

3 ОСНОВИ САГОРЕВАЊА

Као што је познато, сагоревање представља сложен физичко-хемијски процес оксидације горива праћен интензивним ослобађањем топлоте. У наставку, процес сагоревања ће бити разматран крајње упрошћено: шта улази у процес и шта из њега излази (Слика 3.1).

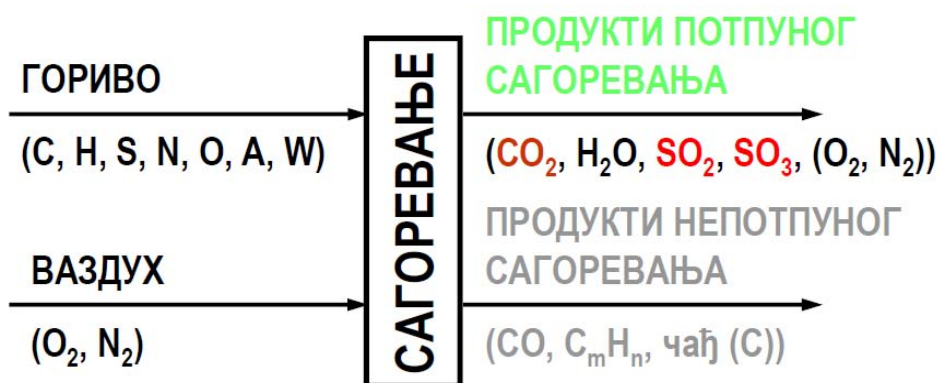


Слика 3.1: Шематски приказ процеса сагоревања

За одвијање процеса сагоревања, поред одређеног степена загрејаности горива неопходно је потребна и одређена количина кисеоника. Зависно од количине кисеоника доведене у процес, сагоревање може бити потпуно или непотпуно (Слика 3.2). При потпуном сагоревању, у општем случају, продукте сагоревања чине:

- CO_2 – настао сагоревањем угљеника из горива,
- H_2O – настала сагоревањем водоника из горива,
- SO_2 – настао сагоревањем сумпора из горива,
- N_2 – азот из ваздуха који се користи за остварење процеса сагоревања и из горива,
- O_2 – кисеоник из ваздуха који се користи за остварење процеса сагоревања.

Док* угљен-диоксид, водена пара односно вода и сумпор-диоксид представљају праве продукте сагоревања, азот и кисеоник чине условне продукте сагоревања.

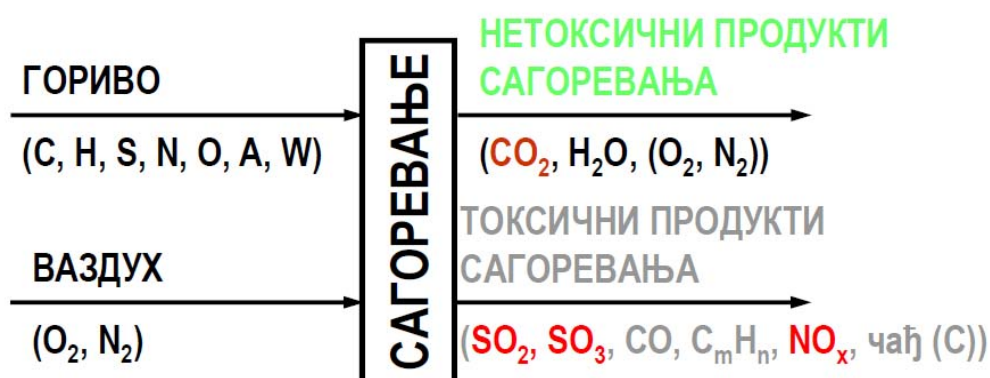


Слика 3.2. Подела продуката сагоревања према критеријуму потпуности сагоревања

* Напомена: И поред тога што је CO_2 нетоксичан гас, треба водити рачуна да је он један од главних узрочника настајања ефекта „стаклене баиште“ – загревања планете Земље.

При непотпуном сагоревању, поред продуката потпуног сагоревања налазе се и гориве компоненте, које би, да је сагоревање било потпуно, ослободиле количину топлоте коју садрже. Продукти непотпуног сагоревања су:

- CO - настао непотпуним сагоревањем угљеника из горива,
- C_mH_n - несагорели угљоводоници,
- H_2 - водоник, и
- C - угљеник у чађи, пепелу и др.



Слика 3.3: Подела продуката сагоревања према критеријуму токсичности

Теоријски посматрано сагоревање ће бити увек потпуно, ако је количина кисеоника, доведена у процес већа или најмање једнака теоријској количини кисеоника за потпуно сагоревање и обрнуто: сагоревање ће бити увек непотпуно, ако је количина кисеоника која учествује у процесу сагоревања мања од теоријске. Потпуним сагоревањем ослобађа се укупна, максимална количина топлоте, садржана у гориву, док при непотпуном постоје увек одређени губици.

Процес сагоревања може; бити савршен и несавршен. И поред обезбеђивања довољне количине кисеоника за потпуно сагоревање и веће од теоријске, у продуктима сагоревања налазе се несагореле компоненте горива - услед несавршености процеса.

Зависно од агрегатног стања компонената које учествују у процесу (горива и оксидатора - најчешће ваздух) сагоревање може бити хомогено, ако су гориво и ваздух у истом агрегатном стању (пример сагоревања гасовитих горива) и хетерогено, ако су гориво и ваздух у различитим агрегатним стањима (пример сагоревања чврстог горива - угаљ).

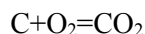
3.1 СТЕХИОМЕТРИЈСКЕ ЈЕДНАЧИНЕ САГОРЕВАЊА

Једначине које дефинишу:

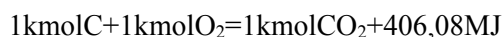
- у којим се међусобним односима једине угљеник, водоник и сумпор са кисеоником,
 - колика је теоријска количина кисеоника, односно, ваздуха потребна за потпуно сагоревање,
 - која количина продуката сагоревања настаје, као и
 - која количина топлоте се том приликом ослобађа,
- називају се стехиометријске једначине сагоревања. Ове једначине, написане за све гориве елементе, истовремено омогућавају одговарајући прорачун за било које реално гориво.

3.1.1 СТЕХИОМЕТРИЈСКА ЈЕДНАЧИНА САГОРЕВАЊА УГЉЕНИКА

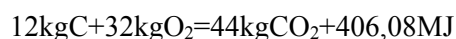
Реакција потпуног сагоревања угљеника може се изразити једначином:



Узимајући за јединицу количине 1 kmol, добија се:



односно

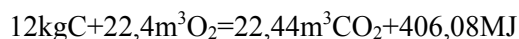


или

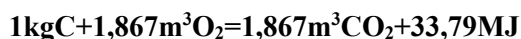
$$1 \text{ kg } C + \frac{8}{3} \text{ kg } O_2 = \frac{11}{3} \text{ kg } CO_2 + 33,79 \text{ MJ}$$

Горња једначина представља класичну стехиометријску једначину: за потпуно сагоревање једног килограма угљеника неопходно је потребна количина од 8/3 kg кисеоника, при том настаје 11/3 kg угљен-диоксида и развија се количина топлоте од 33,79 MJ.

Она се може, зависно од начина изражавања представити и на следећи начин:



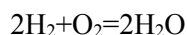
или



То значи да, аналогно претходном ставу, један килограм угљеника при потпуном сагоревању троши 1,867 кубних метара кисеоника, као резултат процеса настаје 1,867 кубних метара угљен-диоксида и количина топлоте од 33,79 MJ.

3.1.2 СТЕХИОМЕТРИЈСКА ЈЕДНАЧИНА САГОРЕВАЊА ВОДОНИКА

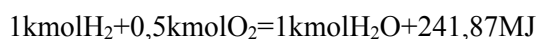
Реакција потпуног сагоревања водоника изражава се једначином:



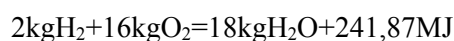
Узимајући, као и раније, за јединицу количине 1 kmol, добија се:



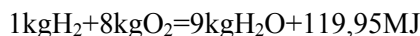
Количина топлоте Q која настаје сагоревањем једног килограма водоника може имати две вредности, зависно од тога да ли је вода охлађена на околну температуру или остаје у парном стању. За случај када се водена пара налази у парном стању добија се нешто мања количина топлоте (мања за топлоту добијену кондензацијом водене паре) која износи 271,87 MJ/kmol, па горња једначина гласи:



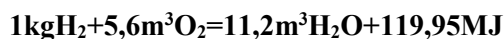
или



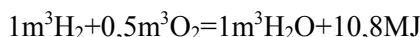
Напомена: Количина топлоте настала сагоревањем 1 kg водоника није једнака половини вредности 241,87 MJ, јер је тачна вредност молекулске масе водоника 2,016, а не 2, како је у једначинама, због једноставности писано. Стехиометријска једначина сагоревања водоника гласиће, онда:



Стехиометријска једначина сагоревања водоника може се написати и на следећи начин:

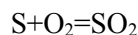


или

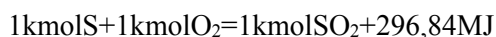


3.1.3 СТЕХИОМЕТРИЈСКА ЈЕДНАЧИНА САГОРЕВАЊА СУМПОРА

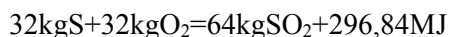
Реакција потпуног сагоревања сумпора гласи:



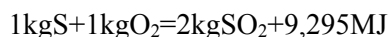
односно



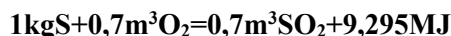
или



Стехиометријска једначина сагоревања јединице масе сумпора, коначно, гласи:

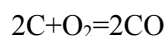


или

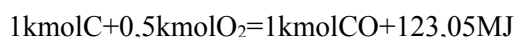


3.1.4 СТЕХИОМЕТРИЈСКА ЈЕДНАЧИНА САГОРЕВАЊА УГЉЕНИКА

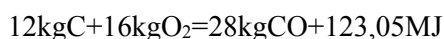
У случају када је количина кисеоника, која се налази у простору у коме се процес сагоревања одвија, недовољна за потпуно остварење процеса, настаје непотпуно сагоревање, при чему код реалних горива настаје увек угљен-моноксид. Том приликом део топлоте се губи, па је утврђивање услова у којима до ове појаве долази и њено спречавање изузетно важно. Непотпуно сагоревање угљеника може се представити једначином:



односно, даљим развијањем горњег израза,



или



За јединицу масе добија се коначно:

$$1\text{kgC} + \frac{4}{3}\text{kgO}_2 = \frac{7}{3}\text{kgCO} + 10,26\text{MJ}$$

или

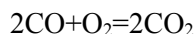
$$1\text{kgC} + 0,933\text{m}^3\text{O}_2 = 1,867\text{m}^3\text{CO} + 10,26\text{MJ}$$

Поређењем количина топлота насталих при потпуном и непотпуном сагоревању угљеника (33,79 MJ при потпуном и 10,26 MJ при непотпуном) уочава се важност остваривања што потпунијег сагоревања – губитак при непотпуном сагоревању угљеника у угљен-моноксид уместо у угљен-диоксид износи више од две трећине количине топлоте настале потпуним сагоревањем.

Угљен-моноксид, као токсична компонента, представља један од састојака који загађују атмосферу, па и по овом критеријуму његово настајање је крајње непожељно и треба га свести на минимум. Количина угљен-моноксида, која се јавља код различитих трошила (мотора, на пример) је ограничена и прописима за заштиту околине.

3.1.5 СТЕХИОМЕТРИЈСКА ЈЕДНАЧИНА САГОРЕВАЊА УГЉЕН-МОНОКСИДА

Сагоревање угљен-моноксида може се представити реакцијом:



односно

$$1\text{kmolCO} + 0,5\text{kmolO}_2 = 1\text{kmolCO}_2 + 282,99\text{MJ}$$

Даљим сређивањем добија се, аналогно претходним извођењима:

$$1\text{kgCO} + 0,571\text{kgO}_2 = 1,571\text{kgCO}_2 + 10,09\text{MJ}$$

или

$$1\text{kgCO} + 0,4\text{m}^3\text{O}_2 = 0,8\text{m}^3\text{CO}_2 + 10,09\text{MJ}$$

или

$$1\text{m}^3\text{CO} + 0,5\text{m}^3\text{O}_2 = 1\text{m}^3\text{CO}_2 + 12,64\text{MJ}$$

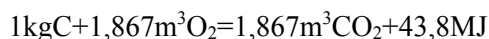
3.1.6 ХЕСОВ ЗАКОН

Количина топлоте која се добије или утроши током одређене термохемијске реакције не зависи од пута одвијања реакције, већ само од почетног и крајњег стања.

Hess-ов (Хес) закон може се доказати на примеру сагоревања угљеника: то значи да ће се приликом сагоревања угљеника у угљен-моноксид, а затим догоревања угљен-моноксида у угљен-диоксид добити иста количина топлоте, као и при непосредном сагоревању угљеника у угљендиоксид.

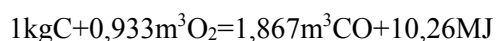
Доказ

Директним сагоревањем угљеника (C) у угљен-диоксид (CO₂) према:

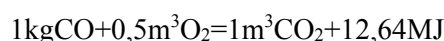


добива се 33,8 MJ.

Из одељка 3.1.4 следи да:



а из 3.1.5:



Како сагоревањем 1 kg угљеника настаје 1,867 m³ угљен-монооксида, следи:

$$10,26 + 1,867 - 12,64 = 33,8\text{MJ}$$

чиме је Хесов закон доказан.

3.2 ОСНОВИ ПРОРАЧУНА ПРОЦЕСА САГОРЕВАЊА

При пројектовању и избору опреме прорачун процеса сагоревања врши се на основу познатих података о гориву - података елементарне и техничке анализе горива и података из стехиометријских једначина сагоревања, уз коришћење постојећих сазнања и искустава.

3.2.1 ОСНОВИ ПРОРАЧУНА САГОРЕВАЊА НА БАЗИ ПОЗНАТОГ САСТАВА ГОРИВА

На бази познатог састава горива израчунавају се теоријска количина кисеоника односно ваздуха, стварна количина ваздуха, количина и састав продуката сагоревања и температура сагорсвања.

3.2.1.1 Одређивање теоријске количине кисеоника за потпуно сагоревање

Теоријска количина кисеоника представља најмању неопходну количину кисеоника за потпуно сагоревање свих горивих елемената горива. Теоријска количина кисеоника обележава се са O_{\min} и изражава се у (kg/kg) или (m³/kg) за чврста и течна горива, а у (m³/m³) за гасовита горива.

Теоријска количина кисеоника једног реалног горива израчунава се на основу познатог елементарног састава горива и теоријских количина кисеоника за потпуно сагоревање свих горивих елемената.

3.2.1.1.1 Одређивање теоријске количине кисеоника за чврста горива

Теоријска количина кисеоника добија се из збира производа теоријских количина кисеоника за сваки гориви елемент и масеног учешћа истог елемента у гориву, умањеног за количину кисеоника у самом гориву, која се може искористити у процесу сагоревања.

После замене одговарајућих вредности за O_{\min} за гориве елементе C, H и S добија се:

$$O_{\min} = \frac{8}{3}g_C + 8g_H + g_S - g_O, \quad \text{kg/kg}$$

односно:

$$O_{\min} = 1,867g_C + 5,6g_H + 0,7g_S - 0,7g_O = 1,867g_C + 5,6(g_H - \frac{g_O}{8}) + 0,7g_S, \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

3.2.1.1.2 Одређивање теоријске количине кисеоника за течна горива

Одређивање теоријске количине кисеоника врши се на исти начин, истим обрасцима као и за чврста горива, ако је познат њихов елементарни састав. Уколико је, међутим, течно гориво дефинисано општим изразом за угљоводонична горива облика C_mH_n , онда постоје две могућности:

- или да се из односа угљеникових и водоникових атома одреди елементарни састав, па да се рачуна према обрасцима за чврста горива,
- или да се користе одговарајући обрасци за овај тип горива.

При сагоревању било ког угљоводоника, облика C_mH_n , долази до сједињавања сваког атома угљеника са једним молекулом кисеоника и свака два молекула водоника са молекулом кисеоника, стварајући један молекул CO_2 и два молекула H_2O . То значи да ће при сагоревању

m атома угљеника бити потребно m молекула кисеоника, и
 n атома водоника бити потребно $(n/2 \cdot 2)$ молекула кисеоника.

Укупна потребна количина кисеоника биће:

$$\begin{aligned} O_{\min} &= m + \frac{n}{4} && \text{kmol/kmol} \\ O_{\min} &= \frac{\left(m + \frac{n}{4}\right) 22,4}{12m + n} && \text{m}^3/\text{kg} \\ O_{\min} &= \frac{\left(m + \frac{n}{4}\right) 32}{12m + n} && \text{kg/kg}, \end{aligned}$$

где су:

m - број атома угљеника, а
 n - број атома водоника у гориву типа C_mH_n .

За течно гориво састављено из више угљоводоника израчунава се или просечна вредност m и n , или се O_{\min} израчунава према следећем обрасцу:

$$O_{\min} = 22,4 \sum_{i=1}^k \frac{\left(m_i + \frac{n_i}{4}\right)}{12m_i + n_i}, \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

За течна горива облика $C_mH_nO_o$ (алкохоли, на пример) теоријска количина кисеоника се израчунава према сличним обрасцима:

$$O_{\min} = \frac{\left(m + \frac{n}{4} - \frac{o}{2}\right) 22,4}{12m + n + 16o}, \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

односно

$$O_{\min} = \frac{\left(m + \frac{n}{4} - \frac{o}{2}\right)32}{12m + n + 16o}, \quad \text{kg/kg}$$

где је:

o - број атома кисеоника у изразу за гориво типа $C_mH_nO_o$.

3.2.1.1.3 Одређивање теоријске количине кисеоника за гасовита горива

Теоријска количина кисеоника одређује се на основу познатог састава по компонентама. Узимајући у обзир да се гасовита горива састоје у општем случају из угљен-моноксида, водоника и гасовитих угљоводоника (метана CH_4 , етана C_2H_6 , пропана C_3H_8 , бутана C_4H_{10} и др.) и обележавајући запреминско учешће појединих компонената са r , теоријска количина кисеоника израчунава се према изразу:

$$O_{\min} = 0,5 \left(r_{CO} + r_{H_2} \right) + \sum_{i=1}^k \left(m_i + \frac{n_i}{4} \right) r_i - r_{O_2}, \quad \text{m}^3/\text{m}^3$$

где су:

m_i - број атома угљеника у угљоводоничним компонентама,

n_i - број атома водоника у угљоводоничним компонентама.

3.2.1.2 Одређивање теоријске количине ваздуха за потпуно сагоревање

Теоријска количина ваздуха израчунава се на основу познате теоријске количине кисеоника и учешћа кисеоника у ваздуху. Ова величина обележава се са L_{\min} и одређује се према:

$$L_{\min} = \frac{O_{\min} (kg / kg)}{0,232} \quad \text{kg/kg}$$

$$L_{\min} = \frac{O_{\min} (m^3 / kg)}{0,21} \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

$$L_{\min} = \frac{O_{\min} (m^3 / m^3)}{0,21} \quad \text{m}^3/\text{m}^3$$

где су 0,232 и 0,21 заокружене вредности масеног и запреминског учешћа кисеоника у ваздуху.

3.2.1.3 Стварна количина ваздуха и коефицијент вишка ваздуха

Како одвијање и потпуност процеса сагоревања у знатној мери зависе од услова и квалитета образовања смеше горива и ваздуха, теоријска количина кисеоника односно ваздуха није у стању да обезбеди потпуност сагоревања. Ова теоријска количина ваздуха може бити довољна за обезбеђивање потпуног сагоревања гасовитих горива само при идеалним условима. При сагоревању чврстих и течних горива, а не ретко и гасовитих, услови образовања смеше су далеко од идеалних. Због тога се у простор у коме се процес сагоревања одвија доводи нешто већа количина ваздуха у односу на прорачунату, теоријску. Ова величина назива се стварна количина ваздуха и обележава се са L . Између стварне и теоријске количине ваздуха може се, зависно од начина изражавања, успоставити веза:

$$L = \lambda L_{\min}, \quad \text{kg/kg, m}^3/\text{kg, m}^3/\text{m}^3$$

Константа сразмерности λ назива се коефицијент вишка ваздуха и представља однос стварне и теоријске количине ваздуха. Из горњег израза се и дефинише коефицијент вишка ваздуха:

$$\lambda = \frac{L}{L_{\min}}$$

Економично сагоревање природних гасовитих горива и мазута могуће је при малим вредностима коефицијента вишка ваздуха ($\lambda=1,05-1,15$), јер се може успешно организовати добро образовање смеше. Насупрот овом, нарочито тешко је обезбедити сагоревање чврстог горива - угља у слоју, којом приликом коефицијент вишка ваздуха достиже вредност 1,4-1,5. При сагоревању угља у лету, када је угаљ фино самлевен на величину од неколико десетина до неколико стотина микрометара, вредност коефицијента вишка ваздуха креће се у границама 1,2-1,25. И поред тога што се сагоревањем са коефицијентом вишка ваздуха мањим од 1 губи део топлоте, код ото мотора са унутрашњим сагоревањем је при $\lambda=0,85-0,9$ највећа брзина сагоревања, па према томе и највећа снага.

3.2.1.4 Количина и састав продуката сагоревања

Подаци о количини и саставу продуката сагоревања заједно са теоријском количином ваздуха дају низ података како за избор опреме, тако и за одређивање температуре сагоревања, топлотних губитака са димним или издувним гасовима, потпуности процеса сагоревања, за састављање термичког прорачуна и др.

У условима потпуног сагоревања када је $\lambda \geq 1$ у општем случају у продуктима сагоревања налазе се CO_2 , H_2O , SO_2 , N_2 , O_2 и чврст несагориви остатак – пепео.

3.2.1.4.1 Продукти сагоревања чврстих горива при $\lambda > 1$

Израчунавање продуката сагоревања врши се на основу познатог елементарног састава горива и стехиометријских једначина сагоревања. За чврста горива биће:

$$V_{\text{CO}_2} = 1,867 g_C \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 11,2 g_H + 1,24(g_W + g_{W1}) \quad \text{m}^3/\text{kg},$$

јер се у продуктима сагоревања поред воде настале сагоревањем водоника налази и вода која потиче из горива (влага) - g_W и вода из ваздуха (услед његове влажности) - g_{W1} .

$$V_{\text{SO}_2} = 0,7 g_S, \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

Поред „правих“ продуката сагоревања CO_2 , H_2O и SO_2 у продуктима сагоревања налази се и азот, из ваздуха који је учествовао у процесу, и кисеоник, ако је коефицијент вишка ваздуха већи од 1.

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 L + 0,8 g_N, \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21(L - L_{\min}) = 0,21(\lambda - 1)L_{\min}, \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

3.2.1.4.2 Продукти сагоревања течних горива при $\lambda > 1$

Одређивање продуката сагоревања течних горива врши се:

- или на исти начин као код чврстих горива, ако је познат (или ако се израчуна) елементарни састав, или:

- на начин који ће се изложити, ако је састав горива дат општим изразом за угљоводонична горива - $C_m H_n$.

Како сагоревањем једног атома угљеника настаје један молекул угљен-диоксида, то ће сагоревањем m атома угљеника настати m молекула угљен-диоксида, па ће бити

$$V_{CO_2} = \frac{22,4m}{12m + n'} \quad m^3/kg$$

На сличан начин се добија количина водене паре настале сагоревањем водоника

$$V_{H_2O} = \frac{11,2n}{12m + n'} \quad m^3/kg$$

Садржај азота и кисеоника одређује се на начин који је већ био изложен.

3.2.1.4.3 Продукти сагоревања гасовитих горива при $\lambda > 1$

Како се у гасовитим горивима, у општем случају, могу наћи CO , CO_2 , H_2 , H_2O , угљоводоници и друге компоненте, и како из стехиометријских једначина

- сагоревањем $1 m^3 CO$ настаје $1 m^3 CO_2$, а
- сагоревањем $1 m^3 H_2$ настаје $1 m^3 H_2O$,

настала количина угљен-диоксида израчунава се према изразу:

$$V_{CO_2} = r_{CO} + r_{CO_2} + \sum_{i=1}^k r_i m_i \quad m^3/m^3$$

Количина угљен-диоксида потиче делом од сагоревања угљен-монооксида, делом од угљеника из угљоводоника, а делом из угљен-диоксида, који се налазио у гасовитом гориву. При томе су:

- r_{CO} - запреминско учешће угљен-монооксида у горивом гасу чијим сагоревањем настаје иста запремина угљен-диоксида,
- r_{CO_2} - запреминско учешће угљен-диоксида у горивом гасу,
- r_i - запреминско учешће i -те угљоводоничне компоненте у гасовитом гориву, а
- m_i - одговарајући број атома угљеника у i -том гасовитом угљоводонику.

Аналогно претходном, израз за израчунавање количине водене паре, биће:

$$V_{H_2O} = r_{H_2} + r_{H_2O} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k r_i n_i \quad m^3/m^3$$

где су:

- r_{H_2} - запреминско учешће водоника у горивом гасу,
- r_{H_2O} - запреминско учешће водене паре у горивом гасу,
- r_i - запреминско учешће i -те угљоводоничне компоненте у гасовитом гориву, а
- n_i - одговарајући број атома водоника у i -том гасовитом угљоводонику.

Количина азота и кисеоника одређују се према раније наведеним обрасцима, а на основу израчунатих вредности L_{min} , односно L .

3.2.1.4.4 Количине продуката сагоревања

Израчунавање количине продуката сагоревања врши се на основу познатих, односно израчунатих вредности појединих компонената продуката сагоревања. У општем случају количина продуката сагоревања изражава се збиром количина појединих продуката сагоревања. При томе разликују се влажни и суви продукти сагоревања, зависно да ли се у саставу налази вода или не. У условима потпуног сагоревања количина влажних продуката сагоревања једнака је:

$$V_v = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2}, \quad m^3/kg$$

а количина сувих продуката сагоревања:

$$V_s = V_v - V_{H_2O} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2}, \quad m^3/kg$$

Одговарајући изрази, зависно од врсте горива, могу се приказати на следећи начин:

– за чврста горива

$$V_v = 1,867g_C + 11,2g_H + 1,24g_W + 0,7g_S + 0,79L + 0,8g_N + 0,21(\lambda - 1)L_{\min}, \quad m^3/kg$$

– за течна горива

$$V_v = \frac{22,4m}{12m + n} + \frac{11,2n}{12m + n} + 0,79L + 0,21(\lambda - 1)L_{\min}, \quad m^3/kg$$

– за гасовита горива

$$\begin{aligned} V_v = & r_{CO_2} + r_{CO} + r_{CH_4} + \sum_{i=1}^k r_i m_i + \\ & + r_{H_2} + 2r_{CH_4} + r_{H_2S} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k r_i n_i + \\ & + 0,79L + r_{N_2} + 0,21(\lambda - 1)L_{\min} + r_{H_2S}, \quad m^3/kg \end{aligned}$$

3.2.1.4.5 Састав продуката сагоревања

Учешће појединих компонената у укупној количини продуката сагоревања израчунава се једноставно: односом количине одговарајуће компоненте и укупне количине продуката сагоревања. С обзиром на претходни став, састав продуката сагоревања може се израчунати с обзиром на влажне и суве продукте сагоревања. Састав влажних продуката сагоревања биће:

$$CO_{2v} = \frac{V_{CO_2}}{V_v} 100, \quad \% \text{ v/v}$$

$$N_{2v} = \frac{V_{N_2}}{V_v} 100, \quad \% \text{ v/v}$$

$$H_2O_v = \frac{V_{H_2O}}{V_v} 100, \quad \% \text{ v/v}$$

$$O_{2v} = \frac{V_{O_2}}{V_v} 100, \quad \% \text{ v/v}$$

$$SO_{2v} = \frac{V_{SO_2}}{V_v} 100, \quad \% \text{ v/v}$$

Састав сувих продуката сагоревања израчунава се према следећим изразима:

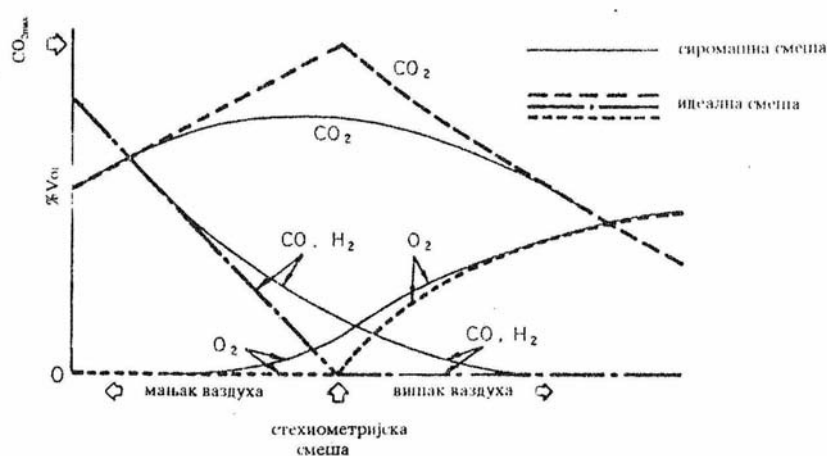
$$CO_{2s} = \frac{V_{CO_2}}{V_s} 100, \quad \% \text{ v/v}$$

$$N_{2s} = \frac{V_{N_2}}{V_s} 100, \quad \% \text{ v/v}$$

$$SO_{2s} = \frac{V_{SO_2}}{V_s} 100, \quad \% \text{ v/v}$$

$$O_{2s} = \frac{V_{O_2}}{V_s} 100, \quad \% \text{ v/v}$$

Вредност процентуалног садржаја угљен-диоксида у сувим продуктима сагоревања при стехиометријском коефицијенту вишка ваздуха ($\lambda=1$) представља максималну вредност CO_2 за одређено гориво и обележава се са CO_{2max} (Slika 3.4).



Слика 3.4: Састав теоријских и стварних продуката сагоревања

У прорачунима се, такође, често користи збир троатомних сувих продуката сагоревања – угљен-диоксида и сумпор-диоксида, који се обележава са RO_2 .

$$RO_2 = CO_2 + SO_2$$

Аналогно претходном ставу, биће онда и

$$RO_{2max} = CO_{2max} + SO_{2max}$$

3.2.2 ОСНОВИ ПРОРАЧУНА ПРОЦЕСА САГОРЕВАЊА НА БАЗИ ПОЗНАТОГ САСТАВА ПРОДУКАТА САГОРЕВАЊА

Састав продуката сагоревања одређује се уређајима у којима се врши анализа продуката сагоревања – гасним анализаторима. Савремени гасни анализатори омогућавају веома тачно одређивање низа продуката потпуног и непотпуног сагоревања, коначних и међу продуката реакције сагоревања.

Састав сувих продуката потпуног сагоревања биће једнак

$$CO_2 + SO_2 + O_2 + N_2 = 100\%$$

или

$$RO_2 + O_2 + N_2 = 100\%$$

У случају непотпуног сагоревања услед несавршености одвијања самог процеса, поред продуката потпуног, јављају се и продукти непотпуног сагоревања: CO , H_2 , CH_4 и други видови несагорелог горива. Како данашња постројења раде са високим степеном потпуности сагоревања, допушта се упрошћен прорачун, при чему ће се сматрати да је једини производ непотпуног сагоревања угљен-моноксид. У том случају горње једначине могу се написати у следећем облику:

$$RO_2 + O_2 + N_2 + CO = 100\%$$

Из састава продуката сагоревања може се оценити квалитет процеса сагоревања, а и одредити стварни коефицијент вишка ваздуха са којим се процес сагоревања одвија.

3.2.2.1 Одређивање коефицијента вишка ваздуха из састава продуката сагоревања

Теоријски минимално потребна количина ваздуха за потпуно сагоревање може се представити разликом стварно потребне количине ваздуха и вишка ваздуха (ΔL):

$$L_{min} = L - \Delta L$$

Заменом овог израза у израз којим је коефицијент вишка ваздуха дефинисан, добија се

$$\lambda = \frac{L}{L_{min}} = \frac{L}{L - \Delta L} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta L}{L}}$$

Запремина вишка ваздуха може се израчунати из вишка кисеоника, одређеног анализом продуката сагоревања:

$$V_{O_2} = \frac{O_2}{100} V_s$$

$$\Delta L = \frac{O_2}{100} V_s \frac{100}{21} = \frac{O_2}{21} V_s$$

Како азот, уведен ваздухом у процес сагоревања, остаје непромењен (занемарујући настајање оксида азота), може се помоћу њега одредити стварна запреминска количина ваздуха. Овакав начин је оправдан само код чврстих и течних горива код којих је садржај азота у гориву незнатан. Запремина азота у продуктима сагоревања биће

$$V_{N_2} = \frac{N_2}{100} V_s$$

а стварна количина ваздуха,

$$L = \frac{V_{N_2}}{0,79} = \frac{N_2}{100} V_s \frac{1}{0,79} = \frac{N_2}{79} V_s$$

Заменом израза за ΔL и L у израз за коефицијент вишка ваздуха, добија се коначан образац за израчунавање коефицијента вишка ваздуха на основу познатог састава продуката сагоревања:

$$\lambda = \frac{1}{1 - \frac{\frac{O_2}{21} V_s}{\frac{N_2}{79} V_s}} = \frac{1}{1 - \frac{79 O_2}{21 N_2}}$$

или

$$\lambda = \frac{21}{21 - 79 - \frac{O_2}{100 - (RO_2 + O_2)}} = \frac{21}{21 - 79 - \frac{O_2}{N_2}} \approx \frac{21}{21 - O_2}$$

пошто је

$$N_2 = 100 - (RO_2 + O_2)$$

У условима када се поред продуката потпуног сагоревања јављају и продукти непотпуног сагоревања CO , H_2 , CH_4 и други, коефицијент вишка ваздуха се одређује према изразу:

$$\lambda = \frac{21}{21 - 79 - \frac{O_2 - 0,5(CO + H_2) - 2CH_4}{100 - (RO_2 + O_2 + CO + H_2 + CH_4)}}$$

Како је CO највероватнији и највише заступљен продукт непотпуног сагоревања горњи израз се може упростити тако да гласи:

$$\lambda = \frac{21}{21 - 79 - \frac{O_2 - 0,5CO}{100 - (RO_2 + O_2 + CO)}}$$

3.2.3 ТЕМПЕРАТУРА САГОРЕВАЊА

Температура сагоревања представља температуру коју имају гасовити продукти, као резултат сагоревања топлотом која је настала сагоревањем горива. Температура сагоревања управно је пропорционална топлотној моћи горива, а обрнуто пропорционална топлоти потребној за загревање продуката сагоревања до температуре сагоревања, односно обрнуто је пропорционална производу запремина продуката сагоревања и њихових средњих специфичних топлотних капацитета – топлотном капацитету.

Разликују се калориметарска, теоријска и стварна температура сагоревања.

Под калориметарском температуром сагоревања подразумева се температура сагоревања коју имају продукти сагоревања при потпуном сагоревању, којом приликом не долази до топлотних губитака насталих дисоцијацијом продуката сагоревања на повишеним температурама и услед размене топлоте са околином.

Теоријска температура сагоревања узима у обзир дисоцијацију продуката сагоревања, а не и размену топлоте са околином.

Стварна температура сагоревања одређује се узимајући у обзир и дисоцијацију продуката сагоревања и топлотне губитке услед размене топлоте с аоколином.

Максимална вредност температуре сагоревања добија се за случај калориметарске температуре сагоревања када се процес одвија са стехиометријским коефицијентом вишка ваздуха ($\lambda=1$).

У општем случају, температура сагоревања се одређује из енергетског биланса

$$h_G + L_s h_v + H_d = t_s \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k V_i c_{pmi}$$

где су:

- h_G - енталпија горива,
- L_s - стварна количина ваздуха,
- h_v - енталпија ваздуха,
- H_d - доња топлотна моћ,
- V - запремина i -те компоненте продуката сгоревања,
- c_{pmi} - средњи специфични топлотни капацитет i -те компоненте продуката сгоревања у температурском интервалу $t_o - t_s$.

У изразу (3.1) занемарена је количина топлоте која се троши на загревање пепела до температуре t_s . Ова претпоставка је коректна у потпуности само за гасовита и течна горива. За израчунавање температуре сагоревања чврстих горива потребно је узети у обзир и количину пепела и одговарајући специфични топлотни капацитет.

Из израза (3.1) следи да се температура сагоревања t_s може израчунати на следећи начин:

$$t_s = \frac{h_G + L_s h_v + H_d}{\sum_{i=1}^k V_i c_{pmi}}, \quad ^\circ\text{C}$$

или развијено

$$t_s = \frac{h_G + L_s h_v + H_d}{V_{CO_2} c_{pmCO_2} + V_{C_2O} c_{pmH_2O} + V_{N_2} c_{pmN_2} + \dots}, \quad ^\circ\text{C}$$

Израз за израчунавање теоријске температуре сагоревања биће једнак горњем изразу допуњен губицима услед дисоцијације Q_d :

$$t_s = \frac{h_G + L_s h_v + H_d - Q_d}{\sum_{i=1}^k V_i c_{pmi}}, \quad ^\circ\text{C}$$

Стварна температура сгоревања израчунаваће се према изразу:

$$t_s = \frac{h_G + L_s h_v + H_d - Q_d - Q_{tg}}{\sum_{i=1}^k V_i c_{pmi}}, \quad ^\circ\text{C}$$

где је:

- Q_{tg} - количина топлоте изгубљена услед размене топлоте са околином.

За случај да се у продуктима сагоревања налазе и гориве компоненте, као последица несавршеног и непотпуног сагоревања, потребно је, у бројиоцу израза за израчунавање температуре сагоревања, умањити вредност топлотне моћи за количину топлоте која се налази у овим горивим компонентама продуката сагоревања.

У том случају, најопштији израз за израчунавање температуре сагоревања би гласио:

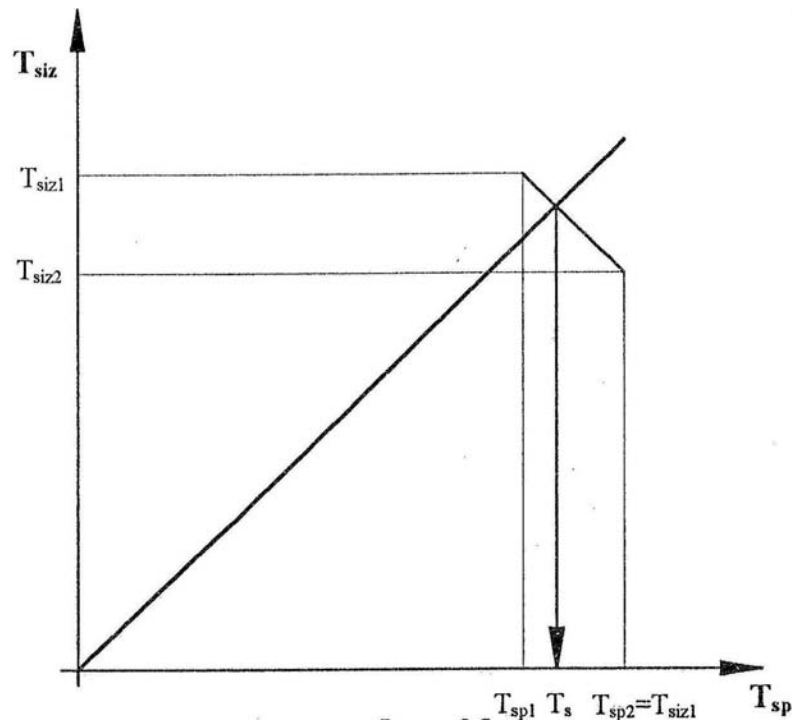
$$t_s = \frac{h_G + L_s h_v + H_d - H_{ps} - Q_d - Q_{tg}}{\sum_{i=1}^k V_i c_{pmi}}, \quad ^\circ\text{C}$$

где је:

H_{ps} - губитак услед непотпуног сагоревања.

Одређивање температуре сагоревања усложнено је непознавањем средњих специфичних топлотних капацитета у интервалу $t_o - t_s$, јер није позната температура сагоревања која се тражи, па се бројне вредности средњих специфичних топлотних капацитета не могу узети из таблица. Од низа интеративних метода за одређивање температуре сагоревања биће изложена графичка метода која омогућава да се већ после два „корака“ прорачуна одреди температура сагоревања, са довољном тачношћу, за техничке прорачуне.

Да би се одредила температура сагоревања, на овај начин, потребно је да се за гориво, чија се температура сагоревања одређује, претпостави температура сагоревања (t_{sp1}). За ову претпостављену температуру сагоревања могуће је сада одредити вредности средњих специфичних топлотних капацитета, па онда и израчунати температуру сагоревања (t_{siz1}). Израчуната температура сагоревања на овај начин више или мање ће се разликовати од претпостављене. У следећем кораку, користи се ова израчуната температура сагоревања, као полазна, претпостављена ($t_{sp2}=t_{siz1}$) и за њену вредност се узимају вредности средњих специфичних топлотних капацитета из таблица. Температура сагоревања се израчунава поново (t_{siz2}). Добијене вредности температура сагоревања наносе се у дијаграм (Слика 3.5) на чијој се апциси наносе претпостављене вредности температура сагоревања, а на ординати – израчунате вредности температура сагоревања. У дијаграм се уцртава права $t_{siz}=t_{sp}$ (t_{siz} – израчуната температура сагоревања t_{sp} – претпостављена температура сагоревања), на којој се, у n -том кораку мора налазити тачна вредност температуре сагоревања. Повлачећи дуж која спаја две добијене тачке из прва два корака за температуру сагоревања, добија се пресек са правом $t_{siz}=t_{sp}$. Овај пресек одређује приближно температуру сагоревања.



Слика 3.5: Поступак одређивања температуре сагоревања графо-аналитичком методом

Температура сагоревања може да се израчуна и на следећи начин [3]: како је специфични топлотни капацитет једнак

$$c_{pm_i} \Big|_{t_o}^{t_s} = \int_{t_o}^{t_s} \frac{c_p dT}{t_s - t_o}$$

може се одредити температура сагоревања директним путем узимајући за зависност промене специфичног топлотног капацитета од температуре

$$c_p = a + bt$$

После замене, интеграције и сређивања добија се

$$c_{pm} = a + \frac{b}{2}(t_s + t_o)$$

Заменом у израз за израчунавање температуре сагоревања добија се

$$t_s = \frac{h_G + L_s h_v + H_d}{\sum_{i=1}^n V_i \left[a_i \frac{b_i}{2} (t_s + t_o) \right]} + t_o$$

Уводећи ознаке

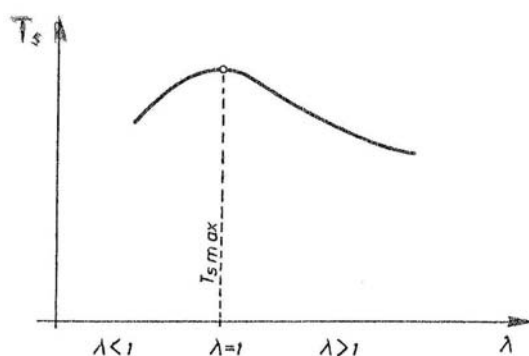
$$\sum V_i a_i = A, \quad \sum V_i b_i = B, \quad h_G + L_s h_v + H_d = C_1$$

добија се квадратна једначина по t_s

$$B t_s^2 + A t_s - [(A + B t_o) t_o + C_1] = 0$$

чијим решавањем директно, без интеративних поступака, добија се температура сагоревања.

За одређено гориво максимална вредност температуре сагоревања одређена је коефицијентом вишка ваздуха једнаким 1: за вредности коефицијента вишка ваздуха мање од 1 (у области богате смеше), количина топлоте услед непотпуног сагоревања је мања, па ће и температура сагоревања бити нижа. За вредности коефицијента вишка ваздуха веће од 1, већа је количина продуката сагоревања у односу на $\lambda=1$ (услед вишка ваздуха) па ће и поред потпуности сагоревања, температура сагоревања бити мања (Слика 3.6).



Слика 3.6: Промена температуре сагоревања у зависности од коефицијента вишка ваздуха