

1 ГОРИВЕ МАТЕРИЈЕ

1.1 ПОЈАМ ГОРИВА

Гориве материје представљају такве супстанце које сагоревањем – процесом бурног сједињавања са кисеоником, поред материјалних продуката процеса (продуката сагоревања), ослобађају одређену количину топлоте. Ова дефиниција која је дата на данашњем степену развоја, допуњена је низом захтева, које гориво мора да испуни. Једна материја може да се користи као гориво под условом да испуњава следеће захтеве:

- да процесом сагоревања производи знатну количину топлоте у кратком временском размаку;
- да се у природи налази у довољним количинама;
- да је експлоатација релативно лака и економична;
- да је производни поступак технички остварљив и рентабилан;
- да у свом саставу не садржи неприхватљиво велику количину негоривих материја – баласта;
- да битно не мења свој састав и особине при складиштењу, транспорту и руковању;
- да је безбедна с обзиром на појаву пожара и експлозије у условима складиштења, транспорта и руковања;
- да је цена произведене количине топлоте економична и прихватљива; и
- да су настали продукти сагоревања безопасни по жива бића и примењене материје.

Горива данас представљају, са једне стране, сировину у многим конверзионим процесима и, са друге стране, извор енергије за покретање и извршење тих процеса, као и извор за добијање топлотне или неке друге енергије (Слика 1.1). У општем случају могу се уочити три међусобно различита процеса:

- производња примарних горива (добијање угља, нафте и гаса),
- конверзија примарних горива у секундарна или терцијарна (прерадом угља добија се кокс, а прерадом нафте добија се широк распон лаких, средњих и тешких течних горива),
- конверзија горива у друге видове енергије (топлотну и/или електричну енергију, на пример).

1.2 ВРСТЕ ГОРИВА

Општа подела горива врши се најчешће према њиховом агрегатном стању и према начину добијања. Према агрегатном стању горива се дела на чврста, течна и гасовита, а према начину добијања – на природна и прерађена. Под природним горивима подразумевају се она горива које се налазе у природи и која се могу користити већ после одстрањивања грубих примеса. Прерађена горива добијају се или прерадом природних или процесом у коме учествују и природна и друга прерађена горива. Општа подела горива дата је у Табели 1.1 и на Слици 1.2.

Поред ове опште поделе, горива се могу разврстати:

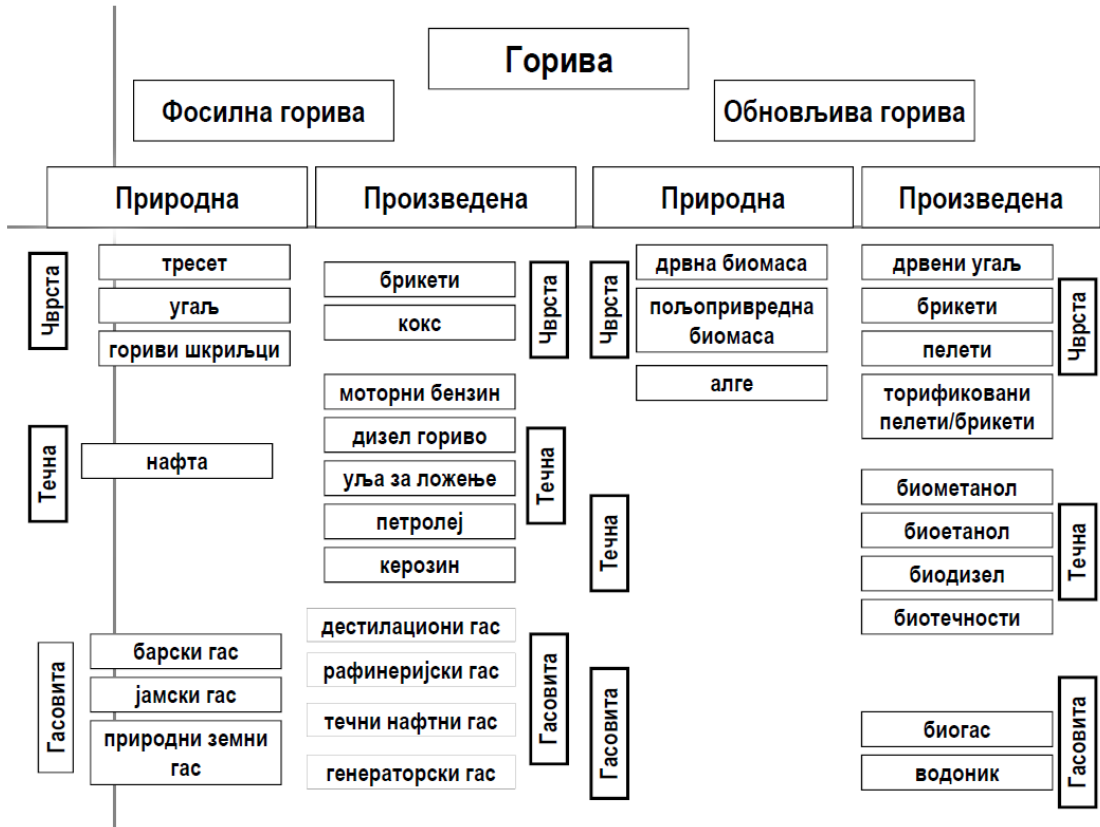
- према постојаности на топлоту (топлопостојана и топлонепостојана);
- према карактеру коришћења (енергетска и технолошка горива);
- према запаљивости (самозапаљива и несамозапаљива);
- према примени.

Табела 1.1: Подела горива према агрегатном стању и степену прераде

Према агрегатном стању	Према степену прераде	
	ПРИРОДНА ГОРИВА	ПРЕРАЂЕНА ГОРИВА
Чврсто	дрво, биомаса, тресет, угљеви (лигнит, мрки, камени, антрацит) гориви шкриљци, уљани песак	дрвени угаљ, брикети, полукокс, кокс и др.
Течно	нафта	бензин, петролеј, гасна уља (дизел гориво екстра лако уље за ложење), уље за ложење, алкохоли, биогорива, тер и др.
Гасовито	природни земни гас	рафинеријски, дестилациони, генераторски, биогаз и др.



Слика 1.1: Примери примене горива у различитим процесима



Слика 1.2: Врсте горива

1.3 САСТАВ ГОРИВА

Састав горива одређује се такозваном елементарном анализом, а особине, важне за примену – техничком анализом.

1.3.1 ЕЛЕМЕНТАРНИ САСТАВ

Састав чврстих и течних горива изражава се у масеним (% m/m), а гасовитих у запреминским (% V/V) процентима. У општем случају горива се састоје из горивог дела и баласта – негоривог дела. На основу познатог елементарног састава може се прорачунати низ података: потребна количина ваздуха за потпуно сагоревање, топлотна моћ горива, количина и састав продуката сагоревања и температура сагоревања.

У састав било ког горива, у општем случају, улазе три горива елемента – угљеник, водоник и сумпор, унутрашњи баласт - кисеоник и азот и спољни баласт - минералне материје (минералне примесе) и вода. На основу овога, може се написати састав горива у општем облику:

$$g_C + g_H + g_S + g_O + g_N + g_W + g_A = 1$$

где се са g обележава масено учешће појединих елемената у гориву, а C, H, S, O, N, W, A представљају симболе за угљеник, водоник, сумпор, кисеоник, азот, влагу и минералне материје; или у облику

$$C + H + S + O + N + W + A = 100, \quad \% m/m$$

где се наведеним симболима изражава процентуални састав*.

Овакав елементарни састав је општи и важи за сва горива. Зависно од врсте горива, састав се мења: у гасовитим горивима не постоје минералне материје, а и у већини течних горива, минералних материја практично нема, док их код чврстих горива увек има.

1.3.1.1 Угљеник

Угљеник чини најважнију компоненту горива с једне стране што га у гориву има највише, а с друге стране што његовим сагоревањем настаје и највећи део количине топлоте коју гориво ослобађа. Угљеник се у горивима налази и у слободном стању и везан; он улази у састав сложених органских једињења везан са водоником, кисеоником, азотом и сумпором (Слика 1.3 /2/). Сагоревањем једног килограма угљеника ослобађа се количина топлоте од **33,829 MJ**. Максимална температура сагоревања угљеника из горива рачуната без топлотних губитака износи 2240 °C.

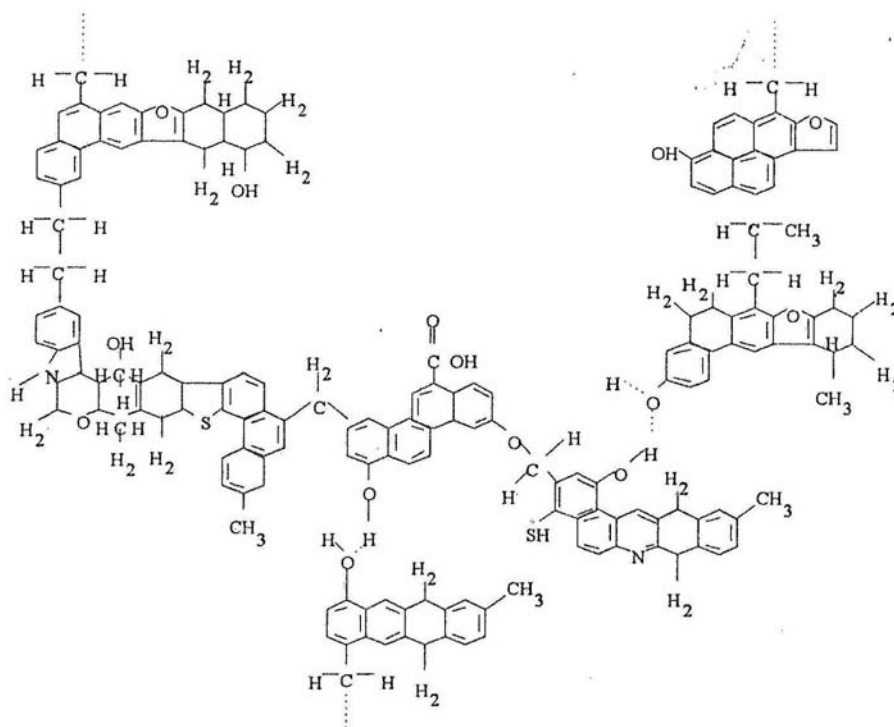
1.3.1.2 Водоник

Водоник представља другу по важности гориву компоненту. Као и угљеник, потиче из праматерије, из које је гориво настало. Водоник се у горивима јавља везан код чврстих, течних и гасовитих, и чист, у мешавини са другим горивим компонентама, у гасовитим горивима. При сагоревању једног килограма водоника развија се чак **142,014 MJ** или 4,2 пута више од одговарајуће количине топлоте код угљеника. Зато количина топлоте, која се ослобађа потпуним сагоревањем јединице масе горива расте са повећањем садржаја водоника у њему. Максимална температура сагоревања водоника, рачуната без топлотних губитака, износи 2235 °C.

* Напомена: Симбол W потиче из енглеског и немачког језика (water, Wassser), а A - из енглеског и немачког језика (ash, Asche).

1.3.1.3 Кисеоник

Кисеоник није гориви елемент, али помаже и омогућава сагоревање. У горивима се јавља везан са другим елементима, сем у гасовитим, где га налазимо у слободном стању (у мањим количинама). Количина кисеоника у гориву смањује потребну количину кисеоника из ваздуха неопходну за сагоревање (код алкохола, на пример). Улази у такозвани унутрашњи баласт, јер заузима место горивим елементима и у оксидованом стању са угљеником и водоником смањује количину топлоте која се ослобађа сагоревањем. Висок садржај кисеоника налази се у дрвету, тресету и младим мрким угљевима; а знатно мањи је код старијих угљева.



Слика 1.3: Хипотетички модел молекула угља

1.3.1.4 Азот

Азот се у горивима јавља у саставу сложених органских једињења. У чврстим и течним горивима га има веома мало (0-2 % m/m), док га код гасовитих горива може бити далеко више (нарочито код прерађених). У процесу сагоревања горива азот се највећим делом понаша као инертан. Заједно са кисеоником чини такозвани унутрашњи баласт.

1.3.1.5 Сумпор

Сумпор се у горивима јавља у виду горивог и негоривог. Негориви сумпор (у облику сулфата гвожђа, калцијума и др.) током сагоревања прелази у пепео и не утиче на својства горива. Гориви сумпор се јавља као органски (у оквиру сложених органских једињења, меркаптана) и пиритни (сједињен са гвожђем, FeS_2). И поред тога што сагоревањем сумпора настаје одређена количина топлоте (**9,295 MJ/kg**) присуство сумпора у горивима је крајње непожељно. Сумпор делује кородивно и у елементарном стању и у облику једињења, а продукти његовог сагоревања су штетни за живи свет. При сагоревању сумпора са вишком ваздуха (већом количином ваздуха од неопходно потребне за потпуно сагоревање) долази до настајања сумпор-диоксида и сумпор-триоксида (SO_2 и SO_3) који у присуству воде образују сумпорасту и сумпорну киселину (узрок настајања киселих киша).

1.3.1.6 Минералне материје и пепео

Све врсте горива, осим гасовитих и најлакших фракција прераде нафте, садрже у себи минералне материје. Оне су штетне из више разлога:

- смањују удео горивих материја у гориву, па на тај начин и количину топлоте која се добија сагоревањем,
- отежавају сагоревање и изазивају губитак горива па тиме и топлоте,
- повећавају трошкове одржавања постројења и смањују његов век трајања, и
- повећавају трошкове транспорта горива.

Садржај минералних материја у горивима се мења у широким границама: од неколико процената код тежих течних горива, до неколико десетина процената код чврстих горива (дрво – 1-2 % m/m , угљеви – до 30 % m/m , гориви шкриљци – до 90 % m/m). У наставку, приказане су карактеристике минералних материја у чврстим горивима.

Минералне материје састоје се из:

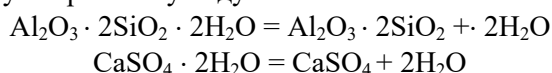
- примарних - образовних још у праматерији, од које је гориво настало (углавном соли алкалних и земноалкалних метала – калијума, калцијума, натријума и магнезијума) – и нанесених водом или ветром, које су се таложиле заједно са растињем. Ове минералне материје су мање – више равномерно распоређене у гориву и не могу се процесима оплемењивања одстранити. Често се зато називају и везане минералне материје.;
- секундарних - које су у гориво доспеле током процеса настајања горива;
- терцијарних - грубих механичких материја, које су у гориву доспеле у условима његовог вађења и у транспорту.

Испитивањима је утврђено да се 95–98% свих минералних материја састоји из:

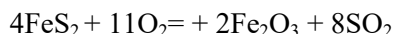
- силиката, у основи из алуминосиликата (глине и шкриљци);
- сулфида, од којих преовлађује сулфид гвожђа – пирит (FeS_2) и
- карбоната калцијума, магнезијума и донекле гвожђа.

У процесу сагоревања минералне материје трпе низ сложених промена – разлажу се и делимично оксидишу стварајући остатак, који се и квалитативно и квантитативно разликује од полазне материје – пепео. Основне промене могу се представити на следећи начин:

- алуминосиликати и гипс губе кристалну воду:

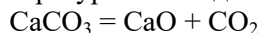


- пирит сагорева према:



При овом процесу у пепелу остаје само оксид гвожђа, чија је маса приближно једнака 2/3 првобитне количине пирита;

- карбонати се потпуно разлажу, на температурама изнад 600°C, уз издвајање угљен-диоксида:



Тако у саставу пепела налази се низ оксида: калцијума (CaO), магнезијума (MgO), натријума (Na_2O), калијума (K_2O), силицијума (SiO_2), гвожђа (FeO , Fe_2O_3), алуминијума (Al_2O_3) и других.

Пепео, значи, представља смешу оксида минералних материја, који остају после потпуног процеса сагоревања свих горивих материја из горива и после завршетка свих трансформација минералних материја, које се дешавају на повишеним температурама.

1.3.1.7 Влага

Заједно са минералним материјама влага чини тзв. спољни баласт или баласт уопште, и као таква је непожељна. Она умањује топлотну моћ горива, јер се на њено испаравање троши део топлоте настао сагоревањем горивих компоненти горива. Влага снижава температуру продуката сагоревања, а повећава трошкове транспорта. Потиче из праматерије али ипак највећим делом доспева у гориво квашењем.

Влага се у чврстим горивима јавља у три вида: као груба, хигроскопска и конституциона.

Груба влага (спољашња, површинска, слободна) резултат је квашења горива влагом из спољне средине при добијању, транспорту и складиштењу горива (Слика 1.4). Хигроскопска влага (унутрашња, капиларна) налази се у порама чврстог горива. Конституциона влага представља воду у саставу самог горива хемијски везану (минералне материје) – најчешће у облику кристалне воде.

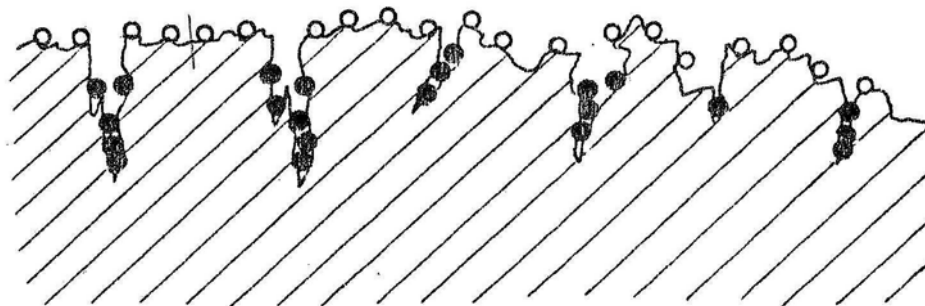
У техничким прорачунима занемарује се садржај конституционе влаге, тако да се укупна влага може представити збиром грубе и хигроскопске, сведено на исту масу горива:

$$W_u = W_G + W_H, \% m/m$$

где су:

- W_u (% m/m) – укупна влага,
- W_G (% m/m) – груба влага,
- W_H (% m/m) – хигроскопска влага.

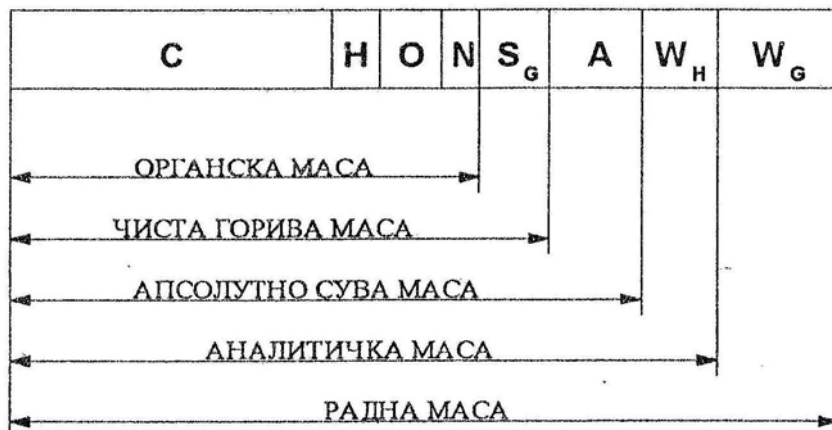
Између грубе и хигроскопске влаге нема оштре границе – обе су тачније дефинисане условима свог одређивања.



Слика 1.4: Шематски приказ грубе и хигроскопске влаге

1.4 УСЛОВНЕ МАСЕ И ПРЕРАЧУНАВАЊЕ СА ЈЕДНЕ МАСЕ НА ДРУГУ

У зависности од садржаја воде и минералних материја (пепела), гориво (углавном чврста горива и тежа уља за ложење) се условно дефинише различитим масама: радном, аналитичком, апсолутно сувом, чистом горивом и органском (Слика 1.5).



Слика 1.5: Шематски приказ условних маса горива

Састав чврстог горива (угаљ), после вађења из земље представља тзв. *радну масу* горива. Састав радне масе горива изражен у масеним процентима, може се написати у облику:

$$C_r + H_r + O_r + N_r + S_{Gr} + A_r + W_r = 100, \% m/m$$

где $W_r(\%)$ представља укупну влагу, једнаку збиру грубе и хигроскопске:

$$W_r = W_G + W_{Hr}, \% m/m$$

а индекс «r» означава да се састав односи на радну масу горива.

Испитивања састава и других особина чврстих горива не могу се вршити на узорку радне масе горива због променљивог садржаја грубе воде који зависи од температуре, притиска и влажности ваздуха. Груба вода се зато одстрањује сушењем на ваздуху и добијени узорак служи за анализе. Маса горива без грубе воде назива *аналитичка маса* горива, а њен састав обележава се индексом «a». Састав аналитичке масе горива одређен је изразом:

$$C_a + H_a + O_a + N_a + S_a + A_a + W_{Ha} = 100, \% m/m$$

Сушењем горива изнад 100°C (обично 105°C) може се у потпуности одстранити вода из горива. Маса горива из које је одстрањена и груба и хигроскопска вода назива се *апсолутно сува маса* горива и састав обележава се са индексом «s». Састав апсолутно суве масе горива представљен је изразом:

$$C_s + H_s + O_s + N_s + S_{Gs} + A_s = 100, \% m/m$$

Чисту гориву масу чине угљеник, водоник и сумпор. Познато је да је азот инертан и да кисеоник само потпомаже и омогућава процес сагоревања. Како се кисеоник и азот у гориву налазе везани са осталим елементима, укључују се, условно, у масу која се назива *чиста горива маса* горива. Састав условне чисте гориве масе дат је једначином:

$$C_g + H_g + O_g + N_g + S_{Gg} = 100, \% m/m$$

где индекс «g» означава састав чисте гориве масе.

Искључујући сву влагу, минералне материје и сумпор, добија се *органичка маса* горива. Овај састав је такође услован, јер се сумпор налази у гориву и у виду органских једињења. Састав органске масе дат је изразом:

$$C_o + H_o + O_o + N_o = 100, \% m/m$$

где се индекс «*o*» односно на поменути састав.

У термотехничким и термоенергетским прорачунима користи се састав који се односи на радну масу горива. Прерачунавање састава са једне масе на другу и обрнуто врши се одговарајућим изразима.

За добијање ових израза могу се написати састави горива који се односе на радну и аналитичку масу у облику:

$$C_a + H_a + O_a + N_a + S_{Ga} + A_a + W_{Ha} = 100 \quad (I)$$

$$C_r + H_r + O_r + N_r + S_{Gr} + A_r + W_{Hr} = 100 - W_G \quad (II)$$

Однос збира чланова леве стране једначина I и II, а истовремено и однос било којих одговарајућих чланова леве стране, једнак је односу десних страна једначина I и II. Ако се са X_r означи се било која компонента леве стране једначине II, и са X_a било која компонента једначине I и нађе се њихов однос, добија се израз за прерачунавање састава горива са аналитичке на радну масу:

$$\frac{X_a}{X_r} = \frac{100}{100 - W_G}$$

односно

$$X_r = X_a \frac{100 - W_G}{100}$$

На сличан начин добијају се изрази за прерачунавање састава са аналитичке на апсолутно суву масу:

$$C_a + H_a + O_a + N_a + S_{Ga} + A_a = 100 - W_{Ha}$$

$$C_s + H_s + O_s + N_s + S_{Gs} + A_s = 100$$

односно

$$\frac{X_a}{X_s} = \frac{100 - W_{Ha}}{100}$$

или коначно

$$X_s = X_a \frac{100}{100 - W_{Ha}}$$

Аналогно претходним извођењима добијају се изрази за прерачунавање чисте гориве масе са аналитичке масе и органске масе са аналитичке масе;

$$X_r = X_a \frac{100}{100 - W_{Ha} - A'_a}, \quad X_o = X_a \frac{100}{100 - W_{Ha} - A_a - S_{Ga}}$$

као и међусобни односи између апсолутно суве масе и чисте гориве масе, апсолутно суве масе и органске масе, и органске масе и чисте гориве масе.

1.5 ОПШТА СВОЈСТВА

Особине горива заједно са елементарним саставом, дефинишу квалитет горива и сврсисходност и ваљаност његове употребе. Неке од ових особина су заједничке за све врсте горива – називају се општим својствима или општим особинама, неке од њих су специфичне за одређену врсту и намену горива.

Од низа специфичних особина разматраће се детаљније код горива само оне, које су од интереса за његову примену. Специфичне особине, као и све остале могу се разврстати на физичке, хемијске и радне или експлоатационе. Радне особине су свакако најважније, али треба водити рачуна да све заједно, укључујући и елементарни састав, омогућују употпуњавање слике о једном гориву. У даљем, ове специфичне особине разматраће се у делу материје која се односи на одговарајућу врсту горива.

Опште особине чине особине заступљене код свих врста горива. То су густина, специфична топлота, коефицијент топлотне проводљивости, количина топлоте која настаје сагоревањем горива – топлотна моћ и друге. Као далеко најважнијој општој особини свих горива – топлотној моћи, биће посвећена посебна пажња.

1.5.1 ТОПЛОТНА МОЋ

1.5.1.1 Значај и дефиниција

Количина топлоте која се ослобађа сагоревањем неког горива и која представља ону неопходну полазну величину за низ прорачуна, представља једну од најзначајнијих карактеристика горива. Ова величина, дефинисана односом настале количине топлоте при потпуном сагоревању и јединице количине горива, од које је топлота добијена, назива се топлотна моћ.

С обзиром на услове у којима се процес сагоревања одвија, разликује се:

- топлотна моћ при константном притиску, и
- топлотна моћ при константној запремини,

а према топлотном нивоу продуката сагоревања насталих приликом одређивања топлотне моћи:

- горња, и
- доња топлотна моћ.

Како је разлика између топлотних моћи одређених при константној запремини и при константном притиску врло мала – мања од грешке која се чини приликом експерименталног одређивања, у техничким прорачунима она се занемарује и не наглашава се под којим је условима одређена.

Стриктне дефиниција горње и доње топлотне моћи гласе:

Горња топлотна моћ је количина топлоте која се добија потпуним сагоревањем јединице масе горива под следећим условима:

- угљеник и сумпор из гориве материје налазе се у облику својих диоксида (CO_2 и SO_2) у гасовитом стању, док до оксидације азота није дошло;
- продукти сагоревања доведени су на температуру коју је гориво имало на почетку (20°C); и
- вода, која у продуктима сагоревања потиче од влаге из горива и од сагорелог водоника, преведена је у течно стање, што је условљено и претходним условима – хлађењем продуката сагоревања до 20°C .

Доња топлотна моћ представља количину топлоте која се ослободи потпуним сагоревањем јединице масе горива под следећим условима:

- угљеник и сумпор из горива налазе се у облику својих диоксида (CO_2 и SO_2) док до оксидације азота није дошло;
- продукти сагоревања доведени су на температуру коју је гориво имало на улазу у процес сагоревања (20°C); и
- вода, која у продуктима сагоревања потиче од влаге из горива и од сагорелог водоника, остаје у парном стању.

Топлотна моћ се обележава словом „Н“: горња са H_g , а доња са H_d , при чему се индекси „g“ и „d“, односе на горњу и доњу топлотну моћ. Димензија топлотне моћи проистиче из њене дефиниције – односа количине топлоте и количине материје из које је сагоревањем топлота настала. Топлотна моћ се изражава у kJ/kg или MJ/kg за чврста и течна горива и у kJ/m^3 за гасовита горива. Код течних горива користи се kJ/dm^3 или MJ/dm^3 . Прерачунавање „запреминске“ на „масену“ топлотну моћ врши се помоћу израза:

$$H = \frac{H(kJ / m^3)}{\rho(kg / m^3)}, \quad kJ / kg$$

где је ρ густина течног или гасовитог горива.

За случај сагоревања гориве смеше, која се састоји из више чврстих или течних горива, топлотна моћ смеште израчунава се из суме производа масеног учешћа одговарајуће компоненте из смеште (g_i), и одговарајуће топлотне моћи (H_i) изразом:

$$H = \sum_{i=1}^{i=n} g_i H_i$$

Из разлике између горње и доње топлотне моћи, разлике у количини топлоте која се добија ако се вода, настала сагоревањем водоника и испаравањем влаге, преведе из парног у течну стање, односно, која се губи, ако вода, која се налази у продуктима сагоревања остане у парном стању, добија се општа веза између горње и доње топлотне моћи:

$$H_g = H_d + 25 (9H+W), \quad kJ/kg$$

где су:

H – масени проценат водоника у гориву,

W – масени проценат влаге у гориву,

$9H$ – масени проценат воде, настао сагоревањем H процената водоника из горива (Из стехиометријске једначине сагоревања водоника следи да сагоревањем $1 kg$ водоника са $8 kg$ кисеоника настаје $9 kg$ воде. Сагоревањем H процената водоника добија се $9H$ процената воде.).

25 – стоти део топлоте испаравања воде (Количина топлоте потребна за испаравање једног килограма воде температуре $20^\circ C$ и њено превођење у парно стање на атмосферском притиску износи $2450 kJ/kg$, а стоти део – 25).

Материје које у себи не садрже водоник и влагу (чист угљеник, на пример) немају горњу и доњу топлотну моћ – обе вредности су међусобно једнаке: $H_g = H_d$

1.5.1.2 Одређивање топлотне моћи

Топлотна моћ се може одредити експериментално – сагоревањем припремљеног узорка, и рачунски – на основу података елементарне или техничке анализе горива.

1.5.1.2.1 Експериментално одређивање топлотне моћи

Одређивање топлотне моћи експерименталним путем омогућава добијање најтачнијих резултата. За одређивање топлотних моћи користе се специјални уређаји – калориметри. Одређивање топлотних моћи чврстих и течних горива врши се у такозваним калориметрима са бомбом, а гасовитих – у проточним калориметрима. Суштинска разлика између ова два калориметра је, што се у калориметру са бомбом процес сагоревања одвија при константној запремини, па се добија топлотна моћ при константној запремини, а код проточног калориметра – при константном притиску.

Одређивање топлотне моћи гасовитих, а ређе и течних горива проточним калориметром, заснива се на истом принципу, с том разликом, што се процес сагоревања одвија са ваздухом и на атмосферском притиску.

1.5.1.2.2 Рачунско одређивање топлотне моћи

Одређивање топлотне моћи рачунским путем врши се из низа познатих података: елементарног састава, техничке анализе, статистичке обраде резултата великог броја мерења, састава горивих компонената у гориву, густине и др.

Одређивање топлотне моћи на бази познатог елементарног састава

Одређивање топлотне моћи на основу података елементарне анализе заснива се на познавању елементарног састава горива и топлотних моћи сваког горивог елемента. Приликом израде образаца за израчунавање топлотне моћи учињено је неколико претпоставки:

- да је горива материја састављена од елемента – С, Н, S, О, N, док је она, најчешће скуп различитих елемената и једињења, и да је њена топлотна моћ једнака збиру количина топлота које се добијају сагоревањем појединих елемената из састава горива;
- да је сав везани водоник у фосилним чврстим горивима спојен са кисеоником (што није тачно, јер је део кисеоника везан и са угљеником, односно, азотом, а део је и у слободном стању);
- угљеник и сумпор су једини гориви елементи који у састав угља улазе делимично и у слободном стању. Угљеник може бити у различитим видовима (аморфни, графит) чије су топлотне моћи различите, а образац узима једну вредност ове карактеристике. Сумпор, пак, може бити у саставу пирита и сагоревати у SO_2 и SO_3 при чему се добијају различите топлоте;
- угљеник и водоник налазе се, делом, и везани у угљоводоничним једињењима у угљевима, а топлотне моћи су тих једињења различите од количине топлоте које се добијају појединачним сагоревањем ових елемената у слободном стању.

У Европи се углавном користе обрасци Савеза немачких инжењера (Verein Deutsche Ingenieure – VDI образац из 1899.године), који гласе:

- за горњу топлотну моћ

$$H_g = 340C + 1420\left(H - \frac{O}{8}\right) + 93S_G, \quad \text{kJ/kg}$$

- за доњу топлотну моћ

$$H_d = 340C + 1190\left(H - \frac{O}{8}\right) + 93S_G - 25W, \quad \text{kJ/kg}$$

У свим обрасцима слова представљају садржај појединих елемената изражен у масеним процентима. У обрасцу Савеза немачких инжењера бројеви представљају заокружене вредности стотих делова топлотне моћи горивих елемената (С, Н и S).

Одређивање топлотне моћи угљоводоничних горива на основу познате густине

Топлотна моћ угљоводоничних течних горива може се одредити на основу познате вредности густине горива и садржаја сумпора, у зависности од врсте течног горива:

$$H_d = 52,92 - 11,93\rho_{15}, \quad \text{MJ/kg}$$

$$H_d = 52,92 - 11,93\rho_{15} - 0,29S \quad \text{MJ/kg}$$

Према наведеним обрасцима, поред познавања густине течног горива на температури од 15°C (што се релативно лако може одредити) за нека горива је потребно познавати и садржај сумпора. Како је садржај сумпора у моторним бензинима и дизел горивима занемарљив (мање од 10 mg/kg), за та горива се користи први образац. За уља за ложење код којих је садржај сумпора већи у односу на моторни бензин и дизел гориво, користи се други образац. Тенденција у развијеним земљама да се и код уља за ложење смањи садржај сумпора, тако да се у највећем броју случајева, са задовољавајућом тачношћу, може и за ова горива користити први образац.

Одређивање топлотне моћи на основу познатог састава по горивим компонентама

Овакви обрасци користе се углавном код гасовитих горива, код којих се не одређује елементарни састав већ састав горивих компонента. У општем случају топлотна моћ гасовитих горива одређује се као збир производа запреминског учешћа појединих компонента r_i и одговарајућих топлотних моћи угљоводоничних једињења у њему (H_i):

$$H = \sum_{i=1}^{i=n} r_i H_i \quad \text{kJ/m}^3$$

или примењено

- за доњу топлотну моћ

$$H_d = 107,8H_2 + 126,2CO + 358,7CH_4 + 594,8C_2H_4 + 565,1C_2H_2 + 644,2C_2H_6 + 928,92C_3H_8 + 1236,5C_4H_{10} + 877,0C_3H_6 + 1155,8C_4H_8 + 234,6H_2S \quad \text{kJ/m}^3$$

- за горњу топлотну моћ

$$H_g = 127,5H_2 + 126,2CO + 398,1CH_4 + 634,2C_2H_4 + 584,8C_2H_2 + \dots \quad \text{kJ/m}^3$$

Садржај горивих компонента дат је у запреминским процентима (% V/V), а бројеви уз садржај представљају стоте делове одговарајућих топлотних моћи.

Прерачунавање топлотних моћи са једне условне масе на другу

Прерачунавање топлотних моћи горива са једне условне масе на другу врши се на основу познатих вредности топлотних моћи (добијених експериментално или рачунски) и елементарног састава горива. Користећи већ познате изразе за прерачунавање састава горива са једне условне масе на другу, добијају се одговарајући изрази за топлотне моћи. Они ће бити изражени у зависности од топлотних моћи аналитичке масе горива, јер се на овој маси врши анализа горива и експериментално одређивање топлотне моћи:

- за радну масу горива

$$H_{gr} = H_{gr} \frac{100 - W_G}{100}, \quad H_{dr} = H_{da} \frac{100 - W_G}{100} - 25W_G,$$

- за апсолутно суву масу горива

$$H_{gs} = H_{ga} \frac{100}{100 - W_{Ha}}, \quad H_{ds} = (H_{da} + 25W_{Ha}) \frac{100}{100 - W_{Ha}}$$

- за чисту гориву масу

$$H_{gg} = H_{ga} \frac{100}{100 - (W_{Ha} + A_a)}, \quad H_{dg} = (H_{da} + 25W_{Ha}) \frac{100}{100 - (W_{Ha} + A_a)}$$

- за органску масу горива

$$H_{do} = (H_{da} + 25W_{Ha}) \frac{100}{100 - (W_{Ha} + A_a + S_{Ga})}, \quad H_{go} = H_{ga} \frac{100}{100 - (W_{Ha} + A_a + S_{Ga})}$$

2 ОСНОВИ САГОРЕВАЊА

Сагоревање представља сложен физичко-хемијски процес оксидације горива праћен интензивним ослобађањем топлоте. У наставку, процес сагоревања ће бити разматран крајње упрошћено, разматрањем само почетног и крајњег стања процеса (Слика 2.1).

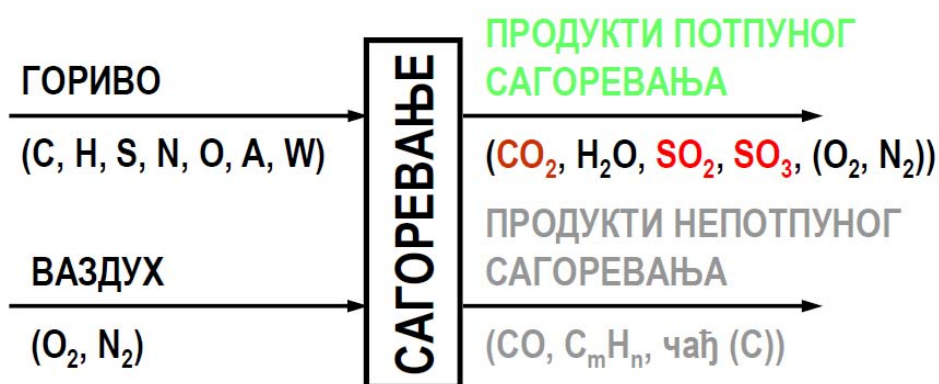


Слика 2.1: Шематски приказ процеса сагоревања

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 2.2). При потпуном сагоревању, у општем случају, продукте сагоревања чине:

- CO_2 - настао сагоревањем угљеника из горива,
- H_2O - настала сагоревањем водоника из горива, као и од влаге која потиче 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 - потиче из ваздуха који се користи за процес сагоревања.

Угљен-диоксид*, водена пара односно вода и сумпор-диоксид представљају праве продукте сагоревања, азот и кисеоник чине условне продукте сагоревања јер највећим делом потичу из ваздуха који се доводи у процес сагоревања.



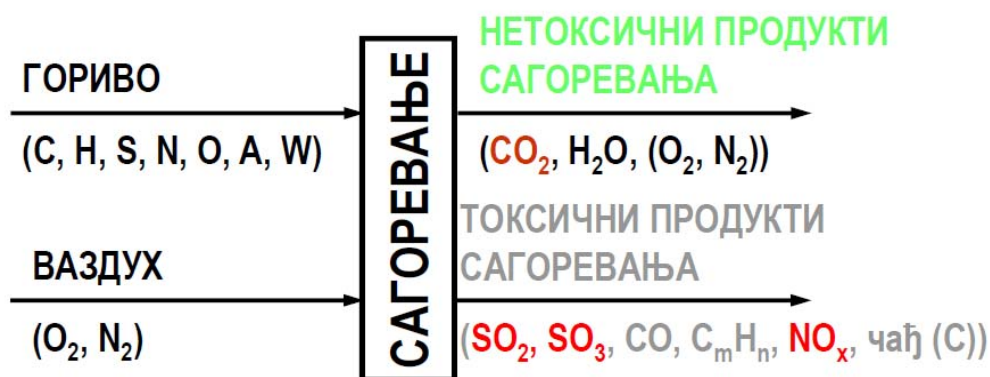
Слика 2.2. Подела продуката сагоревања према критеријуму потпуности сагоревања

* 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, у крајњим продуктима сагоревања налазе се и гориве компоненте, које би, да је сагоревање било потпуно, ослободиле одређену количину топлоте коју садрже. Продукти непотпуног сагоревања су:

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

Продукти потпуног и непотпуног сагоревања могу се поделити и према критеријуму токсичности (Слика 2.3) на нетоксичне и токсичне продукте сагоревања.



Слика 2.3: 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).

2.1 СТЕХИОМЕТРИЈСКЕ ЈЕДНАЧИНЕ САГОРЕВАЊА

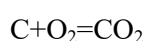
Стехиометријске једначине сагоревања су једначине које дефинишу:

- односе у којим се међусобно једине угљеник, водоник и сумпор са кисеоником,
- теоријску количину кисеоника, односно, ваздуха потребну за потпуно сагоревање,
- количину продуката сагоревања која настаје у процесу сагоревања и
- количину топлоте се ослобађа у процесу сагоревања.

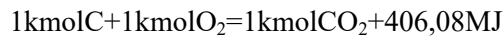
Ове једначине, написане за све гориве елементе, истовремено омогућавају одговарајући прорачун за било које реално гориво.

2.1.1 СТЕХИОМЕТРИЈСКА ЈЕДНАЧИНА САГОРЕВАЊА УГЉЕНИКА

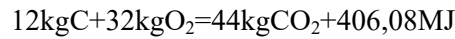
Реакција потпуног сагоревања угљеника може се приказати изразом:



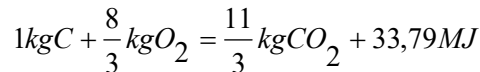
Узимајући за јединицу количине супстанције 1 kmol, добија се:



односно

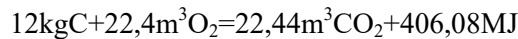


или

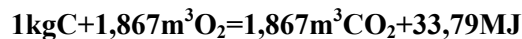


Претходна једначина представља класичну стехиометријску једначину: за потпуно сагоревање једног килограма угљеника неопходно је потребна количина од $8/3$ kg кисеоника и при тој реакцији настаје $11/3$ kg угљен-диоксида и развија се количина топлоте од 33,79 MJ.

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



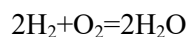
или



Аналогно претходном, један килограм угљеника при потпуном сагоревању троши 1,867 кубних метара кисеоника и као резултат реакције настаје 1,867 кубних метара угљен-диоксида и количина топлоте од 33,79 MJ.

2.1.2 СТЕХИОМЕТРИЈСКА ЈЕДНАЧИНА САГОРЕВАЊА ВОДОНИКА

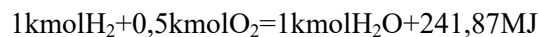
Реакција потпуног сагоревања водоника изражава се једначином:



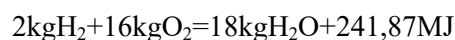
Узимајући, као и раније, за јединицу количине супстанције 1 kmol, добија се:



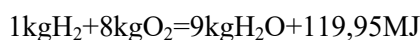
Количина топлоте Q која настаје сагоревањем једног килограма водоника може имати две вредности, зависно од тога да ли је вода охлађена на околну температуру или остаје у парном стању. За случај када се водена пара налази у парном стању добија се нешто мања количина топлоте (мања за топлоту добијену кондензацијом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



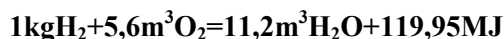
или



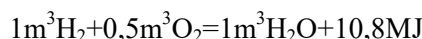
Напомена: Количина топлоте настала сагоревањем 1 kg водоника није једнака половини вредности 241,87 MJ, јер је тачна вредност молекулске масе водоника 2,016, а не 2, како је у једначинама, због једноставности приказано. Стехиометријска једначина сагоревања водоника може се приказати у следећем облику:



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

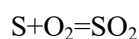


или

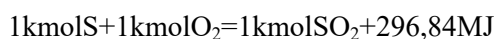


2.1.3 СТЕХИОМЕТРИЈСКА ЈЕДНАЧИНА САГОРЕВАЊА СУМПОРА

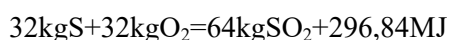
Реакција потпуног сагоревања сумпора гласи:



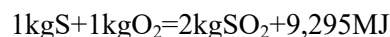
односно



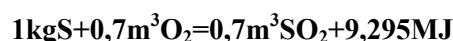
или



Стехиометријска једначина сагоревања јединице масе сумпора, коначно, гласи:

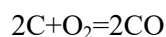


или

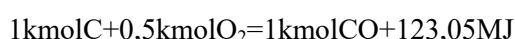


2.1.4 СТЕХИОМЕТРИЈСКА ЈЕДНАЧИНА САГОРЕВАЊА УГЉЕНИКА

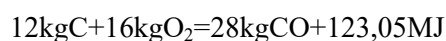
У случају када је количина кисеоника, која се налази у простору у коме се процес сагоревања одвија, недовољна за потпуно остварење процеса, настаје непотпуно сагоревање, при чему код реалних горива настаје увек угљен-моноксид. Том приликом део топлоте се губи, па је утврђивање услова у којима до ове 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

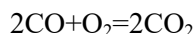
$$1\text{kgC} + 0,933\text{m}^3\text{O}_2 = 1,867\text{m}^3\text{CO} + 10,26\text{MJ}$$

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 уређаја (мотора пећи, котлова) је ограничена и прописима за заштиту животне средине.

2.1.5 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

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

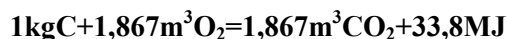
2.1.6 ХЕСОВ ЗАКОН

Hess-ов закон дефинише да количина топлоте која се добије или утроши током одређене термохемијске реакције не зависи од пута одвијања реакције, већ само од почетног и крајњег стања.

Овај 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.

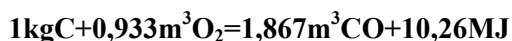
Доказ

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



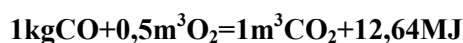
добија се количина топлоте од 33,8 MJ.

Из поглавља 2.1.4 следи да се приликом сагоревања угљеника у угљен-моноксид:



ослободи количина топлоте од 10,26 MJ.

Из поглавља 2.1.5 следи да сагоревањем угљен-моноксида у угљен-диоксид:



Настаје количина топлоте од 12,64 MJ.

Уколико се претпостави да процес сагоревања угљеника се одвија двостепено, тако што угљеник прво сагорева у угљен-моноксид, а затим угљен-моноксид сагорева у угљен-диоксид, може се према претходним једначинама извести укупни топотни биланс овог двостепеног процеса. Како сагоревањем 1 kg угљеника настаје 1,867 m³ угљен-моноксида, следи одговарајући топлотни биланс:

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

чиме је Хесов закон доказан.

2.2 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.

2.2.1 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 сагоревања.

2.2.1.1 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.

2.2.1.1.1 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. Умањење теоријске количине кисеоника за количину кисеоника у самом гориву се не примењује за угљеве, док се тај члан узима у обзир када су у питању течна и гасовита горива.

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

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

односно:

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

2.2.1.1.2 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, течна 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:

$$O_{\min} = m + \frac{n}{4} \quad \text{kmol/kmol}$$

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

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

где су:

m - број атома угљеника, а

n - број атома водоника у гориву типа C_mH_n .

За течна 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 $C_mH_nO_o$.

2.2.1.1.3 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 компонента са r_i , 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 i -тој угљоводоничној компоненти,

n_i - број атома водоника у i -тој угљоводоничној компоненти.

2.2.1.2 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:

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

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

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

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

2.2.1.3 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 потпуно сагоревање. 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 простору 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 уља за ложење 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, па у овим условима 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 је 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.

2.2.1.4 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.

2.2.1.4.1 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 количина продуката сагоревања (угљен-диоксида и воде) се одређује на следећи начин:

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

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

јер се у продуктима сагоревања поред воде настале сагоревањем водоника налази и вода која потиче из горива (влага) - g_W и влаге из ваздуха (услед његове влажности) - $g_{W'}$. У техничким прорачунима претпоставља се да је $g_{W'}=0$, тј. садржај влаге у ваздуху се занемарује. Количина сумпор-диоксида израчунава се по следећем обрасцу:

$$V_{SO_2} = 0,7g_S, \quad m^3/kg$$

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. Количина кисеоника и азота у продуктима сагоревања одређује се према следећим обрасцима:

$$V_{N_2} = 0,79L + 0,8g_N, \quad m^3/kg$$

$$V_{O_2} = 0,21(L - L_{\min}) = 0,21(\lambda - 1)L_{\min}, \quad m^3/kg$$

2.2.1.4.2 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_mH_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 у продуктима сагоревања одређује се на начин који је већ претходно приказан.

2.2.1.4.3 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 -тој угљоводоничној компоненти.

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

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

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 -тој угљоводоничној компоненти.

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

2.2.1.4.4 Количине продуката сагоревања

Израчунавање количине продуката сагоревања врши се на основу познатих, односно израчунатих вредности појединих компонента 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:

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

а количина сувих продуката сагоревања:

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

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

– за чврста горива

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

– за течна горива

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

– за гасовита горива

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

2.2.1.4.5 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:

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

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

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

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

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

Састав сувих продуката сагоревања израчунава се према следећим изразима:

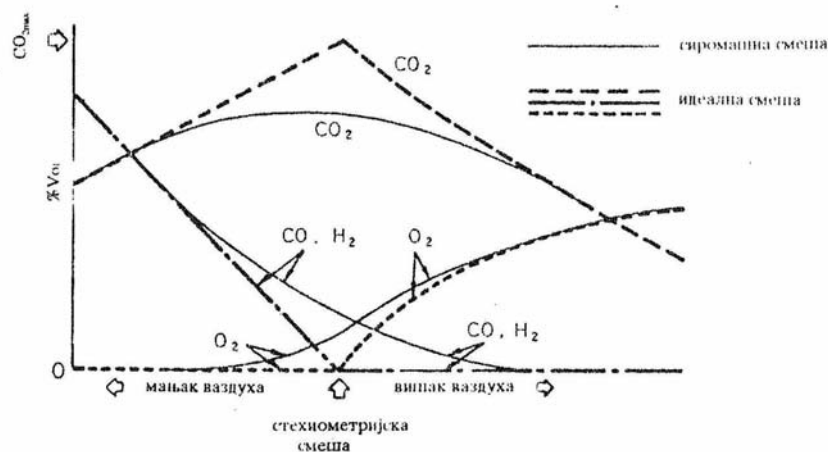
$$CO_{2s} = \frac{V_{CO_2}}{V_s} 100, \quad \% V/V$$

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

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

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

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} (Слика 2.4).



Слика 2.4: 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 .



Аналогно претходном ставу, биће онда и

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

2.2.2 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 садржаја низа продуката потпуног и непотпуног сагоревања, коначних и међу продуката реакција сагоревања.

Састав сувих продуката потпуног сагоревања једнак је

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

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 продукт 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.

2.2.2.1 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:

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

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

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

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

а стварна количина ваздуха,

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

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:

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

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:

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

2.2.3 ТЕМПЕРАТУРА САГОРЕВАЊА

Температура сагоревања представља температуру коју имају гасовити продукти, као резултат загревања 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, при чему 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 са околином.

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 сагоревања,
- c_{pmi} - средњи специфични топлотни капацитет i -те компоненте продуката сагоревања у температурском интервалу $t_o - t_s$.

У претходном изразу 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 претходног израза 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 сагоревања 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:

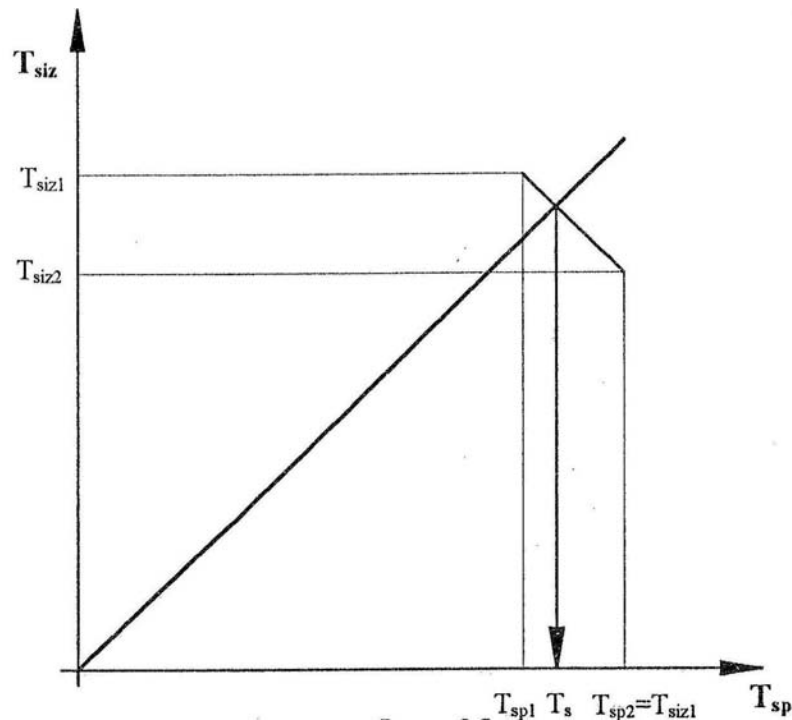
$$t_s = \frac{h_G + L_s h_v + H_d - H_{ps} - Q_d - Q_{tg}}{\sum_{i=1}^k V_i c_{pmi}}, \quad ^\circ\text{C}$$

где је:

H_{ps} - губитак услед непотпуног сагоревања.

Одређивање температуре сагоревања отежано 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 итеративних 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 2.5) на чијој се апсиси 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 2.5: Поступак одређивања температуре сагоревања графо-аналитичком методом

Температура сагоревања може да се израчуна и на основу примене познатих израза за промену специфичног топлотног капацитета од температуре:

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

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

$$c_p = a + bt$$

После замене и сређивања добија се следећи израз:

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

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

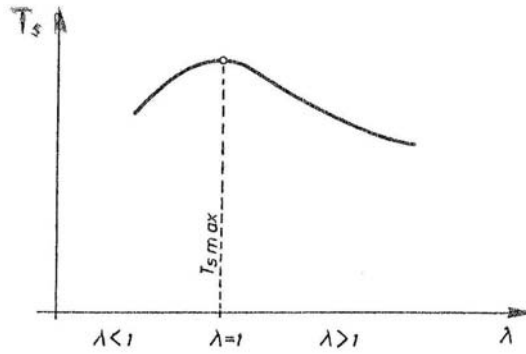
$$\sum V_i a_i = A, \quad \sum V_i b_i = B, \quad h_G + L_s h_v + H_d = C_1$$

добија се квадратна једначина по t_s

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

чијим решавањем директно, без итеративних 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 2.6).



Слика 2.6: Промена температуре сагоревања у зависности од коефицијента вишка ваздуха