



ГЛАВА 5

ИЗГАРЯНЕ НА ФОСИЛНИ ГОРИВА

„МАКАР ЧОВЕЧЕСТВОТО ДА ИЗПОЛЗВА ОГЪНЯ
ОТ ХИЛЯДИ ГОДИНИ, А ЕЛЕКТРИЧЕСТВОТО
ОТ МАЛКО ПОВЕЧЕ ОТ ВЕК, ЗАКОНИТЕ,
ОПРЕДЕЛЯЩИ ДВИЖЕНИЕТО НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИЯ
ТОК, СА ПО-ДЪЛБОКО ИЗУЧЕНИ ОТ ЗАКОНИТЕ,
ОПРЕДЕЛЯЩИ ГОРЕНЕТО”
АКАД. Н. СЕМЕНОВ

5.1. ЕНЕРГИЕН ПРОБЛЕМ И НЕГОВОТО РЕШАВАНЕ

Възникналият през 70-те години на миналия век енергиен проблем е в основата на очертаващата се екологична катастрофа. Този проблем се дължи на два факта. Първо, налице е все по-засилващ се дебаланс между енергийните нужди на човечеството и ограничените запаси на фосилни (изкопаеми) горива. Второ, като трайна тенденция се налага нарастващата дисхармония между природата и човека. Постигането на устойчиво развитие на човешкото общество изисква решаването на енергийния проблем. Това може да се осъществи чрез повишаване на енергийната ефективност при получаването (преобразуването) и потреблението на енергия и чрез постепенното заместване на невъзобновяемите енергийни източници с възобновяеми. На тези два подхода за решаване на енергийния проблем са посветени настоящата и следващата глава.

В цикъла производство (преобразуване) и потребление на енергия замърсяването на околната среда се осъществява най-вече от първата му част и по-конкретно от горивните процеси на фосилните горива. При тяхното протичане, както вече бе подчертано, в атмосферата се отделят азотни и серни окиси (причинители на киселинните дъждове), отровният въглероден монооксид, канцерогенни висши въглеводороди (бензапирен), парниковият газ въглероден диоксид пр. Чрез горенето обаче се осъществява преобразуването на химичната енергия на горивата в топлинна. Това е

класическият начин на използване на тези горива, чрез които се удовлетворяват сега около 70 % от енергийните нужди на човечеството. В бъдеще този процент непрекъснато ще намалява с изместването на изкопаемите горива от възобновяемите енергийни източници. Но към момента въпросът за замърсяването на околната среда от изгарянето на фосилните горива е особено актуален. Ето защо той е предмет на разглеждане тук.

В глава 5 се дават кратки сведения за изгарянето на фосилни горива, като горивният процес се разглежда като обект за автоматизация. Основна тежест е дадена на управлението на промишлени горивни инсталации. Именно чрез тяхното управление е възможно замърсяването на околната среда да бъде минимизирано, като същевременно се повиши енергийната ефективност на преобразуване на химичната енергия на горивата в топлина.

Макар до момента да не съществува стройна и единна теория на горенето на различните видове горива, то за целите на управлението му има достатъчно събран опит.

5.2 УСЛОВИЯ ЗА ВЪЗНИКВАНЕ НА ГОРЕНЕ

Горенето може да се разглежда като физико-химичен процес на окисляване на горимите в горивата химични елементи и техните съединения, при който интензивно се отделя топлина и излъчва светлина. Необходими условия за възникване на горене са наличието на гориво, окислител и източник на възпламеняване.

Горива и техните характеристики. Горивата са основните източници на топлина. Горимите химични елементи в тях са въглеродът – С, водородът – Н и сярата в някои нейни форми, а именно пиритна сяра – FeS_2 и органична сяра във вид на сложни органични съединения. Сулфатната сяра (CaSO_4 , FeSO_4 , MgSO_4) не гори. Като баластни елементи на горивата, включени в техния състав, са кислородът О и азотът N.

По начина на получаване горивата се делят на *естествени* и *изкуствени*, синтезирани в индустриални условия от естествените по пътя на физико-механична или физико-химична преработка. В зависимост от агрегатното им състояние горивата биват: твърди, течни и газообразни.

Към твърдите естествени горива спадат каменните въглища, торфът, дървесината. Съставът на антрацитните въглища е: $C = 96 \%$, H – до 2% , O и N – до 2% . При черните въглища съставът им е приблизително: $C = 81 \%$, $H = 6 \%$, O и $N = 13 \%$. Торфът е с приблизителен състав: $C = 53 - 60 \%$, $H = 4,5 - 6,5 \%$, $O = 30 - 40 \%$, $N = 1 - 3 \%$, $S = 0,5 - 1,5 \%$. Дървесината има ориентировъчен състав $C = 50 \%$, $H = 6 \%$, $O = 43 \%$, $N = 1 \%$. Синтетичните твърди горива са дървените въглища, коксът, брикетите. Дървените въглища се получават при загряване на дървесината до $400 - 450^\circ C$ без достъп на въздух, при което се отделят газовете и водата и остава сухият остатък – дървесината. Съставът им е: $C = 79 - 89 \%$, $H = 1 - 4 \%$, $O = 8 - 18 \%$, $N = 0,5 - 1 \%$. Коксът се получава при термично разложение на каменните въглища без достъп на въздух при температура $900 - 1000^\circ C$. Съставът му е приблизително следният: $C = 96 - 98 \%$, $H = 0,4 - 0,5 \%$, $O = 1,6 - 3 \%$, $S = 0,5 - 2 \%$.

Течното природно гориво е нефтът. Съставът му е $C = 83 - 87 \%$, $H = 11 - 14 \%$, $O = 0,1 - 1 \%$, $N = 0,05 - 1,5 \%$, $S = 0,1 - 3 \%$. Производните на нефта са бензина (със състав $C = 85 \%$, $H = 14,9 \%$, O и $N = 0,05 \%$, $S = 0,05 \%$), керосина (със състав $C = 86 \%$, $H = 13,7 \%$, $S = 0,1 \%$, O и $N = 0,2 \%$), дизеловото гориво (със състав $C = 86,3 \%$, $H = 13,3 \%$, $S = 0,3 \%$, O и $N = 0,1 \%$), мазута (със състав $C = 84 - 88 \%$, $H = 11 - 14 \%$, $S = 0,5 \%$, O и $N = 0,5 \%$) и др., получени при различните видове фракционни преработки и крекинги процеси. Към течните синтетични горива спадат също така различните видове спирт: метилов, етилов, пропилов, бутилов, а също така и ароматните въглеводороди – бензол, толуол, ксилуол и сложните деривати: етилацетат, амилацетат и др.

Газообразното природно гориво представлява смес от различни горими и негорими газове, чието процентно съдържание е силно променливо. Природният газ съдържа $80 - 98 \%$ метан, $0,3 - 10 \%$ тежки въглеводороди: етан, пропан, бутан и пр. Баластни се явяват азотът и кислородът $0,3 - 10 \%$ и въглеродният диоксид $0,1 - 2 \%$. Към синтетичните газообразни горива спадат коксовият газ, светилният газ, генераторният, нефтеният, доменният газ и др. Коксовият газ се получава при коксуване на каменни въглища. Съставът му е: метан 60% , тежки въглеводороди 2% , въглероден окис $6,5 \%$, въглероден диоксид $2,5 \%$, $N = 5 \%$, $O = 1 \%$, $H = 23 \%$.

Светилният газ се получава при суха дестилация на въглища без достъп на въздух и при висока температура. Съставът му е сходен на този на коксовия газ. Генераторният газ се явява продукт на газификацията на твърдо гориво. В зависимост от технологията на получаване генераторният газ съдържа 34,7 % въглероден окис и 65,3 % азот (при сухия генераторен газ) и 87 – 93 % въглероден окис и водород, 3 – 7 % въглероден диоксид, 3 – 5 % азот и 0,1 – 1 % метан (при водния генераторен газ). Нефтеният газ се получава при преработката на нефта и нефтопродуктите. Съставът му е 31 % метан, 14 – 18 % етан, 6 – 15 % пропан, 7 – 15 % пропилен, 4 – 12 % етилен, 6 % бутан и други висши въглеводороди. Доменният газ се получава като страничен продукт при доменното производство. Съставът му е следния: 30 % въглероден окис, 1,5 – 2,5 % водород, 0,1 – 0,4 % етан, 10 – 12 % въглероден диоксид, 56 – 58 % азот.

Посочените данни за състава на отделните горива е ориентиран и зависи от местхождението им или от изходните продукти и технологии за получаването на синтетичните такива.

Газообразното гориво има следните по-важни предимства пред останалите видове горива:

—Отсъствие на остатъчна пепел, в резултат на което горенето е екологично по-чисто.

—Възможност за получаване на по-висока температура на горене в резултат на предварително нагриване на газа и въздуха.

—Възможност за намаляване до минимум на топлинните загуби в резултат на по-доброто смесване на газа и въздуха.

—Удобство в транспортирането му.

Към недостатъците на газообразното гориво са:

—Възможност за отравяне на хора и животни.

—Възможност за образуване на взривоопасни смеси.

—Утечки при транспортирането.

При разглеждане на различните видове горива се използват следните специфични термини:

Работна маса, включваща всички компоненти на горивото. В сила е зависимостта:

$$(5.1) \quad C^P + H^P + S^P + O^P + N^P + A^P + W^P = 100\%,$$

където: A^p е процентното съдържание на пепелта в горивото,

W^p – процентното съдържание на влагата в горивото, останалите събираеми представляват работните маси на химичните елементи в горивото.

Работната маса се означава с индекс "р".

Суша маса, получаваща се след изсушаване на горивото. В сила е зависимостта:

$$(5.2) \quad C^c + H^c + S^c + O^c + N^c + A^c = 100\%.$$

Сухата маса се означава с индекс "с".

Горяща маса, състояща се освен от горимите химични елементи въглерод С, водород Н и сяра S още и от баластните елементи кислород О и азот N, които най-често се намират в свързано състояние с първите. В сила е зависимостта:

$$(5.3) \quad C^r + H^r + S^r + O^r + N^r = 100\%.$$

Горящата маса се означава с индекс "г".

Най-важната топлотехническа характеристика на горивото се явява топлината му на изгаряне Q . Различава се нисша Q_n^p и висша Q_v^p топлина на изгаряне. Висшата топлина на изгаряне Q_v^p отчита цялата топлина, получена при стехиометрично изгаряне и при нормални физични условия -н.ф.у. ($\theta=0^\circ\text{C}$ и $P=0,1\text{ MPa}$) на 1 kg твърдо (течно) или 1 m³ газообразно гориво, включително и топлината, необходима за изпарението на влагата, съдържаща се в горивото и влагата, образувала се при изгарянето на водорода. Нисшата топлина на изгаряне Q_n^p не включва в себе си топлината, необходима за изпарението на влагата в горивото и влагата, получена при изгарянето на водорода. Връзката между двата вида топлини на изгаряне, отнесени за работната маса на горивото е:

$$(5.4) \quad Q_n^p = Q_v^p - 25,14(9H^p + W^p), \text{ kJ/kg, (kJ/m}^3\text{)},$$

където коефициентът 25,14 е свързан със скритата топлина на изпарение на 1 kg вода. (При изгарянето на 1 kg водород се получава 9 kg вода, а за изпарението на 1 kg вода са необходими 2514 kJ топлина.)

Освен топлината на изгаряне горивата се характеризират още с калориметрична, теоретична и действителна температура на горене.

Калориметричната температура на горене θ_k се определя:

$$(5.5) \quad \theta_k = \frac{Q_p}{V_{дг}c}, \text{ } ^\circ\text{C},$$

където: $V_{дг}$ е обемът на димните газове, m^3/kg (m^3/m^3), получени при изгаряне на единица гориво,

c – специфичен топлинен капацитет на димните газове, $\text{kJ}/^\circ\text{C kg}(\text{m}^3)$.

При определяне на калориметричната температура се приема, че температурата на горивото и на въздуха са 0°C , горенето се извършва при теоретично количество въздух, необходимо за пълното окисляване на всички горими вещества. При това цялата получена топлина от горенето се използва за нагряване на газообразните продукти на горенето. Калориметричната температура характеризира химичния състав на горивото и не отчита условията на неговото изгаряне.

Теоретичната температура на горене θ_t се определя:

$$(5.6) \quad \theta_t = \theta_k - \frac{Q_d}{V_{дг}c}, \text{ } ^\circ\text{C},$$

където Q_d е количеството топлина, което се поглъща вследствие дисоциацията на продуктите на горене при изгаряне на единица гориво.

При високи температури на горене – над $1500\text{-}2000^\circ\text{C}$ продуктите на горене се дисоциират на свободни атоми и радикали, например $\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{OH} + \text{H}$ или $\text{CO}_2 \leftrightarrow \text{CO} + \text{O}$, което е съпроводено с поглъщането на топлина.

Действителна температура на горене θ_d се определя:

$$(5.7) \quad \theta_d = \theta_t - \frac{Q_t}{V_{дг}c}, \text{ } ^\circ\text{C},$$

където Q_T е количеството топлина, което се отвежда от зоната на горене към топловъзприемащите ѝ повърхнини, kJ/kg (kJ/m^3).

Чрез действителната температура се отчита реално съществуващият топлообмен в горивната инсталация. Тази температура дава достатъчно точно приближение за качеството на горене. Ориентировъчно действителната температура може да се определи по формулата:

$$(5.8) \quad \theta_d = \theta_k \eta_{\text{пир}}, \text{ } ^\circ\text{C},$$

където $\eta_{\text{пир}}$ е пирометричен коефициент, опитно определен.

Стойността на този коефициент е в границите $\eta_{\text{пир}} = 0,65 - 0,85$ и зависи от вида на горивото и горивната инсталация. Долната граница на този коефициент съответства за твърдо гориво, горната – за газообразно. За течено гориво $\eta_{\text{пир}} = 0,7 - 0,8$.

По-подробни сведения за отделните видове горива могат да се намерят в [21, 42, 68, 72].

Окислител на горивните процеси. Второто условие, за да съществува горене, е наличието на окислител. В живата и в неживата природа протичат най-разнообразни окислителни процеси. В неживата природа с малка скорост се окисляват различни метали до съответните окиси, окисляват се и се разрушават скалните образувания и пр. В живата природа окислителни процеси се извършват в клетъчната тъкан с помощта на доставения от кръвоносната система кислород от въздуха. Различните гнилостни процеси на органичните вещества по същество са също окислителни.

Кислородът, явяващ се като окислителен елемент в процеса горене, се получава най-вече от атмосферния въздух, чийто състав е:

- кислород 20,95 % обемни или 23,14 % масови,
- азот 78,09 % обемни или 75,53 % масови,
- аргон 0,93 % обемни или 1,28 % масови,
- други 0,03 % обемни или 0,05 % масови.

В графата „други“ влизат водни пари, въглероден окис, въглероден диоксид, неон, криптон, водород, ксенон, озон и пр.

Възпламенители на горивните процеси. Третото условие за съществуване на горене е наличието на източник на възпламеняване. Той може да бъде пламък, искра, нагрятото тяло, удар. При използване на пламък за възпламеняване на горивото, горенето се нарича *факелно*. Прилага се и при трите вида горива. При искровото запалване се използва искра, най-често електрическа. Този вид възпламенител се използва при двигателите с вътрешно горене. Газова горяща смес може да се запали, използвайки нагрятото до висока температура (над 1000 °C) тяло. При огнестрелните оръжия запалването на барута се осъществява от удар.

При определени условия (температура и налягане) може да възникне горене и без да е налице източник на възпламеняване. Това е т.нар. *самовъзпламеняване* на някои горива.

Разгледаните необходими условия не са достатъчни за съществуване на горенето. Съществуват още редица фактори, които обуславят условията за горене. Едно от тези условия е достигане на т.нар. *температура на възпламеняване* на горивото. Това е температурата, до която трябва да се нагрее горивото и кислородът, за да може да съществува горене, без да е необходимо да се подвежда отвън топлина. За кибритената клечка тази температура е 170 °C, а за каменните въглища 350 °C. За да съществува горене е необходимо още да е налице едно определено съотношение на горивото и окислителя, под минималната стойност на което горенето е невъзможно. Освен това, горенето е осъществимо, ако освен изброените вече условия е налице определено съотношение между топлоотделянето от горящата смес и топлоотвеждането към околната среда.

5.3. ГОРЕНЕТО КАТО ПРОЦЕС, ЗАМЪРСЯВАЩ ОКОЛНАТА СРЕДА

Горенето, както вече се спомена, може да се разглежда като екзотермична химична реакция, при която се отделя топлина и излъчва светлина. За практиката днес е от значение само първият ефект – получаването на топлина, която се подчинява на физичните закони за топлообмен. При това топлинният ефект на химичната реакция не зависи от междинните ѝ състояния, а зависи само от началните и крайни състояния на реагиращите вещества. Това е

смисълът на закона на Хес.

Например окисляването на въглерода може да стане по начина:



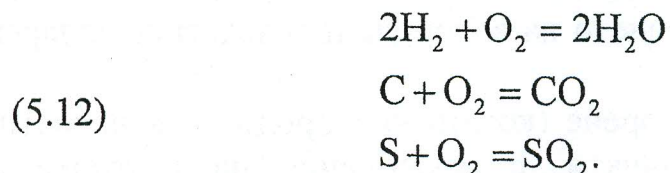
или по начина



Като следствие от закона на Хес

$$(5.11) \quad Q_1 + Q_2 = Q.$$

Ако се приеме, че от практическа значимост при горивните процеси е от значение най-вече получената топлина, то окисляването на основните горими елементи е допустимо да се разгледа само в тяхното начално и крайно състояние, без да се третират междинни състояния на химичните реакции. Съгласно тези уговорки, окисляването на горимите химични елементи протича по следните реакции:



В зависимост от вида на горивото, горенето е хомогенно или хетерогенно. Хомогенно е, когато свойствата на горивната смес по цялата ѝ маса са еднакви. Такова е изгарянето на газообразно гориво, при положение че газта и окислителят са много добре размесени, както се получава при инжекционните горелки, при които газът и въздухът се смесват в специална камера, преди да се извърши самото горене. Хетерогенно е изгарянето на течно и твърдо гориво. При течното гориво в случаите, когато то предварително се изпарява и заедно със съпровождащата го пара се размесва добре с въздуха преди изгарянето му, горенето може да се приеме като хомогенно. Горивните съоръжения за изгаряне на течни горива се наричат *форсунки*. Чрез тях се осъществява механично или парово – въздушно

разпрашаване на течното гориво. Горенето на твърдите горива е типично хетерогенно. В случаите, когато твърдото гориво е доведено до прахообразно състояние, горенето се доближава до хомогенното.

Продуктите, получени при изгарянето на горивата, е прието да се наричат *димни газове*. Съставът на димните газове е показателен както за протичането на горивния процес, така и по отношение на замърсяването на атмосферата. Той се определя от състава на горивото и най-вече от условията, при които протича горенето. Наличието на въглерод, водород, сяра в горивата, а също и на азот във въздуха, отчасти и в горивата, при тяхното окисляване, предопределя получаването на различни продукти в димните газове. До каква степен обаче се е извършило окисляването зависи от това дали горенето е *пълно* или *непълно*. При пълното горене (при което кислородът, в най-общия случай, е в излишък), продуктите в димните газове са: въглероден диоксид, серен диоксид, получени при окисляване съответно на въглерода и сярата; азот, намиращ се в горивото и във въздуха, подаван за горене; азотни окиси, получени при окисляването на азота при високи температури (над $1500 - 2000^{\circ}\text{C}$), при които протичат процеси на дисоциация на продуктите на горене на свободни атоми и свободни радикали; известна част от кислорода, съдържащ се в горивото и във въздуха, постъпващ за горене и водни пари, получени при окисляването на водорода и вследствие изпарението на влагата от горивото.

При непълното горене (когато кислородът е в недостиг) освен изброените вече продукти, с изключение на азотните окиси и свободния кислород, в димните газове могат да се съдържат още въглероден оксид, свободен водород, някои въглеводороди, кетони, алдехиди и други сложни органични съединения [бенз(а)пирен]. Последните се получават в резултат на частично окисляване или въобще на неокисляване на горимите елементи.

В продуктите, получени от изгарянето на твърдо гориво се съдържат още пепел, представляваща негорими минерални отпадъци, сажди, представляващи неокислен въглерод и др.

Така изгарянето на горивата, независимо дали то е пълно или непълно, е свързано със замърсяването на околната среда. При това някои от замърсителите като серен диоксид, азотните окиси, въглеродният оксид, бенз(а)пирен са силно отровни. Чрез подходящо управление на горивните процеси е възможно минимизиране на

замърсителите на околната среда, като същевременно се повишава и енергийната ефективност на горивната инсталация.

5.4. МАТЕРИАЛЕН БАЛАНС НА ГОРИВНИ ПРОЦЕСИ

Материалният баланс на горивните процеси се свежда най-вече до определяне на количеството въздух (окислител), необходим за окисляването на определено количество гориво и до изчисляване на продуктите, получени при неговото изгаряне. По количеството на получените вещества при изгарянето на дадено гориво може да се съди за замърсяването на околната среда. При определен химичен състав на горивото, изразен чрез (5.1), като се вземат предвид химичните реакции (5.12), при пълно горене, масата на окислителя (кислорода) за окисляване на единица маса гориво се определя:

$$(5.13) \quad M_{O_2} = \frac{\frac{8}{3}C^p + 8H^p + 1.S^p - O^p}{100},$$

където C^p , H^p , S^p и O^p са съдържанията съответно на въглерода, водорода, сярата и кислорода в работната маса на горивото в проценти. Коефициентите $8/3$, 8 и 1 се получават от реакциите на окисляване на горимите химични елементи, отчитайки тяхната атомна маса – атомната маса на кислорода е 16 , на въглерода -12 , на водорода -1 , на сярата -32 .

В случай че кислородът се получава от въздуха, както най-често се практикува, масата на въздуха M_v , необходим за окисляване на единица маса гориво е:

$$(5.14) \quad M_v = \frac{\frac{8}{3}C^p + 8H^p + 1.S^p - O^p}{100.0,23},$$

където $0,23$ е масата на кислорода в единица маса въздух.

От (5.14) се определя обемът на въздуха, необходим за окисляването на единица маса гориво, наричан *теоретичен обем въздух* V_T :

$$(5.15) \quad V_T = \frac{\frac{8}{3}C^p + 8H^p + 1.S^p - O^p}{100.0,23.\rho_v},$$

където ρ_v е плътността на въздуха ($\rho_v = 1,293$).

Тъй като се използва една от зависимостите (5.14) или (5.15), може да се определи теоретично необходимата маса или обем въздух за пълното окисляване на единица гориво с известен химичен състав. На практика най-често горенето се извършва с количество въздух, различаващо се от теоретично определеното. Различието се оценява с т.нар. *разходен коефициент на въздуха* α , който се определя:

$$(5.16) \quad \alpha = \frac{V_d}{V_T},$$

където: V_d е действителният обем въздух, подаден за горене на единица маса (обем) гориво,

V_T – теоретичното обемно количество въздух, необходимо за окисляване на същото гориво.

При стойности на $\alpha > 1$ горенето е пълно. Подаваният за окисляване на горивото въздух е повече от теоретично необходимия, в резултат на което се увеличава съдържанието на кислород и азот в димните газове и се намалява температурата на горене вследствие на по-големия обем въздух, участващ в химичната реакция. При стойности на $\alpha < 1$ горенето е непълно, при което температурата на горене намалява, намалява съдържанието на азот в димните газове, липсва кислород в тях.

Изчисляването на количествата продукти, получени при изгарянето на различните горива, може да се извърши въз основа на известен химичен състав на горивото или на базата на газов анализ на димните газове.

Химичният състав на горивото и разходният коефициент на въздуха α определят еднозначно количеството на отделените продукти в димните газове. При пълно изгаряне на горивото, т.е. при $\alpha > 1$ и непротичащи процеси на дисоциация на продуктите на горене, обемът на димните газове $V_{дг}$, получен при изгарянето на един килограм

гориво, се изразява:

$$(5.17) \quad V_{\text{дг}} = V_{\text{сг}} + V_{\text{H}_2\text{O}},$$

където: $V_{\text{сг}}$ е обемът на сухите газове,
 $V_{\text{H}_2\text{O}}$ – обем на водните пари.

Обемът на сухите газове се изразява:

$$(5.18) \quad V_{\text{сг}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2}.$$

Обемът на получения въглероден диоксид V_{CO_2} се определя, като се изходи от (5.12) с отчитане на атомната маса на реагиращите елементи, работната маса на въглерода в горивото C^p и плътността на въглеродния диоксид ρ_{CO_2} :

$$(5.19) \quad V_{\text{CO}_2} = \frac{M_{\text{CO}_2}}{\rho_{\text{CO}_2}} = \frac{44}{12} \frac{C^p}{100} \frac{1}{\rho_{\text{CO}_2}}.$$

Като се вземе предвид, че $\rho_{\text{CO}_2} = 1,963$, то (5.19) придобива вида:

$$(5.19') \quad V_{\text{CO}_2} = 0,0186 \cdot C^p.$$

По аналогичен начин за обема на серните окиси, получени при изгарянето на килограм гориво се получава:

$$(5.20) \quad V_{\text{SO}_2} = \frac{M_{\text{SO}_2}}{\rho_{\text{SO}_2}} = \frac{64}{32} \frac{S^p}{100 \cdot 2,974} = 0,00682 \cdot S^p,$$

където S^p е работната маса на сярата в горивото,

$\rho_{\text{SO}_2} = 2,974$ –плътност на серния диоксид.

Обемът на азота в димните газове се определя от съдържанието на азот в горивото и от азота, внесен в горивната камера с въздуха за горене. Обемът на азота, внесен с въздуха за горене е $0,79V_{\text{д}}$, приемайки че в действителния обем въздух $V_{\text{д}}$ азотът съставлява 79 %.

Като се вземе предвид (5.16), то за обема на азота в димните газове, получени при изгарянето на килограм гориво, се получава:

$$(5.21) \quad V_{N_2} = \frac{N^p}{100 \cdot \rho_{N_2}} + 0,79\alpha V_T = 0,008 \cdot N^p + 0,79\alpha V_T,$$

където N^p е работната маса на азота в горивото,

$\rho_{N_2} = 1,25$ – плътност на азота.

Теоретичният обем въздух V_T се определя по (5.15).

За обема на свободния кислород в димните газове V_{O_2} се получава:

$$(5.22) \quad V_{O_2} = 0,21(V_d - V_T) = 0,21(\alpha - 1)V_T.$$

В последната формула не участва работната маса на кислорода O^p , съдържаща се в горивото, както и кислородът в теоретичния обем въздух, необходим за горене, тъй като този кислород участва в окислителните процеси.

Обемът на водните пари в димните газове се определя:

$$(5.23) \quad V_{H_2O} = \frac{M_{H_2O}}{\rho_{H_2O}},$$

където M_{H_2O} е масата на водните пари, получени при изгарянето на водорода в горивото и от масата на влагата в самото гориво W^p , подавано за горене,

ρ_{H_2O} – плътност на водните пари ($\rho_{H_2O} = 0,804$).

В такъв случай за масата на водните пари M_{H_2O} се получава:

$$(5.24) \quad M_{H_2O} = \frac{36}{4} \frac{H^p}{100} + \frac{W^p}{100} = \frac{9H^p + W^p}{100}.$$

Така за обема на водните пари в димните газове при изгарянето

на един килограм гориво се получава:

$$(5.25) \quad V_{H_2O} = \frac{M_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} = \frac{9H^p + W^p}{100.0,804} = 0,111H^p + 0,0124W^p.$$

Така окончателно обемът на димните газове $V_{дг}$, получени при пълно изгарянето на единица маса гориво, се изразява:

$$(5.26) \quad V_{дг} = 0,0186C^p + 0,00682S^p + 0,008N^p + 0,79\alpha V_t + \\ + 0,21(\alpha - 1)V_t + 0,111H^p + 0,0124W^p.$$

С (5.26) може по аналитичен път да се определя съставът на димните газове, получени при изгарянето на гориво, чийто състав е известен. Тази формула е теоретична. Тя не отчита образуваните се азотни окиси при температури по-високи от 1500°C или образуването на въглероден монооксид при ниски стойности на разходния коефициент. Тези неотчетени от (5.26) реалности при $\alpha > 1$ отпадат, ако съставът на димните газове се определя чрез газов анализ.

5.5 ИЗЧИСЛЯВАНЕ НА РАЗХОДНИЯ КОЕФИЦИЕНТ НА ВЪЗДУХА

Разходният коефициент на въздуха α се оказва най-съществената величина при управлението на горивните процеси. Това налага неговото точно определяне. Коефициентът α може да бъде определен по данни от газовия анализ на димните газове или чрез разхода на горивото и въздуха, постъпващи за горене. По определение

$$(5.16) \quad \alpha = \frac{V_d}{V_t}.$$

При $\alpha > 1$ теоретичният обем въздух V_t може да се изрази:

$$(5.27) \quad V_{\text{т}} = V_{\text{д}} - V_{\text{изл}},$$

където $V_{\text{изл}}$ е излишният обем въздух, с който теоретичният обем въздух се различава от действителния обем въздух.

Така, като се използва (5.27), (5.16) придобива вида:

$$(5.28) \quad \alpha = \frac{V_{\text{д}}}{V_{\text{т}}} = \frac{V_{\text{д}}}{V_{\text{д}} - V_{\text{изл}}} = \frac{1}{1 - \frac{V_{\text{изл}}}{V_{\text{д}}}}.$$

Отделните компоненти $V_{\text{изл}}$ и $V_{\text{д}}$ могат да бъдат определени съответно чрез съдържанието на кислород и азот в димните газове. За целта се изхожда от следните зависимости:

$$(5.29) \quad \begin{aligned} &\text{На 100 единици въздух} \rightarrow 21 \text{ единици са кислород,} \\ &\text{на } V_{\text{изл}} \text{ единици въздух} \rightarrow \frac{O_2 V_{\text{дг}}}{100} \text{ единици са кислород,} \end{aligned}$$

откъдето:

$$(5.30) \quad V_{\text{изл}} = \frac{O_2 V_{\text{дг}}}{21}.$$

Аналогично

$$(5.31) \quad \begin{aligned} &\text{На 100 единици въздух} \rightarrow 79 \text{ единици са азот,} \\ &\text{на } V_{\text{д}} \text{ единици въздух} \rightarrow \frac{N_2 V_{\text{дг}}}{100} \text{ единици са азот,} \end{aligned}$$

откъдето:

$$(5.32) \quad V_{\text{д}} = \frac{N_2 V_{\text{дг}}}{79},$$

където 21 и 79 са процентите обемни части съответно на кислорода и азота във въздуха, подаван за горене,

O_2 и N_2 – процентното съдържание съответно на кислорода и азота в димните газове.

Като се заместят (5.30) и (5.32) в (5.28), се получава т.нар. *азотна формула* за изчисляване на разходния коефициент на въздуха:

$$(5.33) \quad \alpha = \frac{1}{1 - \frac{V_{\text{изл}}}{V_{\text{д}}}} = \frac{1}{1 - \frac{O_2 \cdot V_{\text{дг}}}{21 - \frac{N_2 \cdot V_{\text{дг}}}{79}}} = \frac{1}{1 - \frac{79 \cdot O_2}{21 \cdot N_2}}.$$

Съгласно (5.33) разходният коефициент на въздуха може да се определя по съдържанието на кислород и азот в димните газове.

В [72] е дадена следната формула за определяне на съдържанието на въглероден оксид в димните газове:

$$(5.34) \quad CO = \frac{21 - (1 + \beta)RO_2 - O_2}{0,605 + \beta},$$

където β е характеристичен коефициент на горивото, чиято стойност за различните горива се дава в специалната литература [42],

RO_2 е общото обозначение на въглеродния диоксид и серния диоксид в димните газове.

При пълно изгаряне на горивото $CO = 0$ и тогава от (5.34) се получава:

$$(5.35) \quad RO_2 = \frac{21 - O_2}{1 + \beta}.$$

Ако пълното изгаряне се извършва при теоретичния обем въздух, т.е. при $\alpha = 1$, то в димните газове ще отсъства свободен кислород, а RO_2 съгласно (5.35) ще придобие максимална стойност, т.е.

$$(5.36) \quad (RO_2)_{\text{max}} = \frac{21}{1 + \beta}.$$

Количеството диоксиди $(RO_2)_{\text{max}} \cdot V_{\text{т}}$ в случая при $\alpha = 1$, т.е. при теоретичен обем въздух $V_{\text{т}}$, е равно на количеството диоксиди $RO_2 \cdot V_{\text{д}}$ при $\alpha > 1$, т.е. при действителния обем въздух $V_{\text{д}}$, тъй като и в двата случая е налице пълно окисляване на въглерода и сярата. Концентрациите обаче в двата случая са различни, т.е. $(RO_2)_{\text{max}} \neq RO_2$, тъй като $V_{\text{т}} \neq V_{\text{д}}$. Следователно в сила е:

$$(5.37) \quad (RO_2)_{\max} \cdot V_{\tau} = (RO_2) \cdot V_d.$$

От последната зависимост се получава т.нар. *карбонатна формула* за изчисляване на разходния коефициент на въздуха:

$$(5.38) \quad \frac{V_d}{V_{\tau}} = \alpha = \frac{(RO_2)_{\max}}{RO_2}.$$

Най-често RO_2 се отъждествява с въглеродния диоксид поради малките концентрации на серния диоксид в димните газове. Ако (5.38) се изрази чрез (5.35) и (5.36), то разходният коефициент на въздуха α се изразява:

$$(5.39) \quad \alpha = \frac{(RO_2)_{\max}}{RO_2} = \frac{21}{21 - O_2}.$$

Това е т.нар. *кислородна формула* за изчисляване на разходния коефициент на въздуха. Поради това, че за определянето на α се изисква измерването само на съдържанието на кислород в димните газове, то тази кислородна формула е намерила най-голямо приложение в практиката в сравнение с азотната и карбонатна формула.

Разходният коефициент на въздуха може да бъде определен и чрез съотношението k гориво – въздух, използвано като регулируема величина при управлението на горивни процеси. Това съотношение k се изразява:

$$(5.40) \quad k = \frac{F_{\text{д възд}}}{F_{\text{д гор}}},$$

където $F_{\text{д възд}}$ и $F_{\text{д гор}}$ са действителните разходи на въздуха и горивото, постъпващи към горивната инсталация.

Като се изходи от (5.16) и се доразвие, използвайки (5.40), се получава:

$$(5.41) \quad \alpha = \frac{V_{\text{д}}}{V_{\text{т}}} = \frac{F_{\text{д възд}}}{F_{\text{т възд}}} = \frac{k F_{\text{д гор}}}{\gamma \cdot F_{\text{д гор}}} = \frac{k}{\gamma},$$

където: $F_{\text{д възд}}$, $F_{\text{т възд}}$ са съответно действителният и теоретичният разход на въздуха,

γ – коефициент на пропорционалност между теоретичния разход на въздух и действителния разход на горивото.

Съгласно (5.41) съотношението гориво – въздух k е пропорционално на разходния коефициент на въздуха α .

5.6. ТОПЛИНЕН БАЛАНС НА ГОРИВНА ИНСТАЛАЦИЯ

Топлинният баланс на горивна инсталация изразява равенството между прихода и разхода на топлина. В най-общ вид уравнението на топлинния баланс при изгарянето на единица гориво има вида:

$$(5.42) \quad Q_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{г}} + Q_{\text{в}} = Q_{\text{т}} + Q_{\text{и}} + Q_{\text{х}} + Q_{\text{м}} + Q_{\text{ст}}, \text{ kJ}.$$

Получената топлина се отнася за единица количество гориво (kg или m^3). Отделните означения в (5.42) са, както следва:

$Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ в kJ е нисшата топлина на изгаряне на единица гориво;

$Q_{\text{г}} = 1 c_{\text{г}} \theta_{\text{г}}$, kJ – топлина, внесена от единицата гориво с температура $\theta_{\text{г}}$ и специфичен топлинен капацитет $c_{\text{г}}$;

$Q_{\text{в}} = c_{\text{в}} \theta_{\text{в}} M_{\text{д}}$, kJ – топлина, внесена от действителното количество въздух $M_{\text{д}}$, със специфичен топлинен капацитет $c_{\text{в}}$ и температура $\theta_{\text{в}}$, изразходвана за окисляването на единицата количество гориво;

$Q_{\text{т}}$, kJ – полезното количество топлина от единица количество гориво, което се предава от горящите продукти към топовъзприемащите повърхнини в горивната инсталация. Тази топлина в общия случай се предава чрез трите вида топлообмен, т.е. $Q_{\text{т}} = Q_{\text{к}} + Q_{\text{тп}} + Q_{\text{л}}$, като

$Q_{\text{к}} = S \alpha \Delta \theta t$ в kJ е количеството топлина, предадено чрез конвективен топлообмен при площ на топлообмена S , коефициент на конвективния топлообмен α , температурна разлика при топлообмена

$\Delta\theta$ и продължителност на топлоотдаването t ;

$$Q_{\text{тп}} = S \frac{\lambda}{d} \Delta\theta t, \text{ kJ} - \text{количество топлина, предадено чрез}$$

топлопроводност при коефициент на топлопроводност λ и дебелина на материала d ;

$$Q_{\text{л}} = S_1 c \varepsilon \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] t, \text{ kJ} - \text{количество топлина,}$$

предадено чрез топлолъчение от повърхнина на лъчение S_1 с температура на излъчващото тяло T_1 (K) и температура на топовъзприемащото тяло T_2 (K), с приведен коефициент на топлоизлъчване ε и константа на Болцман c ;

$Q_{\text{и}} = c_{\text{и}} M_{\text{и}} \theta_{\text{и}}, \text{ kJ} - \text{топлинни загуби от изходящите димни газове, с маса } M_{\text{и}}, \text{ специфичен топлинен капацитет } c_{\text{и}} \text{ и температура } \theta_{\text{и}};$

$Q_{\text{х}} = V_{\text{с}} Q_{\text{нг}}, \text{ kJ} - \text{топлинни загуби от химично недоизгаряне на горивото, получени от обема на сухите газове } V_{\text{с}} \text{ при изгарянето на единица маса гориво и топлина } Q_{\text{нг}} \text{ на неизгорелите газове, съдържащи се в } 1 \text{ m}^3 \text{ сухи изгорели газове, изразяваща се:}$

$$Q_{\text{нг}} = 126,40 \cdot \text{CO} + 107,80 \cdot \text{H}_2 + 358,30 \cdot \text{CH}_4 + \dots, \text{ kJ/m}^3,$$

при което CO, H₂, CH₄ са процентното съдържание на въглероден окис, водород, метан и пр. в димните газове, а коефициенти пред тях представляват нисшата топлина на изгаряне на съответни вещества и елементи, разделени на сто. (Загубите от химично недоизгаряне се дължат на неосъщественото докрай окисляване на горимите химични елементи и вещества в горивото, поради малката продължителност на престояване на горивото в горивната камера или поради недостиг на въздух);

$Q_{\text{м}} = m \cdot 33910, \text{ kJ} - \text{топлинни загуби от механично недоизгаряне най-вече при твърдо гориво, като } m \text{ е масата на механично недоизгорелите частици в } 1 \text{ kg} \text{ димни газове (33910 е нисшата топлина на изгаряне на въглерода, kJ/kg). Те се дължат на наличието на въглерод в димните газове, който въобще не е влязъл в химично взаимодействие с кислорода било поради малката продължителност на престояване на горивото в горивната камера, било поради недостиг}$

на кислород;

$Q_{\text{ст}} = S_{\text{ст}} q_{\text{ст}} t$, kJ – топлинни загуби през стените на горивната инсталация с площ $S_{\text{ст}}$ към обкръжаващата среда за време t и плътност на топлинния поток $q_{\text{ст}}$, изразяващ се:

$$q_{\text{ст}} = \alpha (T_{\text{ст}} - T_{\text{а}}) + c\varepsilon \left[\left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{а}}}{100} \right)^4 \right], \text{kJ/s.m}^2 \text{ като } T_{\text{ст}} \text{ и } T_{\text{а}}$$

са абсолютните температури съответно на външната повърхност на стените на горивната камера и на атмосферата, останалите коефициенти са същите, участващи в конвективния и лъчистия топлообмен.

При изгарянето на твърдо гориво в дясната част на уравнението на топлинния баланс е налице още една компонента, отчитаща топлината, която се изнася от горивната инсталация при изхвърляне на остатъка от изгорялото твърдо гориво (напр. шлака).

Ако се приеме, че $Q_{\text{г}}$ и $Q_{\text{в}}$ са несъизмерими с нисшата топлина на горене на горивото, то (5.42) придобива вида:

$$(5.43) \quad Q_{\text{н}}^{\text{р}} = Q_{\text{т}} + Q_{\text{и}} + Q_{\text{х}} + Q_{\text{м}} + Q_{\text{ст}}.$$

При съвременните горивни инсталации по-голямата част от топлината на димните газове се използва било за предварително подгряване на въздуха и горивото, било за други цели, т.е. $Q_{\text{и}}$ не би трябвало да се третира като топлинни загуби. Така (5.43) се представя:

$$(5.44) \quad Q_{\text{н}}^{\text{р}} = Q_{\text{т}} + Q_{\text{и}} + \Sigma Q_{\text{заг}},$$

където $Q_{\text{заг}}$ са сумарните топлинни загуби,
($\Sigma Q_{\text{заг}} = Q_{\text{х}} + Q_{\text{м}} + Q_{\text{ст}}$)

От стойността на тези загуби се определя и коефициентът на полезно действие η на горивната инсталация:

$$(5.45) \quad \eta = \frac{Q_{\text{т}} + Q_{\text{и}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}} 100\%.$$

Като се отчете (5.44), (5.45) придобива вида:

$$(5.46) \quad \eta = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}} - \Sigma Q_{\text{заг}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}} = 1 - \frac{\Sigma Q_{\text{заг}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}.$$

При известни: к.п.д. на горивната инсталация η ; нисшата топлина на изгаряне на използваното гориво и необходимата топлинна мощност на горивната инсталация N може да се определи масовият разход на горивото $F_{\text{г}}$:

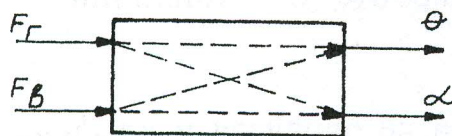
$$(5.47) \quad F_{\text{г}} = \frac{N}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot \eta}.$$

При променлива стойност на нисшата топлина на изгаряне на горивото, постоянна топлинна мощност на горивната инсталация се осигурява чрез променлив разход на горивото.

5.7. УПРАВЛЕНИЕ НА ГОРИВНИ ПРОЦЕСИ

Управлението на горивните процеси има много съществено значение за пълноценното превръщане на химичната енергия на горивата в топлинна и минимизиране на вредните компоненти, съдържащи се в димните газове. Управлението на тези процеси е една от възможностите за повишаване на енергийната ефективност и намаляване замърсяването на околната среда

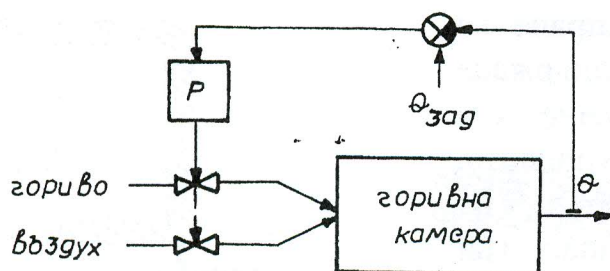
Всеки горивен процес като обект за управление, може да се представи със структурната схема от фиг. 5.1. Регулируеми величини



Фиг.5.1

са температурата θ в горивната камера и разходният коефициент на въздуха α . Регулиращите въздействия са разходът на горивото $F_{\text{г}}$ и разходът на въздух $F_{\text{в}}$. Така представеният обект е двусвързан.

Характерното за него е, че той е със значителна инерционност по сепаратния канал " $\theta - F_{\text{г}}$ " и по кръстосаната връзка " $\theta - F_{\text{в}}$ ", предопределена от протичащия топлообмен в горивната камера. По



Фиг.5.2

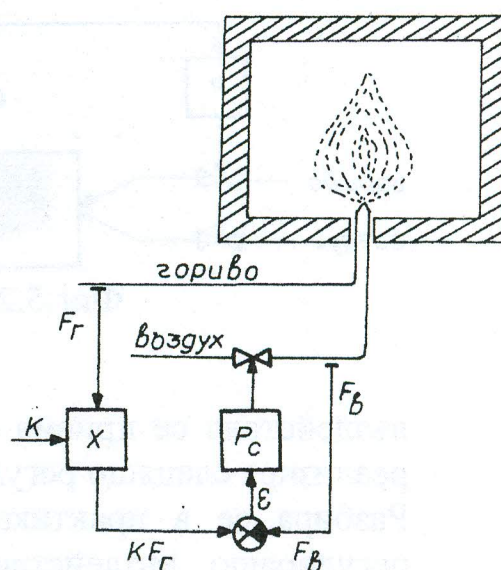
другия сепаратен канал " $\alpha - F_B$ " и кръстосаната връзка " $\alpha - F_T$ ", обектът е почти безинерционен поради почти мигновеното смесване на въздуха с горивото.

При управлението на горивни процеси, най-често едно от регулиращите

въздействия се приема за водещо, а другото – за водено, с което се реализира следящо регулиране. По принцип този избор е без значение. Разбира се в практиката има случаи, когато изборът на водещо регулиращо въздействие е предварително определен (напр. при изгарянето на допълнително гориво природен газ през фурмите на доменните пещи), но те са изключения. В определени случаи в процеса на горене може да се променя водещото регулиращо въздействие от гледна точка на безопасност на функциониране на горивната инсталация – най-вече при използване на газообразно гориво. При останалите видове горива обикновено горивото се приема за водещо въздействие, а въздухът – за водено.

В практиката се прилагат няколко типа схеми за управление на горивни процеси в промишлени инсталации. Най-простата и същевременно исторически най-стара е т.нар. схема на регулиране със сдвоен клапан, показана на фиг. 5.2. По измерваната температура θ , регулаторът P изменя разхода на гориво, с оглед нейната стабилизация в горивната камера. Регулиращият орган за гориво е сдвоен с регулиращия орган за въздух, така че изменението на положението на първия регулиращ орган води до пропорционално изменение на положението на втория регулиращ орган. Единственото предимство на тази схема на регулиране на горивния процес е нейната простота и надеждност. С тази схема може да се осигури само постоянно отношение на светлите сечения на регулиращите органи за гориво и въздух. Това обаче е съвсем недостатъчно за правилното протичане на горивния процес, тъй като не се гарантира протичането на стехиометрична реакция при горивния процес. Ето защо този вид регулиране на горивни процеси не трябва да се използва, особено в случаите, когато ефективното използване на горивата е от първостепенно значение.

Друг подход за регулиране на горивния процес е чрез поддържане на определено съотношение на налягането на въздуха и горивото. Този подход е по-добър от използването на сдвоен клапан, тъй като при изменение налягането на водещия параметър се изменя автоматично и налягането на водения параметър. За целта се използва регулатор с пряко действие, със специална конструкция, монтиран на линията на водения параметър. Водеща фирма за производството на такива регулатори е Kromschroder [93].



Фиг. 5.3

Предимството на този подход е простотата и надеждността на регулиране. Реализира се пропорционален или интегрален закон на регулиране. Последният е напълно достатъчен за постигане на необходимата точност на поддържане на съотношението на налягане на горивото и въздуха. Недостатък на регулирането на горивния процес чрез съотношението на наляганията на горивото и въздуха е, че при изменение на температурата и влажността на въздуха е необходима корекция за изменение на това съотношение. Различни фирми са намерили решение на този проблем чрез усложняване на конструкцията на регулатора с пряко действие. Независимо от това системата за регулиране на горивния процес чрез съотношението на наляганията на горивото и въздуха по същество си остава отворена, тъй като липсва информация за резултата от горенето и следователно са и присъщи всички недостатъци на отворените системи за автоматично регулиране.

Следващото подобрение на регулирането на горивните процеси се явява поддържането на определено съотношение на разходите на горивото F_r и на въздуха F_b – фиг. 5.3. На входа на регулатора за съотношение P_c се подава грешката ε , определена като:

$$(5.48) \quad \varepsilon = kF_r - F_b,$$

където k е коефициент на пропорционалност.

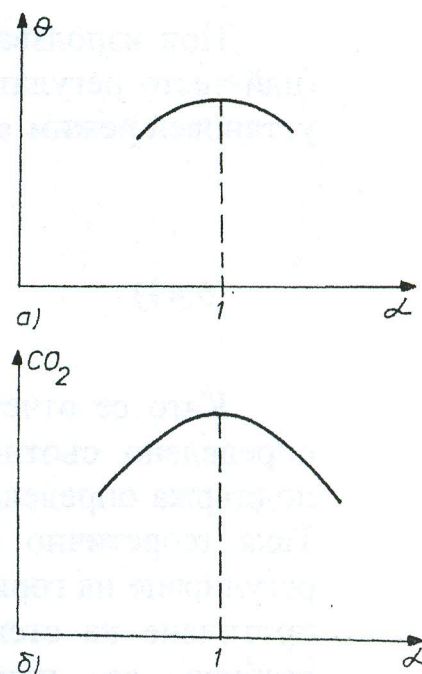
При използване на интегрална съставка в закона на регулиране (най-често регулаторът P_c от фиг. 5.3 реализира интегрален закон) в установен режим $\varepsilon = 0$, при което

$$(5.49) \quad k = \frac{F_B}{F_r}.$$

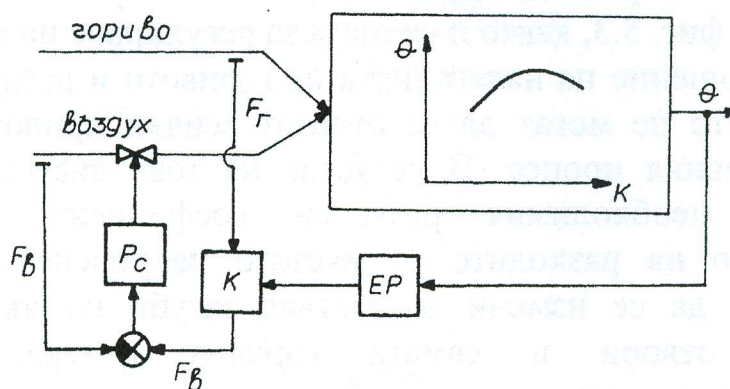
Като се отчете (5.41), то се установява, че с поддържането на определено съотношение на разходите на горивото и въздуха се поддържа определена стойност на разходния коефициент на въздуха. Така теоретично се доказва, че показаната на фиг. 5.3 система за регулиране на горивния процес е в състояние да осигури условието за протичане на стехиометрична реакция на окисляване на горивото, разбира се при необходимите температурни корекции при измерването на разход, както и корекции по влажност при газовете. Схемата от фиг. 5.3, както и схемата за регулиране на горивния процес чрез съотношение на наляганията на горивото и въздуха, е отворена, поради което не могат да се отчитат всички приложени смущения върху горивния процес. В резултат на това системата от фиг. 5.3 гарантира необходимия разходен коефициент в мястото на измерването на разходите. В мястото на горене картината може значително да се измени вследствие загуби по въздухопровода и различни отвори в самата горивна камера. Загубите по въздухопровода може да се считат изразени с намаляване на разходния коефициент на въздуха със стойност 0,01 на всеки 10 m негова дължина. Независимо от посочените недостатъци, схемата за регулиране на горивния процес чрез съотношението на разходите на горивото и въздуха засега е намерила най-широко приложение в практиката.

Като следващо усъвършенстване на управлението на горивни процеси се смятат екстремалните системи. На фиг. 5.4а) и б) са показани типични екстремални характеристики на горенето. Екстремалните стойности теоретично се явяват при $\alpha = 1$. При $\alpha < 1$ горенето е непълно, поради което температурата θ и концентрацията на CO_2 са по-ниски от максималните си стойности. При $\alpha > 1$ горенето е пълно, но по-голямото

количество въздух намалява както температурата, така и концентрацията на CO_2 в горивната камера. Тези статични характеристики могат да се използват за реализиране на екстремално регулиране. На фиг. 5.5 е показана екстремална система за регулиране на горивен процес по температурата в горивната камера. Екстремалният регулатор ЕР чрез своите пробни въздействия в установен режим поддържа такава стойност на съотношението на разходите на въздуха и горивото k , че да се постига най-високата температура на горене, респ. най-висока концентрация на въглероден диоксид.



Фиг. 5.4

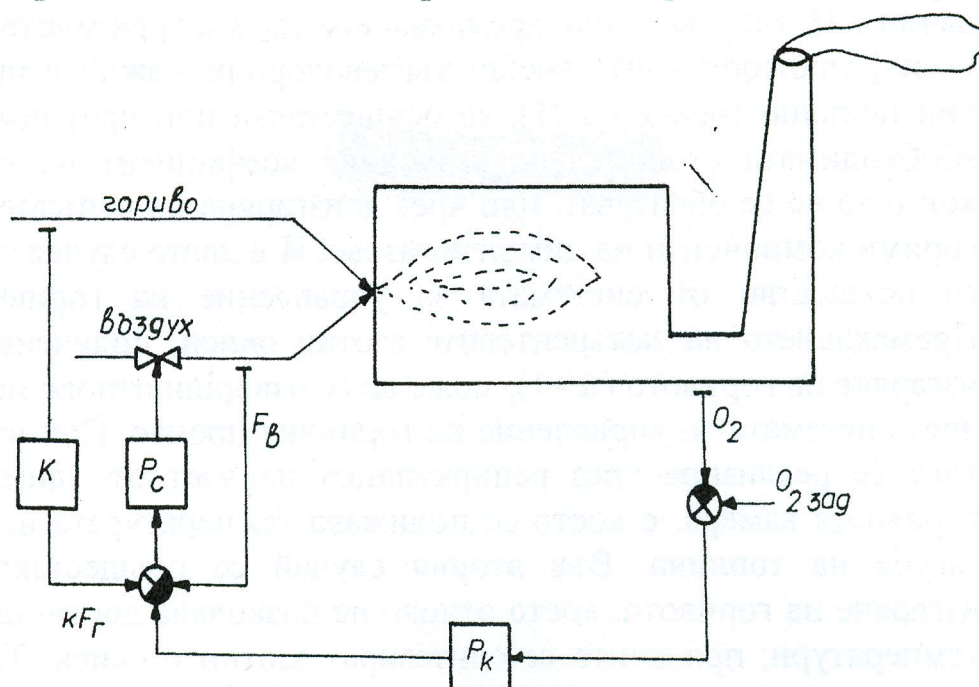


Фиг. 5.5

Системата по същество е затворена, в резултат на което се отчитат всички смущаващи въздействия, приложени към горивния процес. Недостатък на системата е неудобството при измерването на температурата на горене, което е свързано с определени трудности. Трудностите нарастват при управление на горивен процес, при който изгарянето на горивото се осъществява с повече от една горелка. Спрямо разгледаните подходи този се оказва и най-скъп.

Следващо усъвършенстване на управлението на горивни процеси се постига с осъществяването на газов анализ на димните газове. Най-подходяща се оказва кислородната формула (5.39), чрез която, ако се поддържа определено съдържание на кислород в димните газове, то се

гарантира желана стойност на разходния коефициент на въздуха.



Фиг.5.6

Този подход се илюстрира чрез схемата от фиг. 5.6. По същество тя е каскадна схема. Вътрешният контур с регулатора P_c реализира определено съотношение k на разходите на горивото и въздуха. Външният контур, включващ регулатора P_k , коригира това съотношение k в зависимост от съдържанието на кислород в димните газове, респ. от стойността на реалния разходен коефициент на въздуха. Системата е затворена, тъй като основна регулируема величина се явява съдържанието на кислород в димните газове. По този начин става възможно да се отработват всякакви смущаващи въздействия, приложени към горивния процес. Недостатък на разгледаната система е високата цена на газоанализаторите, което оправдава тяхното използване в случаите на мощни горивни инсталации.

Така съвременните системи за управлението на горивните процеси в промишлени горивни инсталации позволяват да се създадат условията, при които се осъществява най-пълно преобразуването на химичната енергия на горивата в топлина, като същевременно се минимизират всички замърсители на околната среда, получени при изгарянето на горивата, с изключение на серните окиси.

(Неутрализирането на последните се осъществява по технологичен начин.) И действително премахването на замърсителите въглероден оксид, канцерогенните висши въглеводороди, сажди и пр., получени при непълно горене ($\alpha < 1$), се осъществява или чрез поддържане на необходимата стойност на разходния коефициент на въздуха, при която те не се образуват, или чрез доизгаряне на непълно окислените горими компоненти на димните газове. И в двата случая това може да се осъществи от системата за управление на горивния процес. Премахването на замърсителите азотни окиси, получени при пълно изгаряне на горивото ($\alpha > 1$), може да се извърши отново по два начина чрез системата за управление на горивния процес. При първия начин това се реализира чрез рецикулация на част от димни газове в горивната камера, с което се понижава температурата на горене, без загуба на топлина. Във втория случай се осъществява поетапно изгаряне на горивото, което отново не позволява достигане на високи температури, при които се синтезират азотните окиси. Тези въпроси по-пълно са изяснени в [52].