається за допомогою пари. У цих форсунках мазут і пара для розпилювання проходять по внутрішній трубі до дифузора внаслідок чого створюється розрідження і пара набуває великої швидкості. На 1 кг мазуту витрачається близько 0,4 кг пари.

У *ротаційній форсунці* паливо (підігрітий мазут) розтікається тонким шаром і під впливом відцентрової сили розбризкується. Потік повітря проходить через завихрювач і розбиває паливо на дрібні частки, виносячи їх до топкового об'єму.

У *пневматичних форсунках* мазут вноситься у топку повітрям, що надходить внутрішнім каналом пальника до завихрювача. Після виходу із завихрювача повітря захоплює мазут, який подається по стволу пальника. Вторинне повітря надходить зовнішнім каналом, який забезпечує вихровий рух повітря. Теплонапруження топкового об'єму під час спалювання мазуту не перевищує 300 кВт/м . Коефіцієнт надлишку повітря —1.15... 1.35.

Визначальною особливістю горіння газоподібного палива є те, що обидва компоненти, які реагують (паливо та окислювач), перебувають в одній газоподібній фазі. Горіння цього палива можливе як при попередньому перемішуванні окислювача і палива, так і при роздільній подачі їх до топки.

Газоповітряна суміш, що надходить у зону горіння, взаємодіє з навколишнім середовищем, внаслідок чого вона нагрівається у турбулентному пограничиому шарі. У периферійній зоні потоку газоповітряна суміш спалахує, утворюючи зону горіння. Ця зона розширюється в міру віддалення від устя сопла пальника. В ядрі потоку гази рухаються з постійною швидкістю і при постійній температурі У цій зоні суміш не горить. Видимим фронтом горіння є ділянка факела, що включає зону займання $l_{з\ з}$ і товщину турбулентного фронту горіння 5^ (рис. 16.3).

Під впливом турбулентних пульсацій фронт полум'я не залишається постійним, іноді розривається на окремі вогнища.

Якщо подавати нарізно у топковий обєм газоподібне паливо та окислювач, то має місце дифузійний режим горіння, у якому визначальним є процес сумішоутворення. При турбулентному поширенні газу в зону горіння з навколишнього середовища дифундує повітря, а з ядра потоку — газоподібне паливо. Внаслідок цього дифузійні потоки палива та повітря вступають у хімічну реакцію. У даному випадку швидкість горіння визначається інтенсивністю дифузії, а положення зони горіння — умовами турбулентної дифузії.

При *кінетичному горінні* фронт полум'я є поверхнею розділу між горючою сумішшю та продуктами згоряння. При *дифузійному горінні* газу фронт полум'я є поверхнею розділу між продуктами згоряння і сумішшюгазу з продуктами згоряння, що дифундують назустріч потокові. *Змішане горіння* характеризується особливостями обох вказаних способів горіння. Схеми факелів при горінні показано на рис. 16.4.

Значного поширення набули комбіновані газомазутні пальники, що призначені для спалювання природного газу і мазуту. На практиці використовують пальник типу ГМГ та модернізовані варіанти ГМГм, НГМГи, ІМГБ.

РОЗРАХУНКИ ПРОЦЕСІВ ГОРТННЯ ПАЛИВ

Витрата повітря, потрібного для горіння

Для повного згоряння 1 кг вуглецю теоретично потрібно 2,67 кг кисню, а для згоряння сірки та водню — відповідно 1 і 8 кг кисню. Частина потрібного кисню міститься у паливі, а решта має бути подана з повітрям.

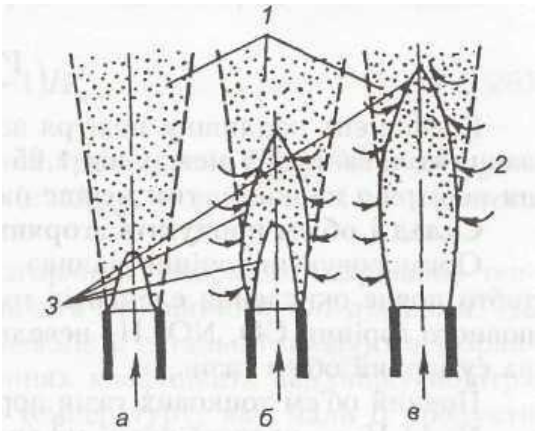

Рис. 16.4. Схеми факелів при горінні: а — кінетичному; б — змішаному; в — дифузійному; 1 — продукти згорання; 2 — окислювач; 3 — фронти горіння

Враховуючи, що густина кисню в нормальних умовах дорівнює 1,43 кг/м^3, і те, що вміст його у сухому повітрі становить за об'ємом 0,21, то об'єм теоретично потрібного повітря для спалювання 1 кг твердого або рідкого палива, м^3/кг, можна визначити за формулою:

$$V^\circ=0{,}0889(C^p+0{,}375S^p_Л)+0{,}265H^p-0{,}0333O^p. \quad (16.18)$$

При спалюванні сухого газоподібного палива потрібний об'єм повітря, м^3/кг,

$$V^\circ=0{,}047[0{,}5CO+0{,}5H_2+1{,}5H_2S+\sum(m+\tfrac{n}{4})C_mH_n-O_2]. \quad (16.19)$$

Оскільки забезпечити рівномірне перемішування повітря з паливом складно, у топку доводиться подавати більше повітря, ніж це потрібно теоретично.

Відношення кількості повітря $V_д$, дійсно поданого у топку, до теоретично потрібного V^0 називається *коефіцієнтом надлишку повітря:*

$$\alpha_{пов}=\frac{V_д}{V0}>1, \quad (16.20)$$

звідки дійсний об'єм повітря:

$$V_{д=}\ \alpha_{пов}\ V^0$$

Коефіцієнт надлишку повітря залежно від виду палива і способу його спалювання коливається у межах від 1,05 до 1,5. Чим сприятливіші умови для змішування повітря з паливом, тим менше надлишок повітря.

Склад і об'єм продуктів згоряння

Організовуючи горіння палива, намагаються забезпечити його повне згоряння, тобто повне окислення елементів горючої маси. Звичайно, кількість продуктів неповного горіння CO, NO, H_2 невелика і наявність їх не справляє значного впливу на сумарний об'єм газів.

Повний об'єм топкових газів дорівнює сумі об'ємів сухих газів $V_{сг}$ *і* V_{H_2O} водяної пари, м^3/кг:

$$V_г=V_{с.г}+V_{H_2O}. \qquad (16,22)$$

Цю формулу записують так:

$$V_г=V_{RO_2}+V_{H_2O}+0.79\ \alpha_{пов}\ V^0+0.2l(\alpha_{пов}-1)V^\circ, \quad (16.22)$$

де V_{RO_2} - об'єм сухих триатомних газів $V_{RO_2}=V_{co2}+V_{sc2}$;

$079\alpha_{пов}V^\circ$ - кількість азоту повітря, що міститься у продуктах згоряння (азотом палива нехтуємо);

$0,21(\alpha_{пов}-l)V^\circ$ — об'єм надлишкового кисню повітря.

При згорянні 1 к моля вуглецю і сірки утворюється по 1 к молю відповідно CO_2 і SO_2.

Водяна пара у топкових газах утворюється внаслідок згоряння водню у кількості $9H^p/(100-0,805)=0,111HP$ і випаровування вологи палива $W^p/(100-0,805)==0,0124W^p$. Крім того, волога надходить з повітрям, що іде на горіння. Якщо вологовміст d_n = **10** г/кг або 13 г/м^3, то об'єм водяної пари з повітря становить $d_n/(100*0,0805)=0,0161V^0$. У наведених виразах 0,805 кг/м^3 - густина водяної пари за нормальних умов (в ідеально газовому наближенні).

Таким чином теоретичний об'єм водяної пари, м^3/кг,

$$V_{H2o}=0,lllH^p+0,0124W^p+0,0161V^\circ. \quad (16.24)$$

Для видів палива, поширеного у країнах СНД, значення $V°$, V_{H_2O} табульовані.

Ентальпія продуктів згоряння

Згідно з першим законом термодинаміки кількість теплоти, яку віддає потік газів поверхням нагрівання, дорівнює різниці ентальпії газів до і після теплообмінника (якщо технічна робота не здійснюється, а швидкісним напором можна знехтувати). Тому ентальпія продуктів повного згоряння 1 кг твердого палива або 1 м^3 газоподібного палива обчислюється за формулою

$$H_г = V_г c_г t_г , \quad (16.25)$$

де $V_г$ — об'єм продуктів згоряння, м^3/кг;

$c_г$ — середня об'ємна теплоємність продуктів згоряння при постійному тиску, кДж/м^3;

$t_г$ — температура газу °С.

З урахуванням надлишкового повітря сумарна ентальпія продуктів згоряння

$$H_г = H^0_Г + (\alpha_{пов} - 1) H^0_{пов}, \quad (16.26)$$

де $H^0_Г$ — ентальпія продуктів повного згоряння при $\alpha_{пов} = 1$;

$H^0_{пов} = V°(c'-t)_{пов}$ — ентальпія теоретично потрібного об'єму повітря; $(c'-t)_{пов}$ — ентальпія 1 м^3 вологого повітря.

Кількість теплоти, яку віддають продукти згоряння поверхням нагрівання теплообмінників котельного агрегату, зручно визначати за допомогою М-діаграми. На цій діаграмі нанесено лінії, що відтворюють залежність ентальпії продуктів згоряння $h_Г$ від їхньої температури при різних значеннях коефіцієнта надлишку повітря. За *ht*- діаграмою можна визначати також температуру, яку мали б продукти згоряння за умови, що вся теплота горіння витрачається тільки на їх нагрівання, а тепловтрат немає. Цю температуру називають *адіабатною.*

Теплота, яку віддають продукти згоряння в розрахунку на одиницю кількості спаленого палива, визначають за *ht* - діаграмою як різницю їхніх ентальпій:

$$Q_г = H'_Г - H''_Г, \quad (16.27)$$

де $H'_Г$, і $H''_Г$ — ентальпія газів відповідно до і після теплообмінника котельного агрегату.

Контрольні запитання та завдання

1.Дайте означення джерела енергії.

2.Що називають паливом? Палива яких видів використовують в енергетичних установках?

3.Наведіть класифікацію органічного палива.

4.З чого складаються тверде і рідке палива?

5.Запишіть вираз для визначення теплоти згоряння твердого, рідкого і газоподібного палив.

6.Наведіть характеристики твердих палив (кам'яного вугілля та ін.).

7.Дайте основні характеристики рідкого і газоподібного палив.

8.Викладіть основні положення кінетичних і фізичних основ горіння.

9.Дайте означення коефіцієнта надлишку повітря.

10.Викладіть основні положення горіння твердого, рідкого і газоподібних палив.

11.Опишіть принцип роботи механічних, парових, ротаційних і пневматичних форсунок.

12.Наведіть вираз для визначення об'єму теоретично потрібного повітря для спалювання твердого, рідкого, газоподібних палив.

13.Як визначають об'єми продуктів згоряння.

14.Як визначають ентальпію продуктів згоряння?