

# Сагоревање

## Дефиниција сагоревања

Сагоревање представља сложен физичко хемијски процес интензивне оксидације горива који је праћен ослобађањем знатне количине топлоте као и одређеним светлосним ефектима. Сагоревање се у основи састоји од низа термохемијских реакција. Термохемијске реакције које су праћене интензивним ослобађањем топлоте називамо егзотермним термохемијским реакцијама, док термохемијске реакције за чије одвијање треба довести у утрошити одређену количину топлоте називамо ендотермним термохемијским реакцијама.

Приликом одвијања одређене хемијске реакције разликујемо тзв. реактанте који представљају једињења која у одређеним условима међусобно реагују стварајући нова једињења која називамо продуктима хемијске реакције. У случају егзотермних термохемијских реакција, у које спада сагоревање, поред материјалних продуката сагоревања добијамо и одређену количину ослобођене топлоте.

Када говоримо о реактантима који током сагоревања ступају у интеракцију треба напоменути да један реактант представља гориво док је други оксидатор. Код класичног сагоревања оксидатор је кисеоник и то најчешће кисеоник из околног ваздуха.

У зависности од количине оксидатора кога доводимо у процес сагоревање може бити потпуно и непотпуно.

Код потпуног сагоревања, када у процесу сагоревања располажемо довољном количином оксидатора да би дата количина горива у потпуности сагорела и ослободила целокупну потенцијалну хемијску енергију коју дато гориво садржи, продукте сагоревања чине:  $\text{CO}_2$  – *nastao sagorevanjem ugljenika iz goriva*.

$\text{H}_2\text{O}$  – настала сагоревањем водоника из горива,

$\text{SO}_2$  – настао сагоревањем сумпора из горива,

$\text{N}_2$  – који се, код класичног сагоревања, може налазити у ваздуху у коме се налази и кисеоник који се користи као оксидатор у процесу, а може се налазити и у самом гориву,

$\text{O}_2$  – који се, код класичног сагоревања, може налазити у ваздуху, затим се може довести у процес као чист кисеоник а може бити интегрисан и у молекулу горива.

У случају непотпуног сагоревања, поред већ наведених продуката потпуног сагоревања наилазимо и на несагореле гориве компоненте. Продукте непотпуног сагоревања чине:

$\text{CO}$  – настао приликом непотпуног сагоревања угљеника из горива,

$\text{C}_m\text{H}_n\text{O}_k$  – несагорели угљоводоници (код сагоревања угљоводоничног горива),

$\text{H}_2$  – водоник,

$\text{C}$  – угљеник у чађи, пепелу и др.

Према агрегатном стању у коме се налазе гориво и сагоревање може бити:

**Хомогено** – ако су обе компоненте (гориво и оксидатор) у истој фази (случај сагоревања гасовитих и течних горива).

**Хетерогено** – ако се агрегатно стање горивих компоненти разликује (случај сагоревања чврстих горива).

Према карактеру протока смеше гориво/оксидатор, сагоревање може бити:

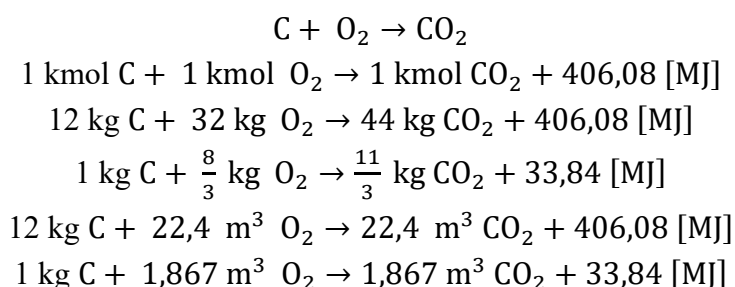
**ламинарно**, или

**турбулентно**.

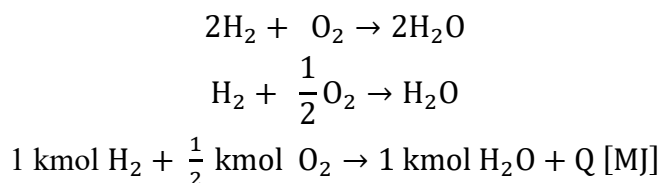
## Стехиометријске једначине сагоревања

Једначине које нам показују у којим међусобним односима гориве компоненте реагују са оксидатором, колика количина оксидатора је потребна за процес потпуног сагоревања, која количина продуката сагоревања настаје током одвијања процеса сагоревања, као и колика количина топлоте се ослободи том приликом, називају се стехиометријске једначине сагоревања. Ове једначине написане су за све гориве компоненте. Будући да је процес сагоревања крајње сложен стехиометријске једначине нам дају само почетно и крајње стање приликом процеса сагоревања. Такође, треба напоменути да се процеси сагоревања приказани стехиометријским једначинама одвијају са тачно потребном количином чистог кисеоника за формирање одређених продуката сагоревања.

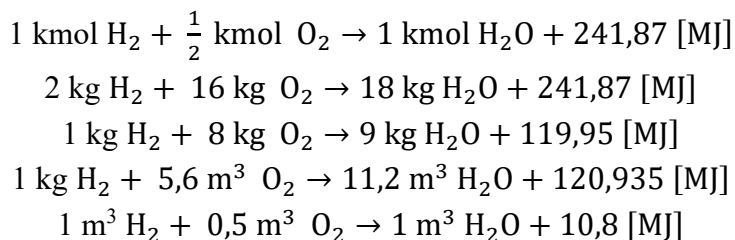
### Стехиометријска једначина потпуног сагоревање угљеника



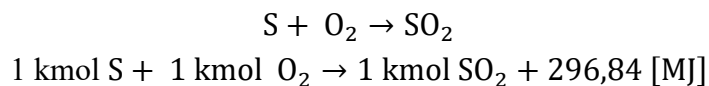
### Стехиометријска једначина сагоревање водоника

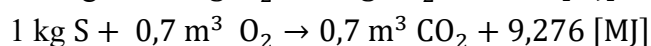
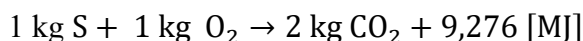
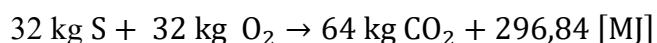


Количина топлоте  $Q$  која се ослобађа сагоревањем  $1 \text{ kmol H}_2$  може имати две вредности зависно од тога да ли је вода охлађена на околну температуру или остаје у парном стању. За случај да водена пара у продуктима сагоревања остаје у парном стању добијамо:

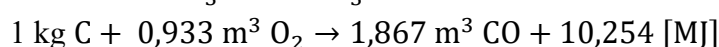
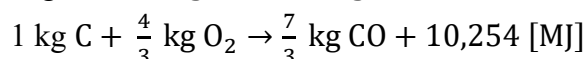
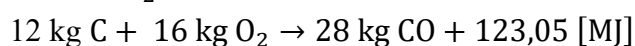
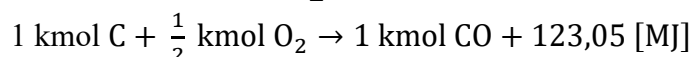
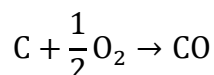
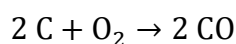


### Стехиометријска једначина потпуног сагоревање сумпора

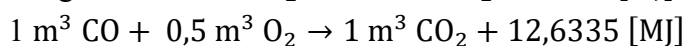
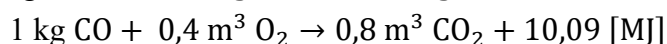
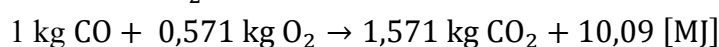
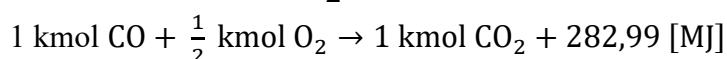
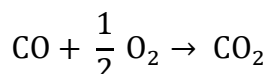
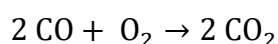




### Стехиометријска једначина непотпуног сагоревања угљеника



### Стехиометријска једначина потпуног сагоревања угљенмоноксида

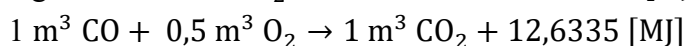
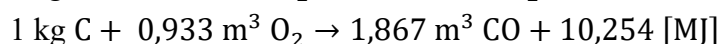
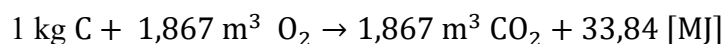


### Hess-ов закон

Формулација Hess-овог закона гласи:

Количина топлоте коју добијемо или утрошимо током одвијања одређене термохемијске реакције не зависи од пута одвијања реакције, већ искључиво од почетног и крајњег стања реакције.

Hess -ов закон преко стехиометријских једначина:



Видимо да је:

$$10,254 + 1,867 \cdot 12,6335 = 33,84.$$

## Hess-ов троугао

За графички приказ Хесс-овог закона послужимо се Хесс-овим троуглом (слика 1.) где је:

$Q_{1,2}$  – Топлота ослобођена приликом одвијања хемијске реакције чије је почетно стање 1, а крајње стање 2.

$Q_{2,3}$  – Топлота ослобођена приликом одвијања хемијске реакције чије је почетно стање 2, а крајње стање 3.

$Q_{1,3}$  – Топлота ослобођена приликом одвијања хемијске реакције чије је почетно стање 1, а крајње стање 3.

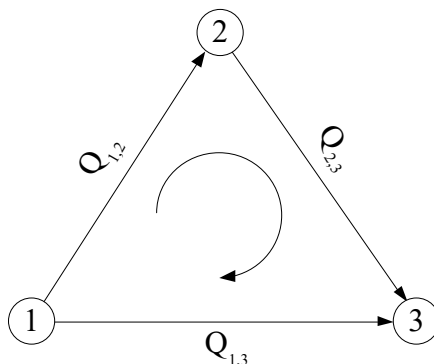
Тада имамо да је:

$$Q_{1,2} + Q_{2,3} - Q_{1,3} = 0,$$

$$Q_{1,2} + Q_{2,3} = Q_{1,3},$$

или

$$Q_{2,3} = Q_{1,3} - Q_{1,2}.$$



Слика 1. – Hess-ов троугао

## Теоријска количина кисеоника потребна за потпуно сагоревање $O_{min}$

Теоријска количина кисеоника (оксидатора) представља минимално потребну количину кисеоника (оксидатора) неопходну за потпуно сагоревање свих горивих компоненти у одређеној количини горива. Ова количина кисеоника (оксидатора) зависи превасходно од састава горива, обележава се са  $O_{min}$  а изражава се као количина кисеоника (оксидатора) по количини сагорелог горива т.ј.  $\left[\frac{kg}{kg}\right]$  или  $\left[\frac{m^3}{kg}\right]$  за чврста и течна горива, односно  $\left[\frac{m^3}{m^3}\right]$  за гасовита горива.

Уколико нам је познат елементарни састав горива изражен преко масених удела појединих компонената горива, имамо:

$$O_{min} \left[\frac{kg}{kg}\right] = O_{min_C} g_C + O_{min_H} g_H + O_{min_S} g_S - g_O,$$

Где су:

$O_{min_C} \left[\frac{kg}{kg}\right] = \frac{8}{3}$ , теоријска количина кисеоника (оксидатора) потребна за потпуно сагоревање угљеника,

$Omin_H \left[ \frac{kg}{kg} \right] = 8$ , теоријска количина кисеоника (оксидатора) потребна за потпуно сагоревање водоника.

$Omin_S \left[ \frac{kg}{kg} \right] = 1$ , теоријска количина кисеоника (оксидатора) потребна за потпуно сагоревање сумпора,

$g_C [\%t/m]$ , масени удео угљеника у гориву,

$g_H [\%t/m]$ , масени удео водоника у гориву,

$g_S [\%t/m]$ , масени удео сумпора у гориву,

$g_O [\%t/m]$ , масени удео кисеоника у гориву.

После замене одговарајућих вредности добијамо:

$$Omin \left[ \frac{kg}{kg} \right] = \frac{8}{3} g_C + 8g_H + g_S - g_O.$$

Увођењем Molier-ове константе:

$$\sigma = 1 + \frac{3g_H - \frac{3}{8}(g_O - g_S)}{g_C},$$

Добијамо:

$$Omin \left[ \frac{kg}{kg} \right] = 2,67\sigma g_C.$$

Такође у зависности од јединица у којима изражавамо  $Omin$  можемо користити и следеће обрасце:

$$Omin \left[ \frac{kmol}{kg} \right] = \frac{\sigma g_C}{12},$$

и

$$Omin \left[ \frac{m^3}{kg} \right] = 1,867\sigma g_C.$$

Овај изрази углавном се користи за чврста горива.

Уколико имамо течно гориво дефинисано општим изразом за угљоводонична горива типа  $C_mH_n$  користимо следеће обрасце за израчунавање теоријске количине кисеоника:

$$Omin \left[ \frac{kmol}{kmol} \right] = m + \frac{n}{4},$$

$$Omin \left[ \frac{m^3}{kg} \right] = \frac{\left(m + \frac{n}{4}\right) \cdot 22,4}{12m + n},$$

$$Omin \left[ \frac{kg}{kg} \right] = \frac{\left(m + \frac{n}{4}\right) \cdot 32}{12m + n},$$

Где су:  $m$  – број атома угљеника, а  $n$  – број атома водоника  $C_mH_n$ .

За течна горива састављена из више угљоводоничних компоненти типа  $C_mH_n$  теоријска количина кисеоника рачуна се према следећем изразу:

$$O_{\min} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] = 22,4 \cdot \sum_{i=1}^k \frac{m_i + \frac{n_i}{4}}{12m_i + n_i}.$$

Уколико су течна горива састављена из више угљоводоничних компоненти типа  $C_mH_nO_k$  теоријска количина кисеоника рачуна се према сличним изразима:

$$O_{\min} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] = 22,4 \cdot \sum_{i=1}^k \frac{(m_i + \frac{n_i}{4} - \frac{k_i}{2})}{12m_i + n_i + 16k_i},$$

односно

$$O_{\min} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right] = 32 \cdot \sum_{i=1}^k \frac{(m_i + \frac{n_i}{4} - \frac{k_i}{2})}{12m_i + n_i + 16k_i}.$$

Код гасовитих горива теоријска количина кисеоника рачуна се према саставу горива, која се опет најчешће састоје из угљенмооксида, водоника и гасовитих угљоводоника. Уколико запренинско учешће одређене гасовите компоненте у гориву обележимо са  $r_i$  теоријску количина кисеоника израчунавамо према следећем изразу:

$$O_{\min} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \right] = \frac{1}{2} (r_{CO} + r_H) + \sum_{i=1}^k \left( m_i + \frac{n_i}{4} \right) \cdot r_i - r_O,$$

Где су  $m_i$  и  $n_i$  бројеви атома угљеника и водоника, респективно, у угљоводоничној компоненти горива.

## Теоријска количина ваздуха потребна за потпуно сагоревање $L_{\min}$

Будући да се за процесе сагоревања често као оксидатор користи кисеоник из ваздуха, свакако је важно одредити теоријску или минимално потребну количину ваздуха у којој је садржана минимално потребна количина кисеоника неопходна за потпуно сагоревање одређеног врсте горива.

Теоријска количина ваздуха обележава се са  $L_{\min}$  и рачуна се на основу теоријске количине кисеоника, према следећим изразима:

$$L_{\min} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right] = \frac{O_{\min} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right]}{0,232},$$

$$L_{\min} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] = \frac{O_{\min} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]}{0,21},$$

$$L_{\min} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \right] = \frac{O_{\min} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \right]}{0,21}.$$

Где 0,21 и 0,232 представљају заокружене вредности запреминског и масеног учешћа кисеоника у ваздуху респективно.

## Стварна количина кисеоника $O_s$ , ваздуха $L_s$ и коефицијент вишка ваздуха $\lambda$

Стварна количина кисеоника (оксидатора) или ваздуха, у зависности од тога да ли имамо сагоревање са чистим кисеоником или са кисеоником који се налази у ваздуху, често се разликује од теоретски потребне количине кисеоника односно ваздуха потребне за потпуно сагоревање датог горива.

Стварна количина кисеоника обележава се са  $O_s$ , а стварна количина ваздуха са  $L_s$  и израчунавају се преко теоријске количине кисеоника  $O_{min}$ , односно теоријске количине ваздуха  $L_{min}$  према следећим изразима:

$$O_s \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kg}}, \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}, \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \right] = \lambda \cdot O_{min} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kg}}, \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}, \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \right],$$

односно,

$$L_s \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kg}}, \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}, \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \right] = \lambda \cdot L_{min} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kg}}, \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}, \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \right].$$

Са  $\lambda$  је означен коефицијент вишка ваздуха који представља однос стварне и теоријски потребне количине ваздуха односно кисеоника (оксидатора) у току процеса сагоревања:

$$\lambda = \frac{L_s}{L_{min}},$$
$$\lambda = \frac{O_s}{O_{min}}.$$

Уколико коефицијента вишка ваздуха има вредност 1 ( $\lambda=1$ ), имамо стехиометријску смешу горива и ваздуха (оксидатора), за вредност коефицијента вишка ваздуха мању од 1 ( $\lambda<1$ ) имамо богату смешу горива и ваздуха (оксидатора), док за вредност коефицијента вишка ваздуха већу од 1 ( $\lambda>1$ ) имамо сиромашну смешу горива и ваздуха (оксидатора).

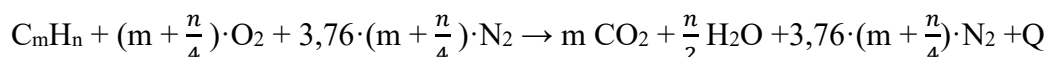
У англосаксонској литератури се чешће користи термин „equivalence ratio“ ( $\phi$ ) који је инверзна вредност коефицијент вишка ваздуха.

$$\phi = 1/\lambda.$$

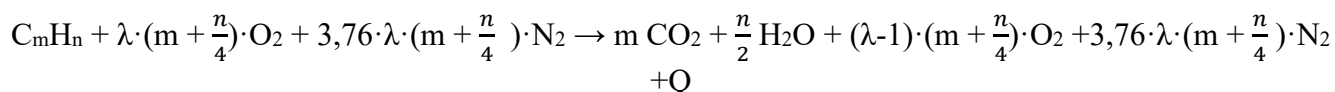
## Материјални биланс сагоревања горива типа $C_mH_n$

У општем случају, потпуно сагоревање угљоводоника  $C_mH_n$  у ваздуху се представља хемијском једначином према којој поменути угљоводоник са кисеоником из ваздуха, а уз присуство азота из ваздуха, реагује стварајући угљен-диоксид, воду и ослобађајући одређену количину топлоте,  $Q$ . У продуктима сагоревања се поред угљендиоксида и воде налази и азот из ваздуха у чијем је присуству дошло до реакције.

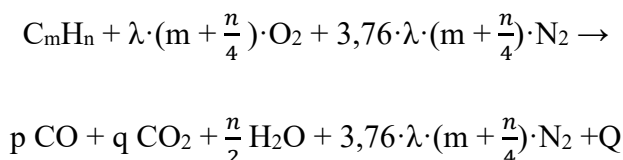
Ако је коефицијент вишка ваздуха једнак 1 ( $\lambda=1$ ), а сагоревање се одвија у присуству ваздуха, а самим тим и у присуству азота, тада се једначина сагоревања може представити као:



Уколико је  $\lambda>1$ , тј. постоји вишак ваздуха, у реакцију ће ући више кисеника, али и сразмерно више азота. Међу продуктима сагоревања ће се наћи вишак ваздуха, и наравно сав азот који не реагује, већ се само у његовом присуству одвија реакција:



Ако је  $\lambda < 1$ , тј. ако се сагоревање одвија са мањком кисеоника (непотпуно сагоревање), у продуктима сагоревања неће бити кисеоника, а део угљеника из угљоводоника сагорева до угљен-моноксида, CO, који се јавља у продуктима сагоревања:



Овде важи правило да број атома било ког хемијског елемента међу реактантима (на левој страни једначине) мора бити једнак броју атома истог елемента међу продуктима сагоревања (на десној страни једначине). Непознате вредности  $p$  и  $q$  се могу одредити из овог услова за атоме угљеника:

$$m = p + q$$

и атоме кисеоника:

$$2 \cdot \lambda \cdot (m + \frac{n}{4}) = p + 2 \cdot q + \frac{n}{2}$$

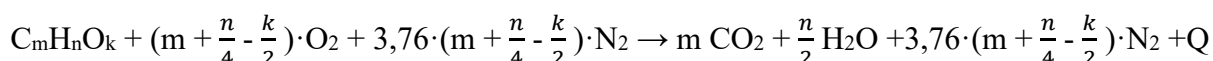
Општа једначина непотпуног сагоревања  $C_mH_n$  се краће може написати и као:



## Материјални биланс сагоревања горива типа $C_mH_nO_k$

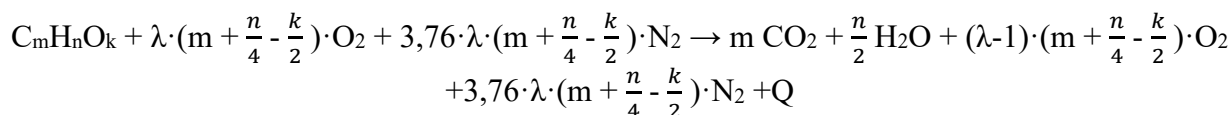
У општем случају, потпуно сагоревање угљоводоника  $C_mH_nO_k$  у ваздуху се представља хемијском једначином према којој поменути угљоводоник са кисеоником из ваздуха, а уз присуство азота из ваздуха, реагује стварајући угљен-диоксид, воду и ослобађајући одређену количину топлоте,  $Q$ . У продуктима сагоревања се поред угљендиоксида и воде налази и азот из ваздуха у чијем је присуству дошло до реакције.

Ако је коефицијент вишка ваздуха једнак 1 ( $\lambda=1$ ), а сагоревање се одвија у присуству ваздуха, а самим тим и у присуству азота, тада се једначина сагоревања може представити као:

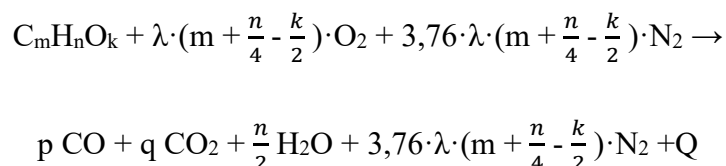


Уколико је  $\lambda > 1$ , тј. постоји вишак ваздуха, у реакцију ће ући више кисеника, али и сразмерно више азота. Међу продуктима сагоревања ће се наћи вишак ваздуха, и наравно сав азот који не реагује, већ се само у његовом присуству одвија реакција:





Ако је  $\lambda < 1$ , тј. ако се сагоревање одвија са мањком кисеоника (непотпуно сагоревање), у продуктима сагоревања неће бити кисеоника, а део угљеника из угљоводоника сагорева до угљен-моноксида, CO, који се јавља у продуктима сагоревања:



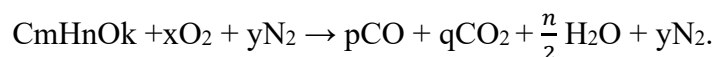
Овде важи правило да број атома било ког хемијског елемента међу реактантима (на левој страни једначине) мора бити једнак броју атома истог елемента међу продуктима сагоревања (на десној страни једначине). Непознате вредности  $p$  и  $q$  се могу одредити из овог услова за атоме угљеника:

$$m = p + q$$

и атоме кисеоника:

$$k + 2 \cdot \lambda \cdot (m + \frac{n}{4} - \frac{k}{2}) = p + 2 \cdot q + \frac{n}{2}$$

Општа једначина непотпуног сагоревања  $C_mH_nO_k$  се краће може написати и као:



## Температура сагоревања

Спонтано остварена температура продуката сагоревања под одређеним условима назива се температура сагоревања или температура пламена. Максимална вредност температуре сагоревања се постиже при адијабатским условима.

Обично се у инжењерској пракси процеси одвијају при изобарским и изохорским условима.

У циљу одређивања температуре сагоревања користимо први закон термодинамике. За изобарске услове важи да је:

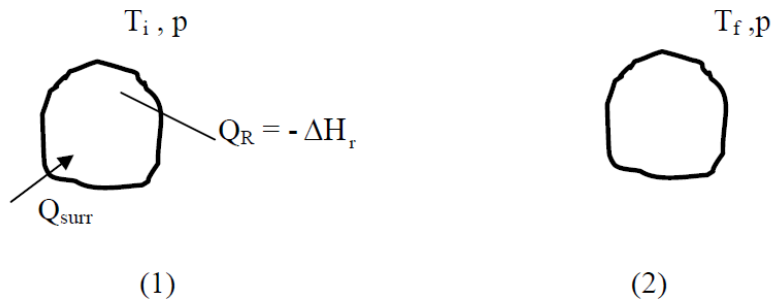
$$dQ = dh,$$

а након завршетка сагоревања имамо:

$$Q = \Delta H_P - \Delta H_R.$$

Посматрајмо затворен систем који садржи реактанте на некој почетној температури  $T_i$  и притиску  $p$ , ( $p = \text{const}$ ), сл. 1.4 (1). Током сагоревања молекули (атоми) реактаната реагују и хемијска енергија се претвара у топлоту (енталпију)  $\Delta H_r$ .

Ова енергија се преноси молекулима продуката  $Q_R = -\Delta H_r$  и температура продуката расте до температуре сагоревања  $T_s$ , сл. 3.



Слика 3. Шеме енергетског биланса током адијабатског сагоревања

Укупна размењена топлота износи;  $Q_{tot} = Q_{ok} + Q_R$ .

При адијабатским условима нема размене топлоте између система и околине:

$$Q_{ok} = 0, \text{ па је } Q_{tot} = Q_R = -\Delta H_r, \text{ тј.}$$

$$Q_{tot} = -\Delta H_r = \Delta H_P - \Delta H_R.$$

Погодно је да се израчуна промена енталпије на референтном стању на притиску од 0.1013 [MPa] и на одређеној температури.

Према томе:

$$-\Delta H_{r,T_{ref}} = (\Delta H_P)_{T_{ref}}^{T_S} - (\Delta H_R)_{T_{ref}}^{T_i},$$

или

$$-\Delta H_{r,T_{ref}} = (H_{T_S} - H_{T_{ref}})_P - (H_{T_i} - H_{T_{ref}})_R.$$

Непозната вредност температуре сагоревања не може бити израчуната јер се  $T_S$  implicitno имплицитно садржи у енталпији продуката сагоревања преко  $C_p = C_p(T)$ .

$$\Delta H_P = \int_{T_{ref}}^{T_S} (\sum n_i C_{p_i}) dT.$$

Рачунање  $T_S$  се обично врши нумеричким путем, користећи одговарајуће софтвере.

У основи температура сагоревања представља температуру коју имају гасовити продукти, а која настаје као резултат загревања топлотом која је настала сагоревањем горива. Пропорционална је топлотној моћи горива, а обрнуто пропорционална запремини продуката сагоревања и њиховом топлотном капацитету.

Постоје три температуре сагоревања.

**Калориметарска температура сагоревања** представља температуру сагоревања коју имају продукти сагоревања при потпуном сагоревању, при чему недолази до топлотних губитака насталих дисоцијацијом продуката сагоревања на повишеним температурама и услед размене топлоте са околином:

$$T_S = \frac{h_{GORIVA} + L_S h_V + H_d}{\sum_{i=1}^l V_i c_{pmi} \uparrow_{t_0}^{t_S}}$$

**Теоријска температуре сагоревања** представља температуру сагоревања коју имају продукти сагоревања при потпуном сагоревању, при чему се узимају у обзир топлотни губици настали дисоцијацијом продуката сагоревања на повишеним температурама, а не узимају се у обзир губици услед размене топлоте са околином:

$$T_S = \frac{h_{GORIVA} + L_S h_V + H_d - Q_{TO}}{\sum_{i=1}^l V_i c_{pmi} \uparrow_{t_0}^{t_S}}$$

**Стварна температура сагоревања** представља температуре сагоревања коју имају продукти сагоревања при потпуном сагоревању, при чему се узимају у обзир топлотни губици настали дисоцијацијом продуката сагоревања на повишеним температурама и услед размене топлоте са околином:

$$T_S = \frac{h_{GORIVA} + L_S h_V + H_d - Q_{dis} - Q_{TO}}{\sum_{i=1}^l V_i c_{pmi} \uparrow_{t_0}^{t_S}}$$

Треба напоменути да вредност температуре сагоревања зависи и од различитих параметара као што су: почетна температура гориве смеше, однос количине горива и оксидатора у горивој смеси, врсте горива и оксидатора, притиска при коме се формира горива смеша.