

# Топлотни уређаји и постројења

проф. др Владан Карамарковић, редовни професор

Асистенти

мр Миљан Марашевић

мр Раде Карамарковић

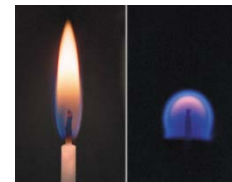
# Садржај



✓ ЕМИТЕРИ



- ✓ РАЗМЕЊИВАЧИ ТОПЛОТЕ
- ✓ МАТЕРИЈАЛНИ И ТОПЛОТНИ БИЛАНС



✓ САГОРЕВАЊЕ



✓ ГОРИВА

# Литература

- ✓ В. Ђурић, М. Богнер, Парни котлови, Грађевинска књига, Београд 1980.
- ✓ Г. Јанкес, М. Станојевић, М. Каран, Индустијске пећи и котлови, Машински факултет, Београд 1996.
- ✓ В. Карамарковић, Сагоревање и гасификација биомасе, Машински факултет, Краљево 2003.
- ✓ Интерна предавања
- ✓ Бројна литература на Интернету од стране универзитета и произвођача опреме

# Горива и сагоревање

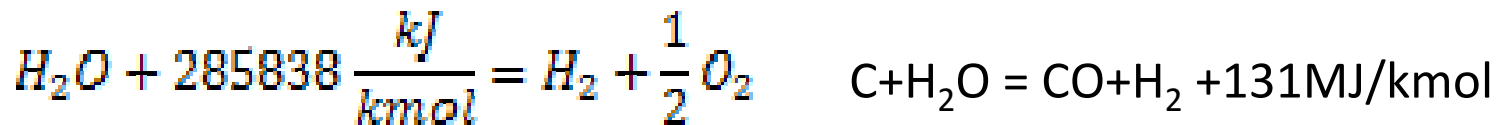
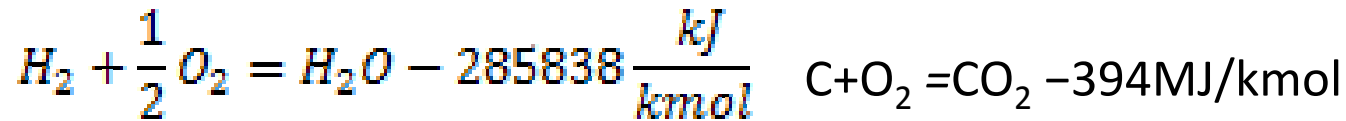
Гориво је материја, која при спајању са кисеоником ослобађа коначном брзином извесну количину енергије која се околни предаје у виду топлоте.

Енергија неопходна за одржавање атома у одређеном портеку (структури) назива се хемијском енергијом горива.

Хемијске реакције могу бити егзотермне и ендотермне.

Егзотермне реакције ослобађају топлоту.

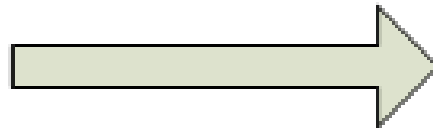
Ендотермне реакције да би се реализовале захтевају довођење топлоте.



Оригинално су се реакције у којима је трошен кисоник називале реакције оксидације, оне у којима је веза кисеоника са другим једињењима раскидана у корист продуката реакције називане су реакције редукције, касније су обе ове врсте реакција постале познате као редокс реакције. Редокс реакције данас дефинишемо као све оне реакције које изазивају промену хемијског оксидационог броја.

## Редукција

Оксидант +  $e^-$



Производ

(добијени електрони, оксидациони број се смањује)

## Оксидација

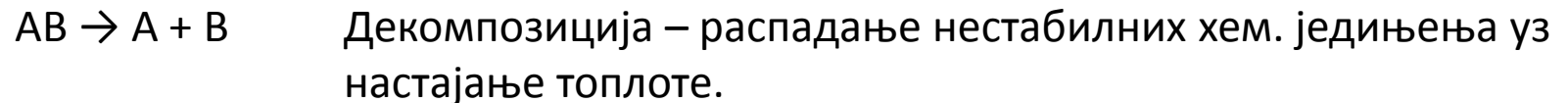
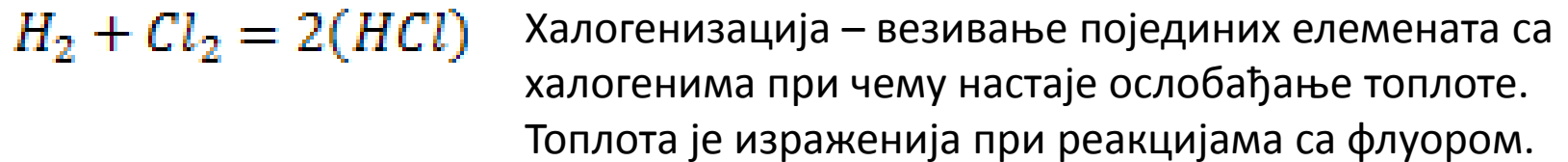
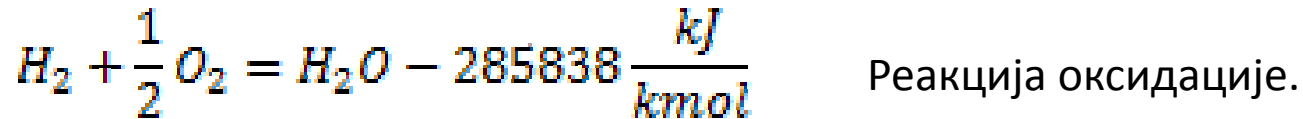
Редукција



Производ +  $e^-$

(изгубљени електрони, оксидациони број се повећава)

Оксидациони број једног атома је број електрона који он поседује а који могу да се укључе у формирање веза са другим атомима. Овај број има исту вредност као и валенца, само што може бити и позитиван и негативан. Повећање оксидационог броја одговара процесу оксидације, а смањење процесу редукције. Примери егзотермних реакција су:



Нуклеарне реакције.

Оксидо-редукционе реакције су важне у инжињерској пракси јер се примењују код сагоревања у топлотним машинама, у електрохемијској директној трансформацији енергије (батерије, гориве ћелије) и биолошком процесуирању хране, производњи биогаса, гасификацији, пиролизи....

# Горива

Горива се користе као извори топлоте (термоелектране, грејање), али се врло често користе и у технолошким процесима.

Према **агрегатном стању** горива се деле на:

- ✓ Чврста
- ✓ Течна
- ✓ Гасовита.

Према **постанку**:

- ✓ Природна
- ✓ Вештачка.

# Потрошња горива у свету

Број становика се од почетка до краја XX века повећао са 1.65 на 6 милијарди, и још увек расте. Истовремено са овим растом, расла је и потрошња енергије по становнику. Тај се раст у земљама у развоју кретао од 55 на 212 кг нафтног еквивалента<sup>[1]</sup>, док су на крају XX века развијене земље користиле 650 кг нафтног еквивалента. Током прошлог века човечанство је потрошило око 875 милијарди барела<sup>[2]</sup> нафте и врло је вероватно да ће током овог века бити потрошено чак и више (BP Statistical Review of World Energy, 2003.) .

<sup>[1]</sup> При изради енергетских биланса, пракса је да се категорије носилаца енергије исказују у килограмима или тонама нафтног еквивалента. Разлог за ово је поређење различитих горива са нафтом је доминација нафте на тржиштима енергената, јер њена тржишна вредност у многоме одређује и тржишне вредности других горива. Један килограм нафтног еквивалента је заправо топлотна моћ једног килограма нафте и износи 41,868 MJ или 11,63 kWh.

<sup>[2]</sup> барел је јединица запремине, 1bb = 0.159 m<sup>3</sup>



# Потрошња горива у свету



(а)



(б)

Потрошња примарне енергије у (а) развијеним земљама, (б) земљама у развоју.

Каква су предвиђања за будућност?

Сматра се да ће после ере нафте настати ера веће потрошње природног гаса.

По завршетку те ере предвиђа се ера у којој ће угаљ поново задобити примарно место међу енергентима. Да би се то десило потребно је да се развију процеси сагоревања који неће испуштати у атмосферу угљен диоксид. Ови процеси већ постоје али степен њихове савршености још увек није досегао комерцијални ниво.

# Чврста горива

Угаљ, биомаса и отпад.

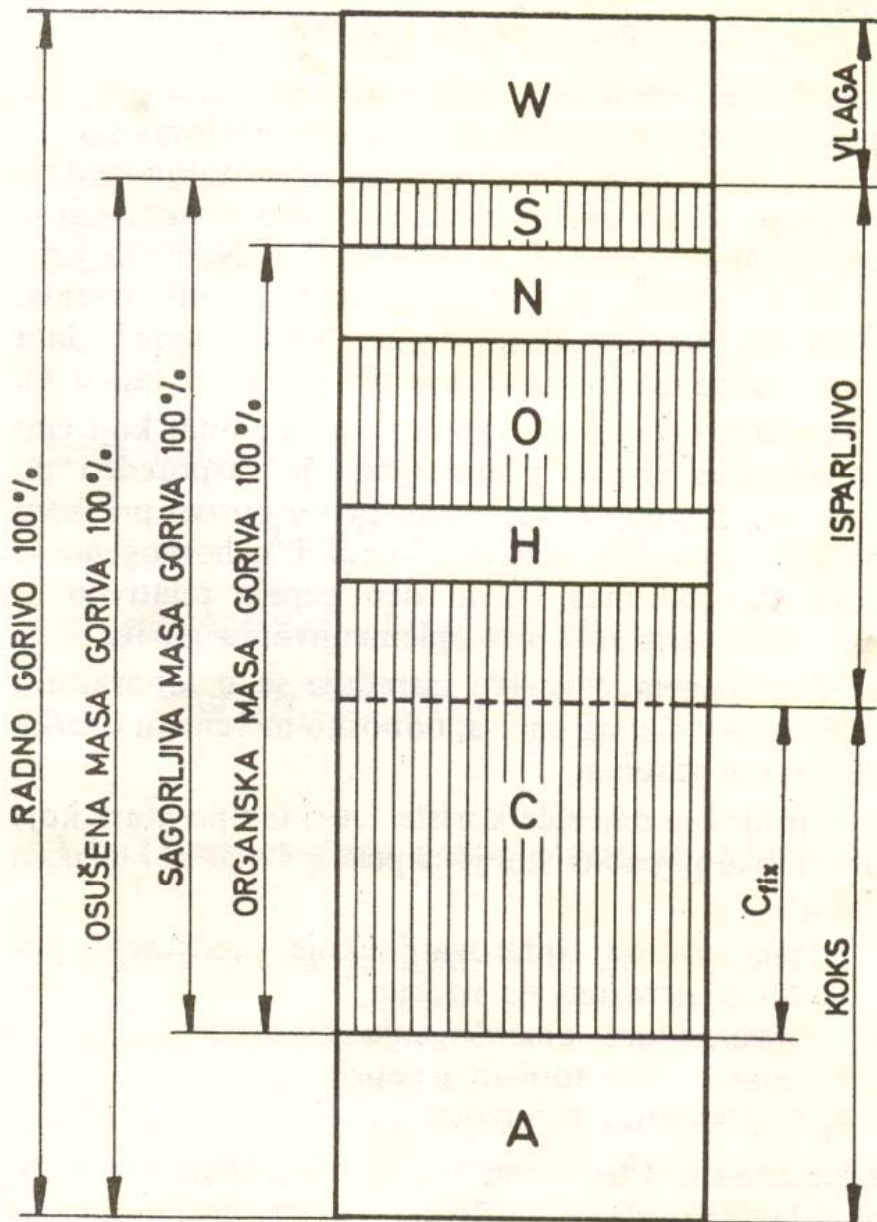
Угаљ је најважније фосилно гориво. Трансформацијом лигнита наша земља добива готово 70% укупно произведене електричне енергије. Обреновачки, костолачки и косовски басени.

<i>Баластне материје</i>	<i>Чист угаљ</i>
Влага	Чист кокс
Минералне материје	Испарљива материја

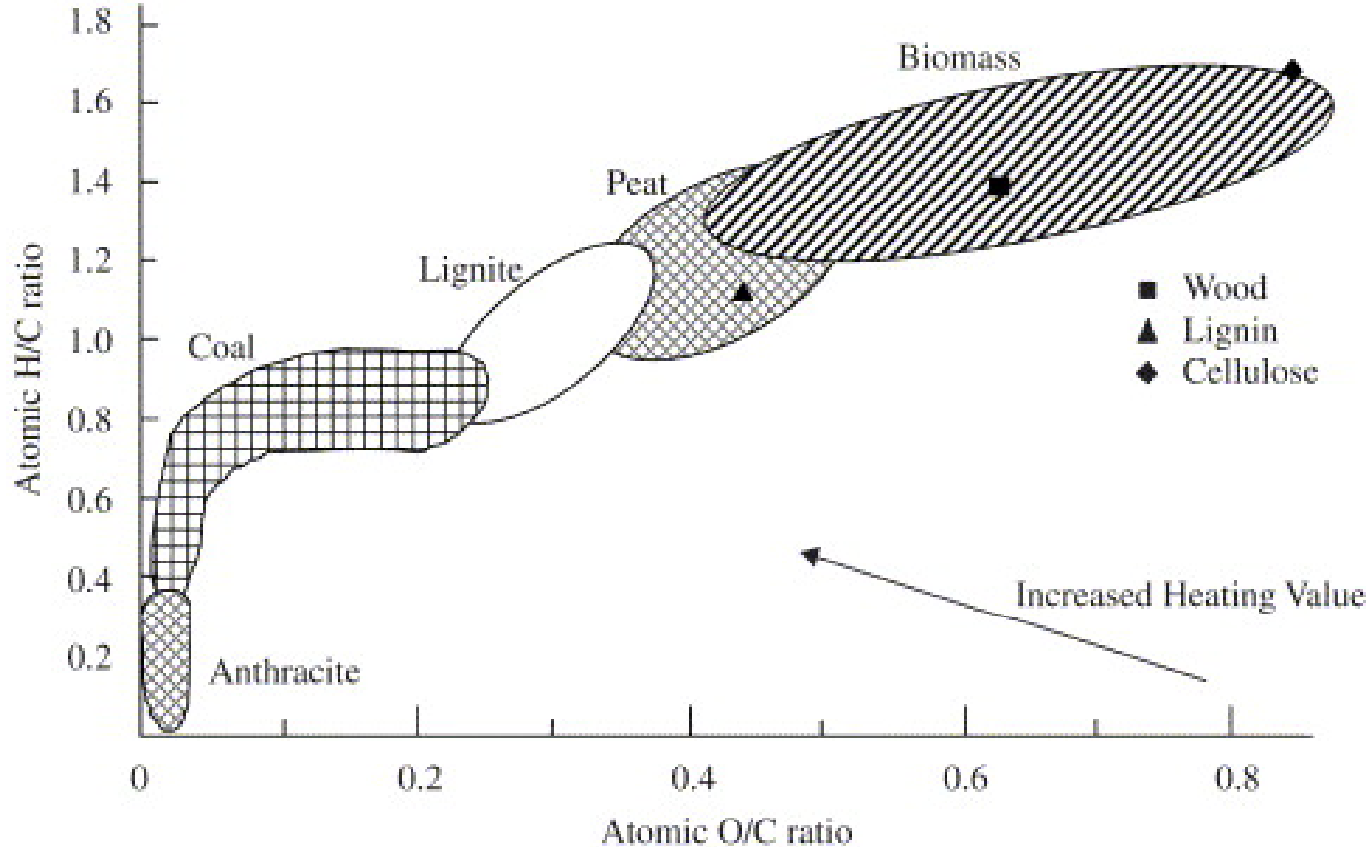
Природни угљеви и горива добивена прерадом угљева

<i><b>ПРИРОДНИ УГЉЕВИ</b></i>	Камени угаљ и антрацит	<i><b>ЧВРСТА ГОРИВА</b></i>
	Мрки угаљ	
	Лигнит	
	Тресет	
<i><b>ГОРИВА ДОБИЈЕНА ПРАДОМ УГЉЕВА</b></i>	Патентирана горива	<i><b>ГАСОВИТА ГОРИВА</b></i>
	Кокс	
	Гасни кокс	
	Брикети	
	Генераторски гас	
	Гас коксних пећи	
Светлећи гас	<i><b>ГАСОВИТА ГОРИВА</b></i>	
Гас високих пећи		

## Састав горива и различите масе



Квалитетни угљеви имају мањи удео влаге и испарљивих материја, а већи удео чврстог угљеника и вишу топлотну моћ.



Ван Кревеленов дијаграм

Угљеви су изложени узастопним и сталним променама у еволуцији, од лигнита преко мрког угља, до под битуминозних, битуминозних угљева и коначно антрацита. Угаљ се развија кроз ове етапе тако што са растом притиска и температуре опада садржај воде а расте садржај угљеника. Под битуминозни, битуминозни угљеви и антрацит су код нас познати као камени угаљ.

## Карактеристике домаћих угљева

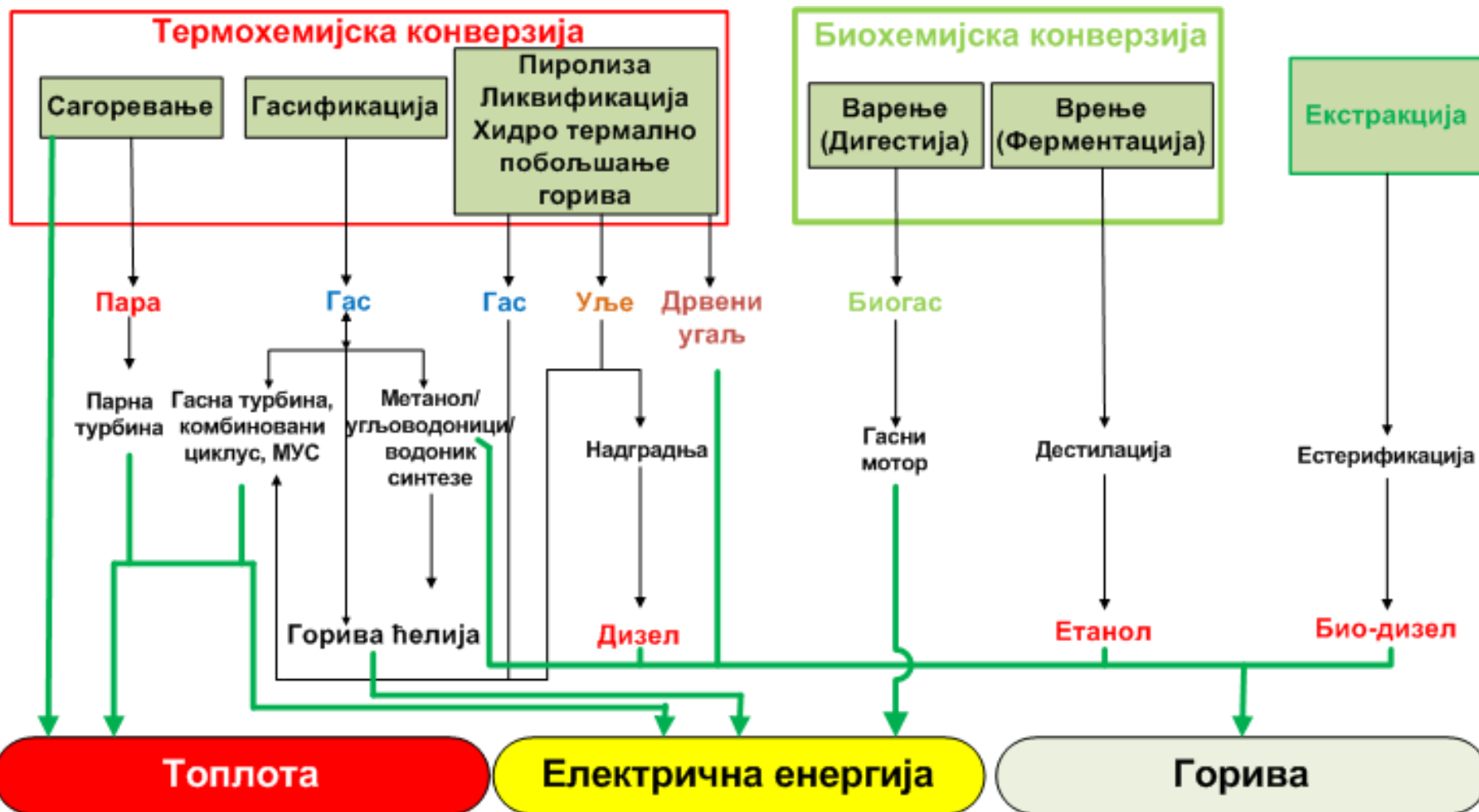
Назив и порекло угља	Доња топлотна моћ	Горња топлотна моћ
	MJ/kg	MJ/kg
Лигнит - Колубара	6,110 – 7,389	7,765 – 9,027
Лигнит – Косово	9,125 – 14,825	10,453 – 15,423
Лигнит - Костолац	7,830 – 11,207	9,242 – 12,579
Лигнит - Пљевља	8,110 – 14,348	9,421 – 15,806
Мрки угаљ – Соко	14,746 – 20,444	16,052 – 21,185
Мрки угаљ – Рембас	13,653 – 21,583	14,545 – 22,893
Камени угаљ - Јарандо	25,665 – 27,607	26,829 – 28,692

Угљеви се користе сем за производњу топлотне енергије и за производњу других вештачких (чврстих, течних и гасовитих) горива, и као сировине у хемијској индустрији.

# БИОМАСА

Типична биомаса, сува и без пепела има формулу  $\text{CH}_{1.4}\text{O}_{0.59}\text{N}_{0.0017}$  и садржи најчешће од 1 до 6% минералних материја. Које почињу да се синтерују и топе изнад  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Дрво сушено у сушарама има топлотну моћ од преко  $16000\text{ kJ/kg}$ , док са 40% влаге топлотна моћ је око  $10000\text{ kJ/kg}$ .



# Течна горива

Природно течно гориво је нафта или земно уље, али се она нормално не употребљавају за сагоревање у котловским ложиштима већ се подвргавају процесу дестилације ради добијања скупоцених горива и нуспродуката. Течна горива добијена из сирове нафте су бензин, петролеум, дизел гориво и мазут. Топлотне моћи течних горива добијених прерадом нафте крећу се од 39000 – 42000 kJ/kg.

Састав мазута креће се у границама C = 80 – 90 %, H = 10 – 13 %. Сва течна горива представљају смешу угљоводоника са општом хемијском формулом  $C_m H_n$ .

Најважнији продукти прераде сирове нафте су:

- ✓ТНГ
- ✓Бензин
- ✓Дизел гориво
- ✓Мазут

Вештачко течно гориво је катран који се добива прерадом угљева.

## Састав и основне карактеристике течних горива

Врста течног горива:			Нафта	Биодизел	Уље за ложење			
					EL*	L*	SR*	T*
Назив	Ознака	Јед.						
Густина на 15°C		kg/m <sup>3</sup>	820<920		840	880	920	970
Густина на 20°C		%		871				
Влага и механичке примесе		%	< 2		0.15	1.0	1.5	2.0
Пепео			0.1÷0.3	-	0.02	0.15	0.2	0.2
Састав:								
- угљеник	C	%	83 ÷ 87	77.0	85.9	85.5	85.3	85.0
- водоник	H	%	11 ÷ 14	12.1	13.0	12.5	11.6	14.9
- кисеоник	O	%	0.1 ÷ 11	10.9**	0.3	0.8**	0.6**	0.05**
- азот	N	%	0.05÷1.5	0.0	0.1	1.2	2.5	0.05
- сумпор	S	%	1.5 ÷ 5.0		0.7			
Доња топлотна моћ	Hd	MJ/kg	42 ÷ 43	36.80	42.84	42.08	40.72	40.32

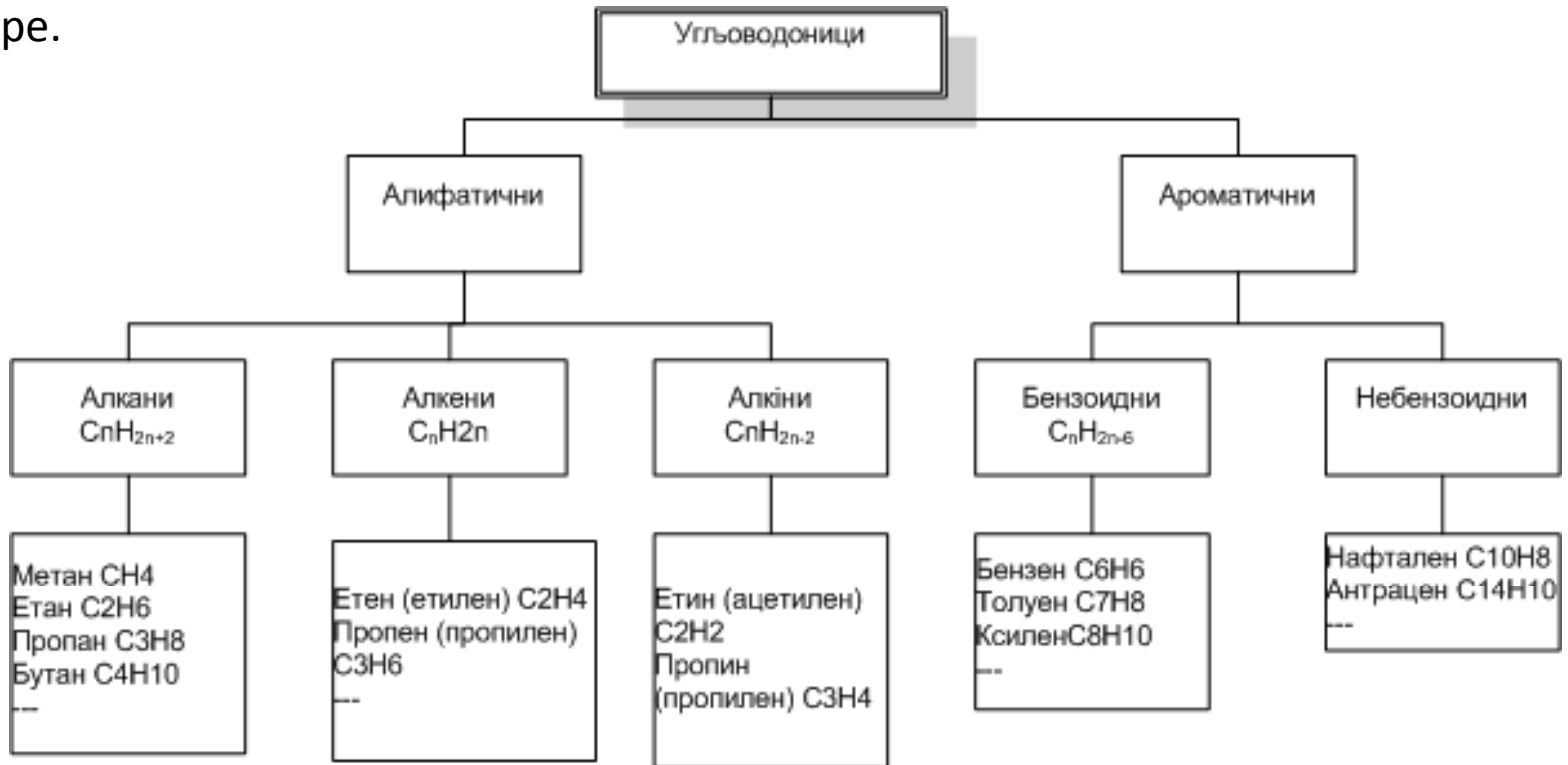
\* EL – екстра лако лож уље, L – лако лож уље, SR – средње лож уље, T – тешко лож уље

\*\* Збир удела азота и кисеоника (N + O)



# Гасовита горива

Гасовито гориво, и природно и вештачко, представља идеално гориво јер се лако транспортује до потрошача гасоводима, има велику топлотну моћ, сагорева готово без остатка тј. практично потпуно сагорева са теоријским вишком ваздуха развијајући високе температуре.



Природни гас се углавном састоји од метана  $\text{CH}_4$ . То је безбојан гас лакши од ваздуха, без укуса и мириса. На свим температурама изнад  $-107.2^\circ\text{C}$  он је у гасовитом стању и са специфичном тежином од 0.6 лакши је од ваздуха.

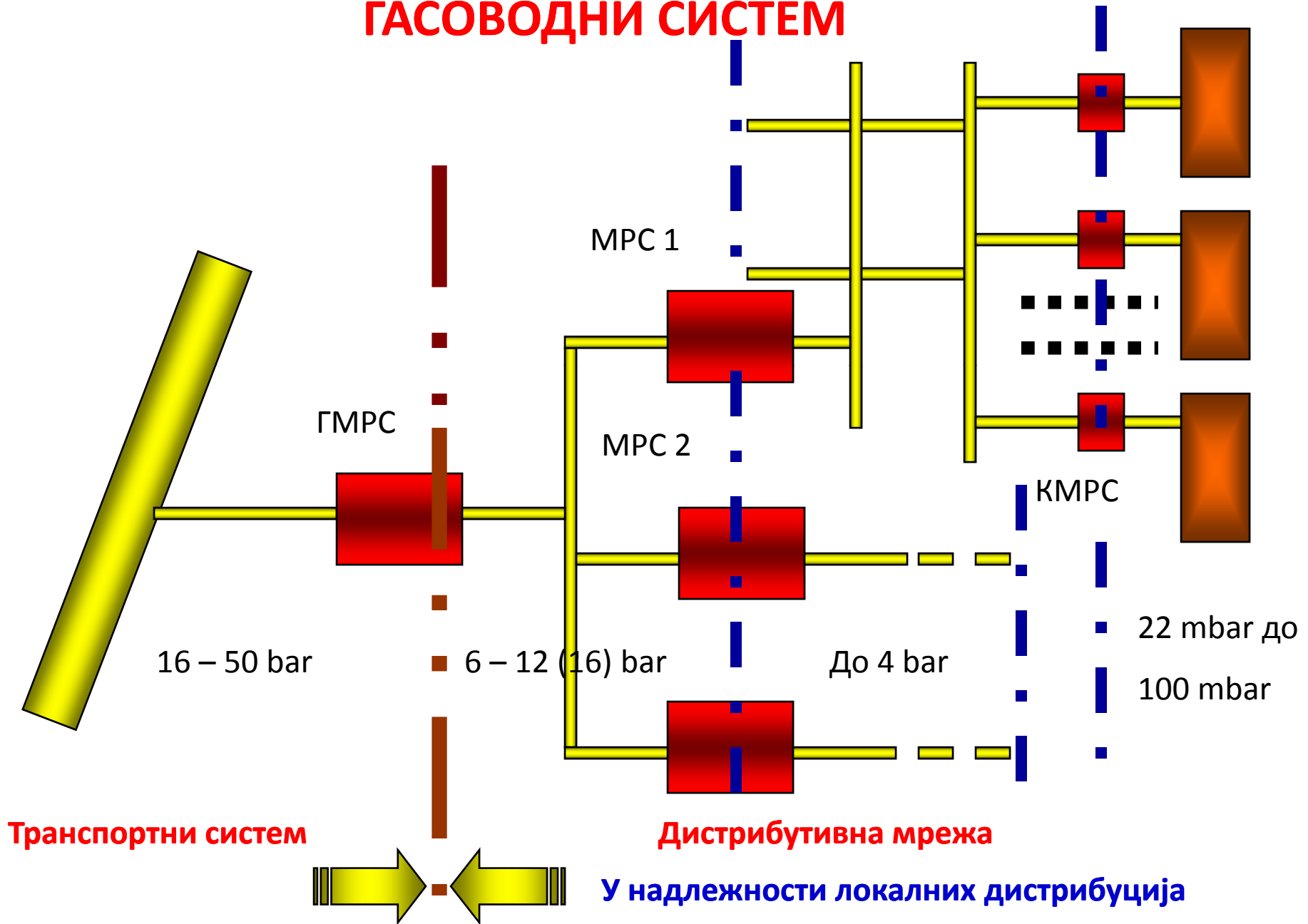
## Састав и основне карактеристике гасовитих горива

Назив	Ознака	Јед.	Биогас	Природни гас		
				Руски гас		Немачки гас
				Љвовска област	Харков-ска област	
Метан	CH <sub>4</sub>	%**	55 ÷ 75	98.0	93.0	83.5
Етан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	%	-	0.4	4.0	3.6
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	%	-	0.2	1.0	0.7
изо-Бутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	%	-	-	-	0.3
Бутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	%	-	0.1	0.5	-
Изо-пентан	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	%	-	-	-	-
Пентан	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	%	-	0.1	0.5	-
Остали угљоводоници	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	%	-	-	-	-
Угљен-моноксид	CO	%	-	-	-	-
Угљен-диоксид	CO <sub>2</sub>	%	24 ÷ 45	0.2	0.1	1.4
Кисеоник	O <sub>2</sub>	%	0 ÷ 05	-	-	-
Азот	N <sub>2</sub>	%	0 ÷ 2	1.0	0.9	10.5
Водоник	H <sub>2</sub>	%	0 ÷ 1	-	-	-
Горња топлотна моћ	H <sub>g</sub>	kJ/m <sup>3</sup>	21900÷29900	39805	42365	36890
Доња топлотна моћ	H <sub>d</sub>	kJ/m <sup>3</sup>	19700÷26900	35886	38275	33330
Густина	ρ	kg/m <sup>3</sup>	1.03÷1.28	0.734	0.784	0.829
Релативна густина	D	-	0.79÷0.99	0.568	0.606	0.641

\* Карактеристике гасовитих горива су при условима 0°C и 101.3 kPa

\*\* Запремински удели изражени у процентима

# ГАСОВОДНИ СИСТЕМ



Кисеоник је неопходан елемент за сагоревање. Има га нарочито у биомаси, а количина кисеоника опада са порастом топлотне моћи угљева. У горивима постоји као слободан кисеоник или везан са водоником (вода). У ваздуху га има 21 мол% или 23.7 %. У нашим прорачнима користимо тзв. ваздух за сагоревање и сматрамо да се састоји (запремински проценти)

**79% N<sub>2</sub>**

**21% O<sub>2</sub>**

Молекулска маса ваздуха је 28.97 kg/kmol.

1811. Италијански хемичар Амадо Авогадро је утврдио да **различити гасови у једнаким запреминама и на истим температурама и притисцима садрже једнаке бројеве молекула. Број молекула у маси од 1кг било ког гаса је  $6.023 \cdot 10^{26}$**

Угљеник је главни састојак гориве масе и јавља се у облику угљоводоника C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>, ређе са сумпором (угљеник-сулфид) CS<sub>2</sub> или као слободан односно чист угљеник. Топлотна моћ угљеника је 33913 kJ/kg. При потпуном сагоревању ствара угљен диоксид, а при непотпуном угљен моноксид.

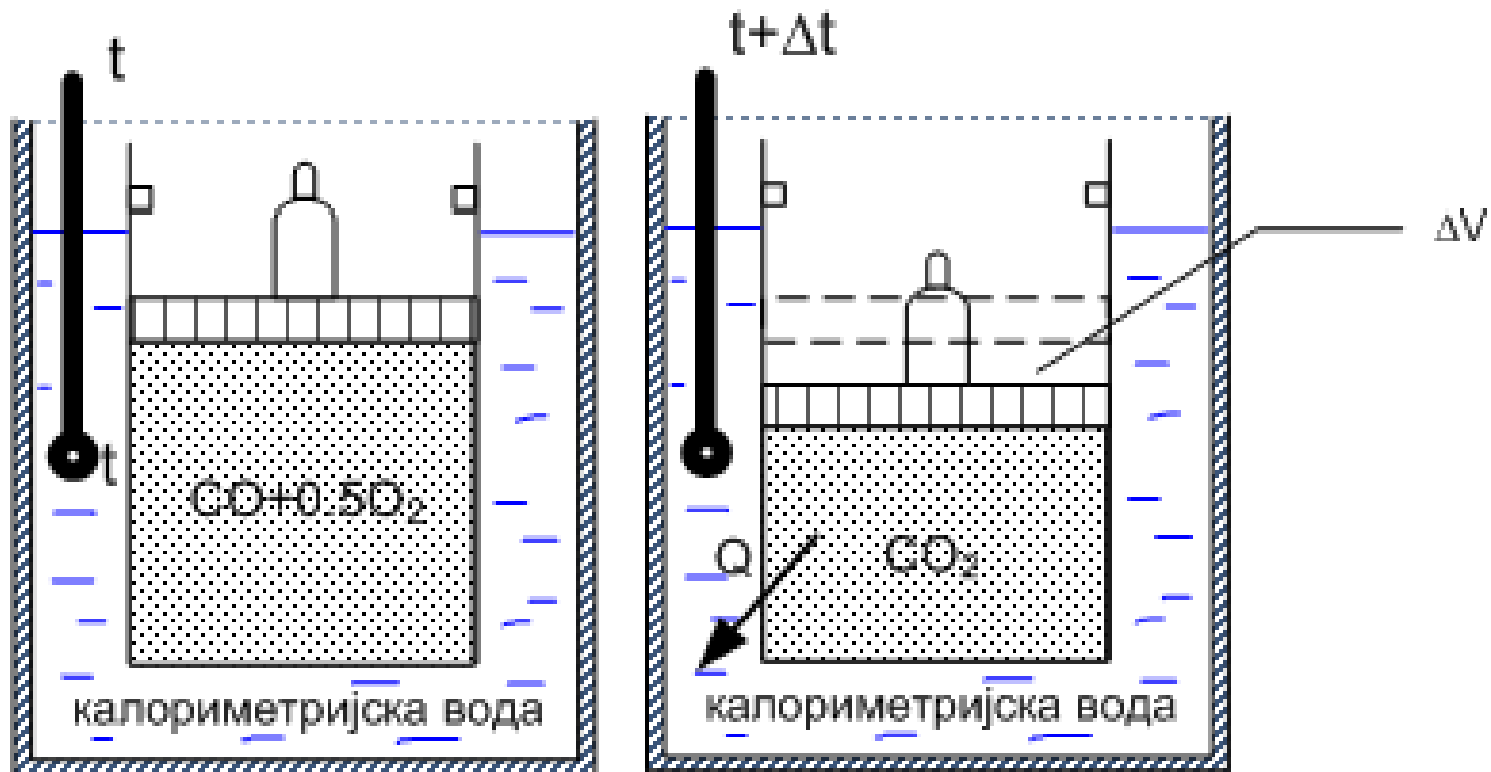
Водоник је такође користан састојак горива уколико се појављује у склопу угљоводоника C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> или као слободан водоник H<sub>2</sub>. Доња топлотна моћ водоника је 119205 kJ/kg. Уколико се водоник у гориву појављује у облику влаге, тада представља баласт јер је за испаравање килограма воде потребно 2512 kJ/kg. Влага се у гориву појављује као хигро и груба влага. Груба или јамска влага се сушењем на ваздуху отклања. Део влаге који остаје у гориву после сушења на ваздуху назива се хигро влага.

Сумпор се у гориву појављује као угљеник-сулфид  $H_2S$  или водоник-сулфид  $CS_2$  и у оба случаја представља активни сумпор, тј. сумпор који може да сагорева. Поред тога сумпор се појављује у виду сулфата, те не може да сагорева, и рачуна се у пепео. Ово је најчешће врло мала количина. При оксидацији сумпора у сумпор диоксид ослобађа се 9420 kJ/kg, а ако оксидише у сумпор триоксид 13816 kJ/kg. Како се већи део сумпора оксидише у сумпор диоксид топлотна моћ се рачуна као 10500 kJ/kg.

Азот се код горива јавља у малим количинама. Код горива код којих се јавља у већим количинама представља баласт и неповољно утиче на топлотну моћ.

Пепео (А) чине минералне материје, те заједно са влагом представља баласт у гориву.

# Топлотна моћ горива



*Сагоревање при сталном притиску*



Посматрамо једноставан случај сагоревања угљен монооксида са теоријски потребном количином кисеоника при сталном притиску. Температуре познате количине калориметријске воде и гориве смеше су једнаке пре сагоревања. Након сагоревања због високе температуре смеша ће повећати запремину. После извесног времена изједначиће се температура калориметријске воде и угљен диоксида на  $t + \Delta t$ .

Ако применимо први закон термодинамике добићемо:

$$Q = U' - U + L,$$

где су  $U'$  и  $U$  унутрашње енергије гасова после и пре сагоревања, а  $L$  рад извршен спољним притиском током сагоревања. Код отворених калориметара он је једнак притиску околине, па је:

$$Q = U' - U + p(V' - V)$$

Уведемо ли енталпију:

$$H = U + pV, \text{ добивамо}$$

$$Q = H' - H$$

Уколико извршимо експеримент при стандардном референтном стању  $25^\circ\text{C}$  и  $1 \text{ бар}$  и ако означимо топлоту сагоревања на константном притиску са  $H_p$  добићемо топлотну моћ горива.

$$H_p = H' - H$$

Због велике количине топлоте која се сагоревањем ослобађа одавде се види да је велика разлика између енталпија реактаната и продуката сагоревања.

Топлотна моћ горива је заједничка карактеристика горива и потребне количине кисеоника за сагоревање. За само гориво и за сам кисеоник топлотна моћ губи смисао.

Ако се експеримент изврши на било којој температури  $t$  тада је:

$$(H_p)_t = H'_t - H_t$$

$$H'_t = H'_0 + n' \int_0^t C'_p dt = H'_0 + n' [C'_p]_0^t \cdot t$$

$$H_t = H_0 + n \int_0^t C_p dt = H_0 + n [C_p]_0^t \cdot t$$

где су:

количине гориве смеше пре сагоревања  $n$  и количина продуката сагоревања  $n'$

$C_p$  стварни молски топлотни капацитет

$[C_p]_0^t$  средњи молски топлотни капацитет

Разлика при одређивању топлотних моћи на било којој и на температури на СРС су:

$$(H_p)_t - H_p = \int_0^t (n' C'_p - n C_p) dt = t \{ n' [C'_p]_0^t - n [C_p]_0^t \}$$

Топлотна моћ се често одређује у калориметријској бомби, без промене запремине.

При овоме се не врши рад спољног притиска па је:

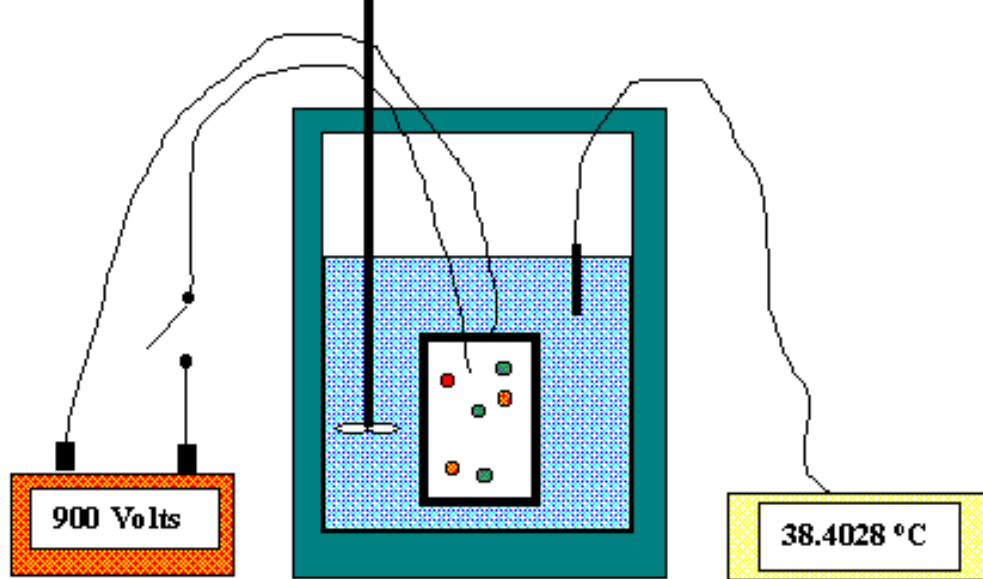
$$H_v = U' - U$$

односно разлика према топлотној моћи при константној запремини:

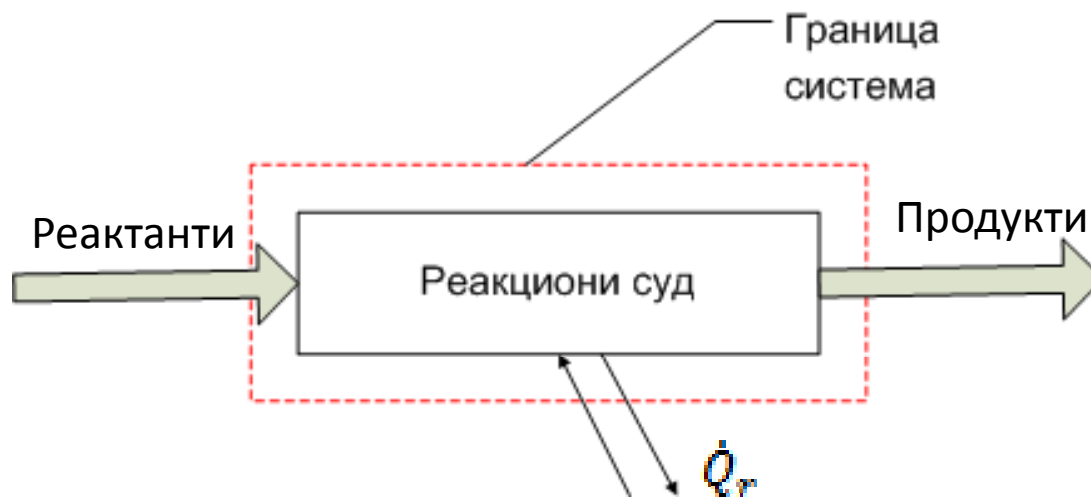
$$(H_p - H_v) = p(V' - V)$$

Разлика ове две топлотне моћи је мања од 1% што је у оквиру грешке мерења при одређивању топлотне моћи.





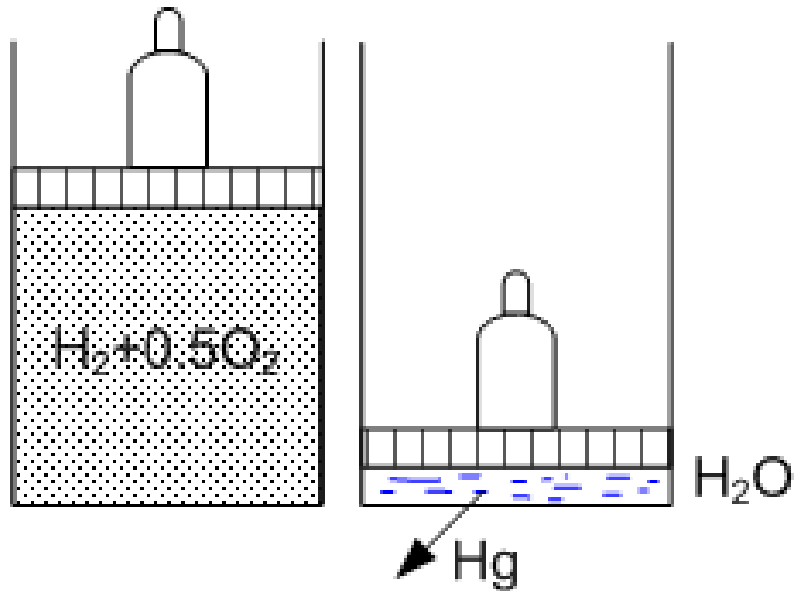
*Калориметријска бомба*



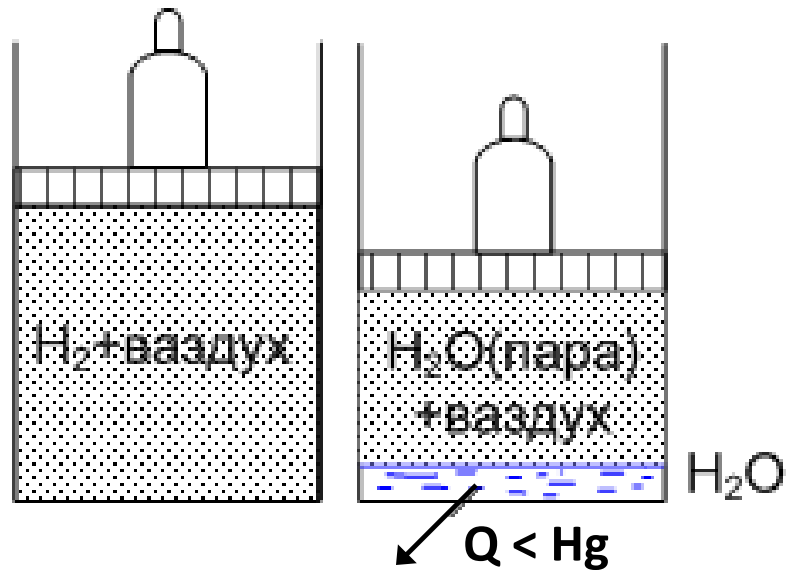
*Проточни калориметар*

# Горња и доња топлотна моћ

Интересантна појава дешава се код сагоревања горива која садрже водоник. Посматрајмо најпре сагоревање водоника са стехиометријски потребном количином кисеоника. Продукт реакције, водена пара ће се након сагоревања постепено хладити све док се не охлади на температуру околине. Како је сагоревање извршено на константном притиску (притисак околине) кад се изједначе температуре у суду и околини сва водена пара прећи ће у течно стање.



*Сагоревање водоника са стехиометријски потребном количином кисеоника*



*Сагоревање водоника са ваздухом*

Приликом сагоревања водоника у ваздуху у продуктима сагоревања осим водене паре биће још и смеша гасова различите садржине у зависности од количине ваздуха која је била у суду. Када се ова смеша гасова охлади на температуру околине, предаће се околној количина топлоте која је мања од оне одређене околној при сагоревању водоника са стехиометријски потребном количином кисеоника. Разлог томе лежи у чињеници да у зависности од парцијалног притиска водене паре у смеси продуката сагоревања неће се сва пара кондензовати и предати своју топлоту испаравања околној. Уколико је сва пара на температури околине остала у парном стању, топлоту коју продукти сагоревања предају околној називамо доња топлотна моћ. Веза између горње и доње топлотне моћи дата је следећом формулом:

$$(H_d)_{H_2} = (H_g)_{H_2} - q_0$$

Количина топлоте која се не предаје околина у случају кад вода остаје у парном стању једнака је топлоти испаравања воде. Он по килограму или киломолу на температури 25<sup>0</sup>С износи:

$$q_0 = r_0 = 2443 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 44011 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$$

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

- ✓ С и S из горива се налазе у облику својих оксида у гасовитом стању, док до оксидације азота није дошло
- ✓ Продукти сагоревања доведени су на температуру које је гориво имало на почетку (25 °С) и водена пара се налази у течном стању.

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

- ✓ С и S из горива се налазе у облику својих оксида у гасовитом стању, док до оксидације азота није дошло
- ✓ Продукти сагоревања доведени су на температуру које је гориво имало на почетку (25 °С) и водена пара се налази у облику паре (гасовито стање).

Веза између горње и доње топлотне моћи дата је следећом формулом:

$$H_g = H_d + w_{sg} r_0,$$

где је  $w_{sg}$  количина водене паре у продуктима сагоревања.

Емпиријски обрасци за одређивање топлотне моћи чврстих горива

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

Код чврстих горива топлотна моћ се не може рачунати као збир топлотних моћи појединих елемената у смеси, јер постоји и топлота њихове међусобне везе у смеси. Веза између горње и доње топлотне моћи дата је следећим обрасцем:

$$H_g = H_d + 25(9H + W)$$

У овој су једначини:  $W$  масени проценат влаге у гориву,  $H$  масени проценат водоника у гориву,  $9H$  количина влаге настала сагоревањем 1кг горива. 25 је због топлоте испаравања воде.

VDI обрасци

$$H_g \left( \frac{kJ}{kg} \right) = 340C + 1420 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 93S_g$$

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

$$H_d \left( \frac{kJ}{kg} \right) = 33900c + 117000 \left( h - \frac{o}{8} \right) + 10500s_g - 2500w$$

Channiwala и Parikh су дали једначину за одређивање горње топлотне моћи која има релативно малу грешку од 1.45% у односу на експериментално добијене вредности:

$$HHV_{fuel} = 0.3491z_C + 1.1783z_H - 0.1034z_O - 0.0151z_N + 0.1005z_S - 0.0211z_A$$

Код гасовитих горива топлотна моћ се одређује на основу запреминског састава горива и једнака је производу топлотних моћи појединих компоненти у гасовитом гориву и њихових запреминских удела

$$H \left( \frac{kJ}{m_N^3} \right) = \sum_{i=0}^n r_i H_i$$

$$H_d \left( \frac{kJ}{m_N^3} \right) = 107.85H_2 + 126.35CO + 358.80CH_4 + 594.4C_2H_4 + 569.4C_2H_2 + 643.55C_2H_6 \\ + 876.05C_3H_6 + 931.80C_3H_8 + 1176.15C_4H_8 + 1235.65C_4H_{10} + 1566.30C_5H_{12} \\ + 233.65H_2S$$

Прерачунавање топлотне моћи врши се са једне условне масе на другу на основу познатих топлотних моћи и елементарног састава горива. Основна маса је аналитичка јер се на њој врши анализа горива и одређивање топлотне моћи.

# Стехиометријске једначине сагоревања

дају:

- ✓ Међусобне односе у којима се једине C, H, S и O,
- ✓ Количину кисеоника потребну за потпуно сагоревање,
- ✓ Количину насталих продуката
- ✓ Ослобођену количину топлоте

Ове једначине дају реактанте и крајње продукте али не и међупродукте.

Ово је у складу са законом из 1840. швајцарског хемијчара Џермејна Хенрија Хеса који је открио да је *целокупна количина топлоте апсорбована или ослобођена хемијском једначином независна од термодинамичке путање (корака реакције) којом се реакција одигравала.*

# Стварно потребна количина ваздуха (коефицијент вишка ваздуха)

Потпуност процеса сагоревања зависи од услова и квалитета образовања гориве смеше, и сходно томе  $O_{\text{мин}}$  често није у могућности да обезбеди потпуно сагоревање. При идеалним условима код гасовитог горива је могуће обезбедити потпуно сагоревање, док код течног и нарочито чврстог горива услови образовања гориве смесе су далеко од идеалних због чега се у ложиште уводи већа количина ваздуха од теоријски потребног. Веза између стварне и теоријски потребне количине ваздуха је линеарно пропорционална. Коефицијент њеихове пропорционалности назива се коефицијент вишка ваздуха.

$$L_s \left( \frac{kg}{kg}, \frac{m_N^3}{kg}, \frac{m_N^3}{m_N^3} \right) = \lambda L_{min} \left( \frac{kg}{kg}, \frac{m_N^3}{kg}, \frac{m_N^3}{m_N^3} \right)$$

$$\lambda = L_s / L_{min}$$



$\lambda=1$  смешу горива и ваздуха називамо стехиометријском

$\lambda < 1$  богата смеша

$\lambda > 1$  сиромашна смеша

Ако са  $G$  означимо јединицу масе горива онда је у општем случају концентрација горива у горивој смеси

$$c_G = \frac{G}{G + \lambda L_{min}} \cdot 100$$

Економично сагоревање се постиже при оптималним вредностима коефицијента вишка ваздуха а они су дефинисани:

- ✓ Врстом горива
- ✓ Начином сагоревања
- ✓ Врстом ложишта

$\lambda$  се креће у границама од 1.05 до 1.5

При сагоревању мазута  $\lambda=1.05-1.15$ .

Чврста горива:

- При сагоревању у слоју  $\lambda=1.4-1.5$
- При сагоревању у лету, флуидизованом слоју  $\lambda=1.2-1.25$

Код земног гаса  $\lambda=1.03-1.05$ .

Код савремених конструкција котлова користе се  $\lambda$  сонде које мерећи количину кисеоника у продуктима сагоревања аутоматски на котлу повећавају или смањују количину ваздуха.

# Температура сагоревања

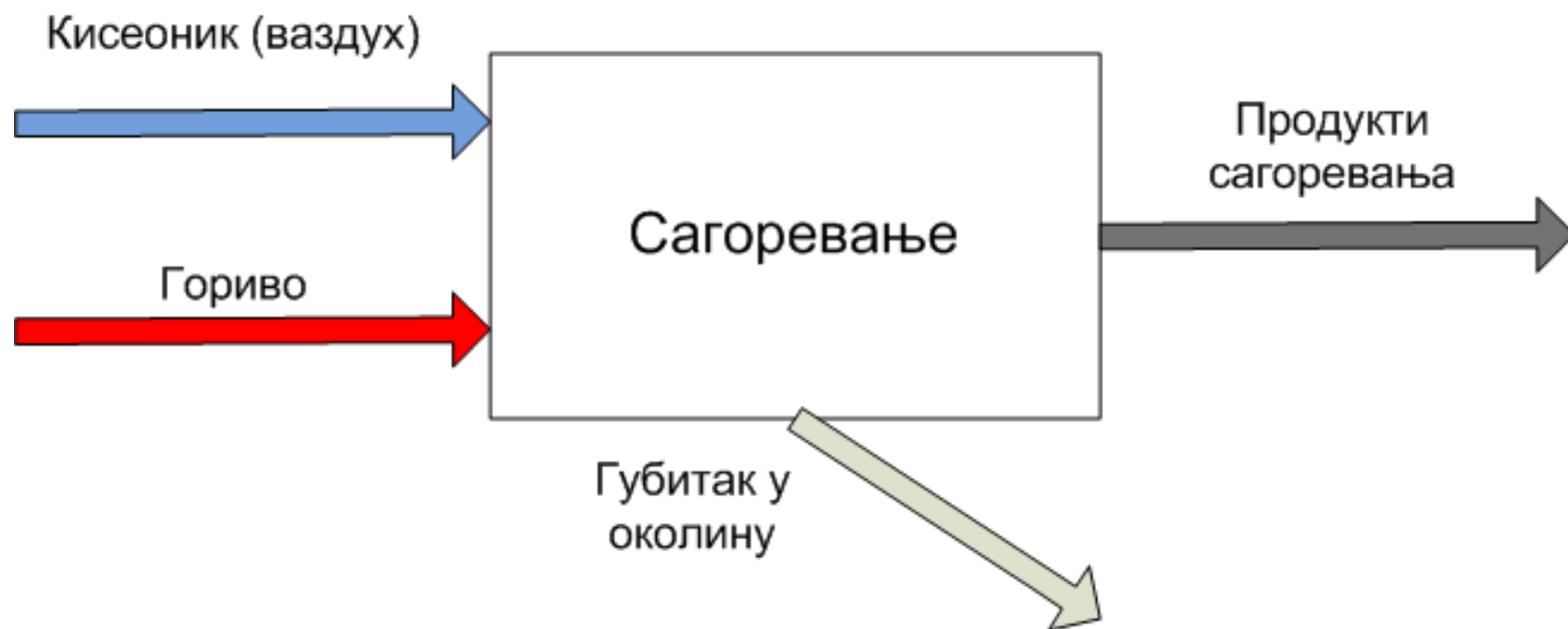
је температура гасовитих продуката, као резултат загревања топлотом која је настала сагоревањем горива. Разликујемо:

- ✓ КАЛОРИМЕТРИЈСКУ,
- ✓ ТЕОРИЈСКУ, И
- ✓ СТВАРНУ ТЕМПЕРАТУРУ САГОРЕВАЊА.

Калориметријска температура сагоревања је температура продуката која настаје потпуним сагоревањем при чему не постоје топлотни губици услед дисоцијације и размене топлоте са околином. Она је највиша температура сагоревања. Више температуре се могу постићи једино додатним загревањем ваздуха или горива. Теоријска температура сагоревања узима у обзир дисоцијацију продуката, док стварна укључује и размену топлоте са околином.

Температура сагоревања зависи од:

- топлотне моћи горива,
- запремине продукта сагоревања,
- састава продукта сагоревања,
- специфичног топлотног капацитета продукта,
- температуре ваздуха,
- температуре горива.



На основу енергетског биланса је:

$$h_B + L_s h_L + H_d = H_p$$

где је енталпија продуката сагоревања:

$$H_p = \sum_{i=1}^n V_i \bar{c}_{p,i} t_k$$

па је температура сагоревања

$$t_k = \frac{h_B + L_s h_L + H_d}{\sum_{i=1}^n V_i \bar{c}_{p,i}}$$

или у развијеном облику

$$t_k = \frac{c_{p,B} t_B + L_s c_{p,L} t_L + H_d}{\sum_{i=1}^n V_i \bar{c}_{p,i}}$$

$\bar{c}_{p,i} \left[ \frac{kJ}{m^3 K} \right]$  је средњи специфични запремински топлотни капацитет продуката сагоревања између температура гориве смеше и температуре сагоревања. Пошто овај израз зависи од температуре сагоревања, решавање једначине за температуру сагоревања врши се итерацијама. Прво се температура сагоревања претпостави, а затим се врше корекције све док се не поклопи претпостављена температура са израчунатом, наравно уз задовољавајућу тачност.

$$\bar{c}_{p,i,t_0}^{tk} = \sum_{i=1}^n \tau_i c_{p,i,t_0}^{tk}$$

где су под сумом сви гасови који се јављају у продуктима сагоревања.

Температура сагоревања се може и графички одредити из Н-т дијаграма, који је заправо графичка интерпретација топлотног биланса процеса сагоревања. Дијаграм представља зависност између енталпије гасовитих продуката (ордината) и температуре сагоревања (апсциса).

Енталпија продуката сагоревања се мења са променом вишка ваздуха. Општи израз за енталпију продуката сагоревања при стехиометријском сагоревању је:

$$H_p = \sum_{i=1}^n (V_i h_i)_t = (V_{CO_2} h_{CO_2})_t + (V_{N_2} h_{N_2})_t + (V_{SO_2} h_{SO_2})_t + (V_{H_2O} h_{H_2O})_t, \quad \left[ \frac{kJ}{kgB} \right]$$

при чему је,

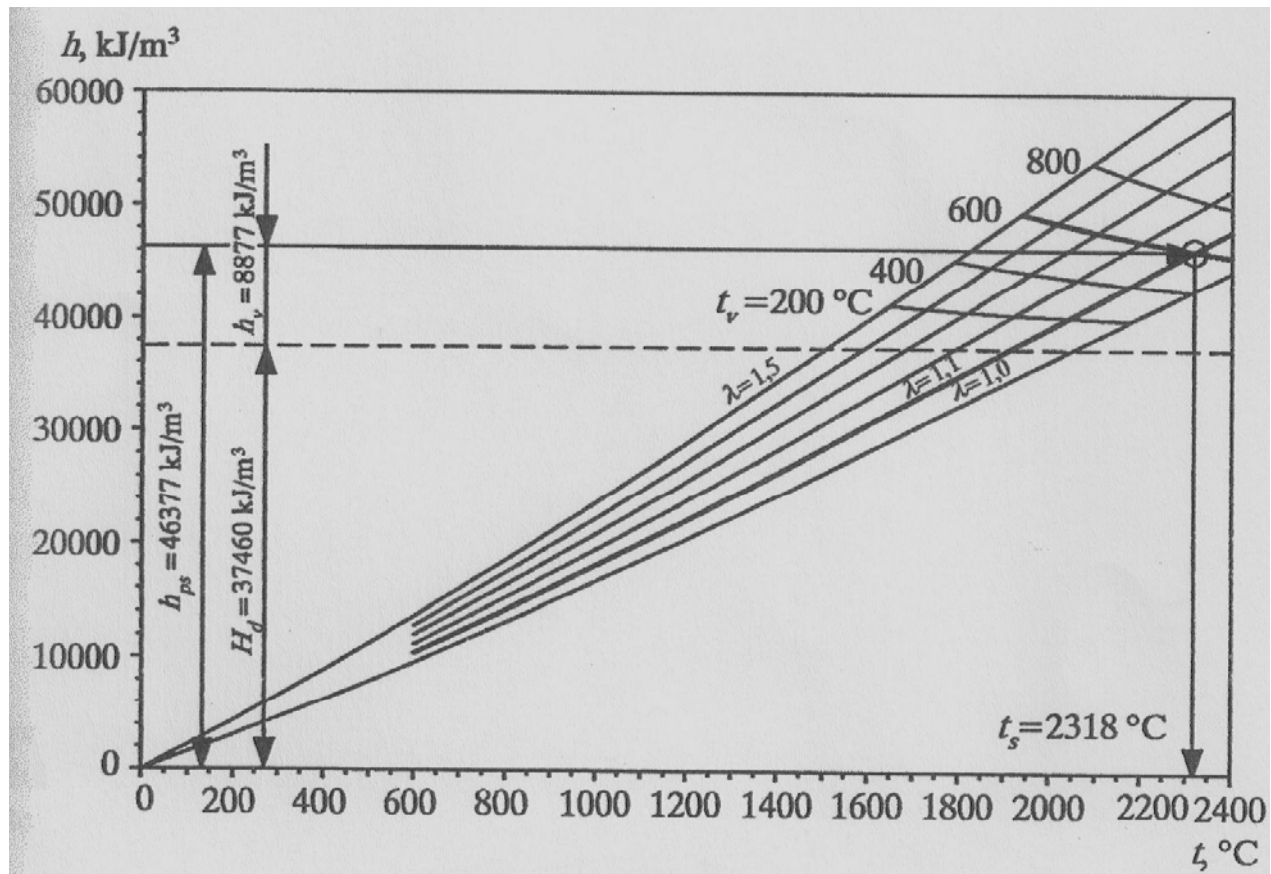
$$h_i = c_{p,i} t$$

При произвољном коефицијенту вишка ваздуха енталпија продуката сагоревања је:

$$H_{p,\lambda} = H_p + (\lambda - 1) L_{min} h_L \quad \left[ \frac{kJ}{kgB} \right], \text{ где је енталпија ваздуха } h_L = c_{pL} t \quad \left[ \frac{kJ}{m^3} \right]$$

# H-t дијаграм

Представља енергетски биланс процеса сагоревања. На апсциси се наноси температура продуката сагоревања, а на ординати енергија која улази у ложиште: топлотна моћ горива која је заједничка особина горива и ваздуха (кисеоника), и енергије предгревања горива и ваздуха за сагоревање. На слици је приказана температура сагоревања  $2318\text{ }^{\circ}\text{C}$  гасовитог горива доње топлотне моћи  $37460\text{ kJ/m}^3$  које сагорева са вишком ваздуха 1.1, при чему је ваздух предгрејан на  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Теоријска температура сагоревања узима у обзир дисоцијацију појединих продуката сагоревања која се јавља већ на 1500 °С. При томе се троши топлота дисоцијације  $Q_d$ .

$$t_t = \frac{h_B + L_s h_L + H_d - Q_d}{\sum_{i=1}^n V_i \bar{c}_{p,i}}$$

При стварном сагоревању осим губитка дисоцијације због високе температуре пламена имамо губитак топлоте у околину (доминантном зрачење), па је стварна температура сагоревања:

$$t_s = \frac{h_B + L_s h_L + H_d - Q_d - Q_g}{\sum_{i=1}^n V_i \bar{c}_{p,i}}$$

# Термотехничке карактеристике постројења у којима се обавља процес сагоревања

Да би се вршио било какав прорачун размене топлоте у постројењима у којима се користи физичка топлота гасовитих продуката или било ког флуида потребно је најпре знати карактеристике струјања флуида.



# Струјање гасова кроз термичко постројење

може бити услед разлике у густини топлијег и хладнијег флуида, а може се остваривати и принудним путем. Први начин се дефинише као ПРИРОДНА ВУЧА а други као ПРИНУДНА. Ови последњи системи се далеко чешће срећу. Због тога у деловима постројења постоје области у којима се притисак разликује од атмосферског.

Да би смо одредили величине стања сматрамо да је гас идеалан. Пошто гасови који струје кроз пећ представљају смешу гасова, све законитости смеше гасова могу се применити и на ову смешу. Моларна маса смеше је:

$$M_{vp} = \sum_{i=1}^n r_i M_i = r_{CO_2} M_{CO_2} + \dots$$

# Отпори при струјању гасова кроз термичко постројење

Отпори при струјању гасова кроз термичко постројење могу се поделити на:

1. отпори при пролазу ваздуха кроз слој горива,
2. отпори при пролазу гасова кроз слој испуне,
3. подужни отпори при струјању гасовитих продуката, и
4. локални отпори при струјању гасовитих продуката.

Отпори при струјању ваздуха кроз слој горива су значајни при сагоревању чврстог горива на решетци. Ових отпора нема када се обавља сагоревање спрашеног угља, чврстог горива у лету, течног и гасовитог горива. Овај отпор при сагоревању чврстог горива у слоју износи од 2 до 300 мм воденог стуба, а зависи од: дебљине слоја горива, врсте горива, величине комада горива, количине и састава пепела, брзине ваздуха, врсте решетке, топлотног оптерећења решетке. Означава се са  $\Delta p_g$ .

Отпори при струјању гасова кроз слој испуне јављају се код постројења где се обавља термичка обрада материјала при чему настаје контакт продуката и материјала. Проблем одређивања овог отпора повезан је са чињеницом да је термичка обрада материјала повезана са губитком масе. Овај се отпор обележава са  $\Delta p_i$ .

Отпор при струјању кроз слој испуне зависи од:

- дебљине слоја испуне,
- величине комада шарже,
- уједначености комада,
- начина формирања шљаке,
- температура у слоју испуне,
- брзине струјања гасова.

Пад притиска у подужним деоницама:

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d_e} \cdot \frac{\rho w^2}{2} \text{ [Pa]}, \text{ где је еквивалентни пречник } d_e = \frac{4A}{O}$$

За сваку деоницу треба одредити коефицијент трења  $\lambda$ , који је функција релативне хrapавости (представља однос апсолутне хrapавости и еквивалентног пречника) и рејнолдсовог броја (однос инерцијалних сила и сила трења). Он зависи од врсте струјања:

$$\lambda = f(Re) \quad \text{код ламинарног струјања}$$

$$\lambda = f(\varepsilon_r) \quad \text{код турбулентног струјања}$$

$$\lambda = f(Re, \varepsilon_r) \quad \text{код прелазног струјања}$$

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta}{d_e} \quad Re = \frac{wl}{\nu}$$

Месни или локални отпори настају на местима промене пресека, на гранањима цевовода и кривинама. За последицу имају губитак притиска који се рачуна по формули:

$$\Delta p_m = \xi \cdot \frac{\rho w^2}{2} \text{ [Pa]}$$

# Топлотни губици термичких постројења

Постоји 8 котловских губитака о којима је потребно водити рачуна. Ови губици зависе од врсте горива, начина сагоревања и конструкције котла тако да их не срећемо код свих врста горива и свих врста котлова. Углавном се могу поделити на:

1. губитак услед пропадања горива кроз решетку,
2. губитак услед несагорелог горива у шљаци и пепелу,
3. губитак услед летећег кокса,
4. губитак услед хемијски непотпуног сагоревања,
5. губитак услед чађи,
6. губитак услед физичке топлоте шљаке,
7. губитак у излазним гасовима, и
8. губитак услед спољашњег расхлађивања.

Савременим конструкцијама губици 1-6 и 8 су далеко мањи од најзначајнијег губитка садржаног у физичкој топлоти излазних гасова.

# Губитак услед пропадања горива кроз решетку

Постоји само код сагоревања чврстог горива у слоју и код ложишта са комбинованим сагоревањем. Јавља се услед пропадања ситнијих честица горива кроз решетку у пепељару.

Не може се сматрати да ово гориво не учествује у сагоревању јер се оно најчешће гасифицира, па испаравањем одређеног садржаја ово гориво представља коксни остатак веће топлотне моћи од основног горива (мањи садржај воде и осталих испарљивих једињења). Ово је разлог што се овај губитак не рачуна преко масе пропалог горива већ се узима као проценат од количине топлоте унете горивом.

$$u_1 = \frac{33077A a_1}{(100 - a_1)H_d} \cdot \eta_A [\%]$$

$A$  – је садржај пепела,

$a_1$  – удео сагорљивог остатка у пепелу сведен на масу 1 кг горива. Одређује се из средњег узорка пепела, док се топлотна моћ горива одређује из средњег узорка горва, лабораторијским испитивањем.

Овај је губитак већи код горива са мањом топлотном моћи.

На величину овог губитка утичу:

- сортиман угља,
- тип решетке (већи је губитак ако се гориво креће по решетки, зависи од величине и типа процепа на решетки и начина довођења ваздуха),
- физичке особине угља и пепела (нпр. склоност угља ка распадању на високим температурама...),
- форсирање решетке.

Рециркулација пропалог горива представља меру за смањење овог губитка, а економски је исплатива једино код врло великих котлова, може имати и својих мана услед повећане концентрације летећег пепла у струји гасова која узрокује хабање грејних површина.

## Губитак услед несагорелог горива у шљаци и пепелу

Овај губитак постоји код сагоревања чврстог горива у слоју и у лету (нарочито при сувом режиму). Нарочито је изражен при сагоревању у слоју. Код сагоревања у лету овај губитак је мањи али је зато већи губитак у виду летећег кокса. Овај је губитак нарочито мали при циклонском сагоревању и губици  $u_1$ ,  $u_2$  и  $u_3$  се узимају збирно.

$$u_2 = \frac{33077Aa_2}{(100 - a_2)H_d} \cdot \eta_s [\%]$$



На величину овог губитка утичу:

- проценат пепела у гориву (омета довод ваздуха и потпуно сагоревање),
- склоност угља ка стварању погача повећава овај губита и потпуно догоревање угља,
- физичко – хемијске особине угља и пепела,
- тип решетке, нпр. кретање горива по решетки побољшава сагоревање и смањује овај губитак, али повећава губитак  $u_1$ ;
- облик сводова и начин довођења ваздуха, нарочито је значајно да се код угљева са неповољним физичким особинама (велики проценат пепела, мало испарљивих материја) нарочито обрати пажња на фазу догоревања, да се она развуче тако да траје што дуже. Ово се постиже продужењем решетке (веће време задржавања), као и уградњом сводова за догоревање (зрачењем обезбеђују додатну енергију за сагоревање);
- код форсирања решетке, ако се више форсира већи је и овај губитак зато што се време за сагоревање смањује.

## Губитак услед летећег кокса

Овај се губитак јавља код сагоревања чврстог горива у слоју и лету и у извесним случајевима при сагоревању течног горива. Нарочито је велики овај губитак код сагоревања угљеног праха. Врло се лако одређује ако постоји систем за издвајање чврстих честица из гасне струје.

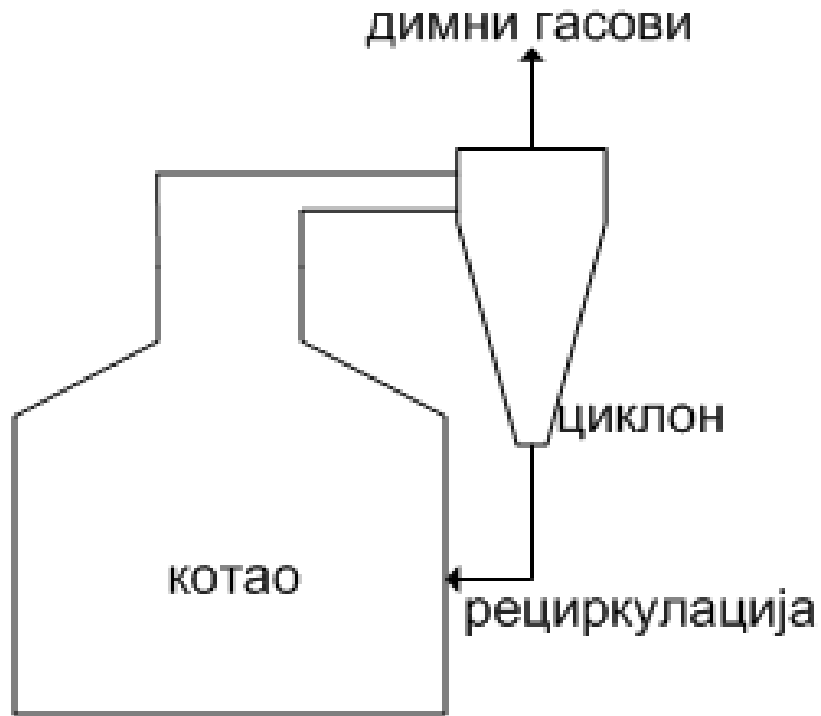
$$\mu_3 = \frac{33077 A a_3}{(100 - a_3) H_d} \cdot \eta_o [\%]$$

На величину овог губитка утиче:

- систем сагоревања тј. степен везивања ложишта. На њега код сагоревања у слоју утиче брзина струјања ваздуха, док код сагоревања у лету на њега утиче време задржавања честица у ложишту, као и време потребно за потпуно сагоревање чврстог горива у лету.
- низ фактора повезаних са физичко-хемијским особинама горива и јачина промаје.
- сортиман угља. Ако је промаја јака а сагоревају ситне честице угља овај је губитак већи при сагоревању у слоју него при сагоревању у лету. Код сагоревања у лету овај губитак је већи кад сагорева грубље млевени угаљ.
- форсирање ложишта.

Овај се губитак смањује правилним избором система сагоревања према расположивом гориву. Код котлова са течним режимом као честа мера примењује се рецикулација честица заробљених у пречистачу гасова у ложиште.

У овим формулама 33077 представља доњу топлотну моћ сагорљивог остатка у пропаду.



Рециркулација летећег кокса је једна од мера за смањење губитка услед летећег кокса.

# Губитак услед хемијски непотпуног сагоревања

Овај се губитак најчешће своди на појаву CO, који као производ непотпуног сагоревања излази из котла. Јавља се код свих врста ложишта. Овај губитак узима у обзир присуство угљен монооксида, водоника, метана и осталих угљоводоника у продуктима сагоревања.

$$u_{dC_mH_n} = \frac{V_{RS}(C_mH_n)_s H_{dC_mH_n}}{H_d} \cdot \eta_g \text{ [%]}$$

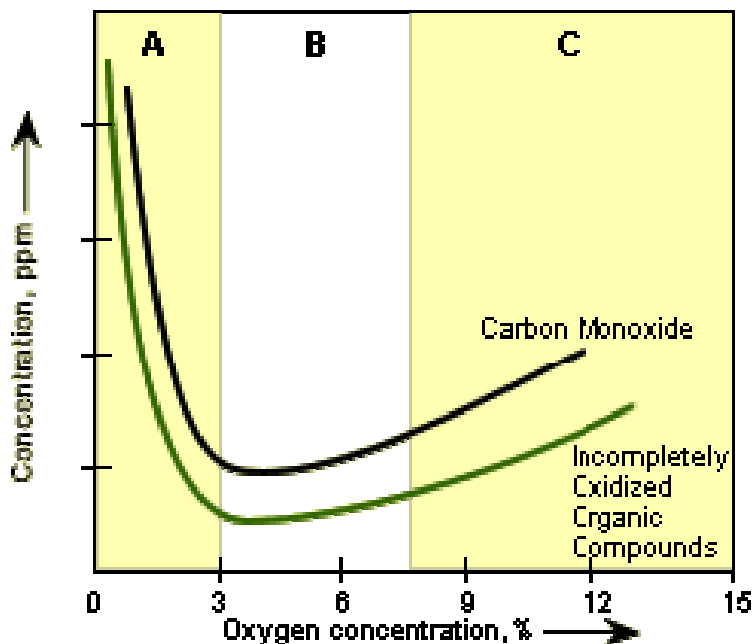
$\eta_g$  степен корисности горива представља гасифицирану (претворену у гас) количину горива.

$V_{RS}$  – количина сувих продуката сагоревања  
 $(C_mH_n)_s$  – количина угљоводоника у сувим продуктима

$H_d$  – доња топлотна моћ горива

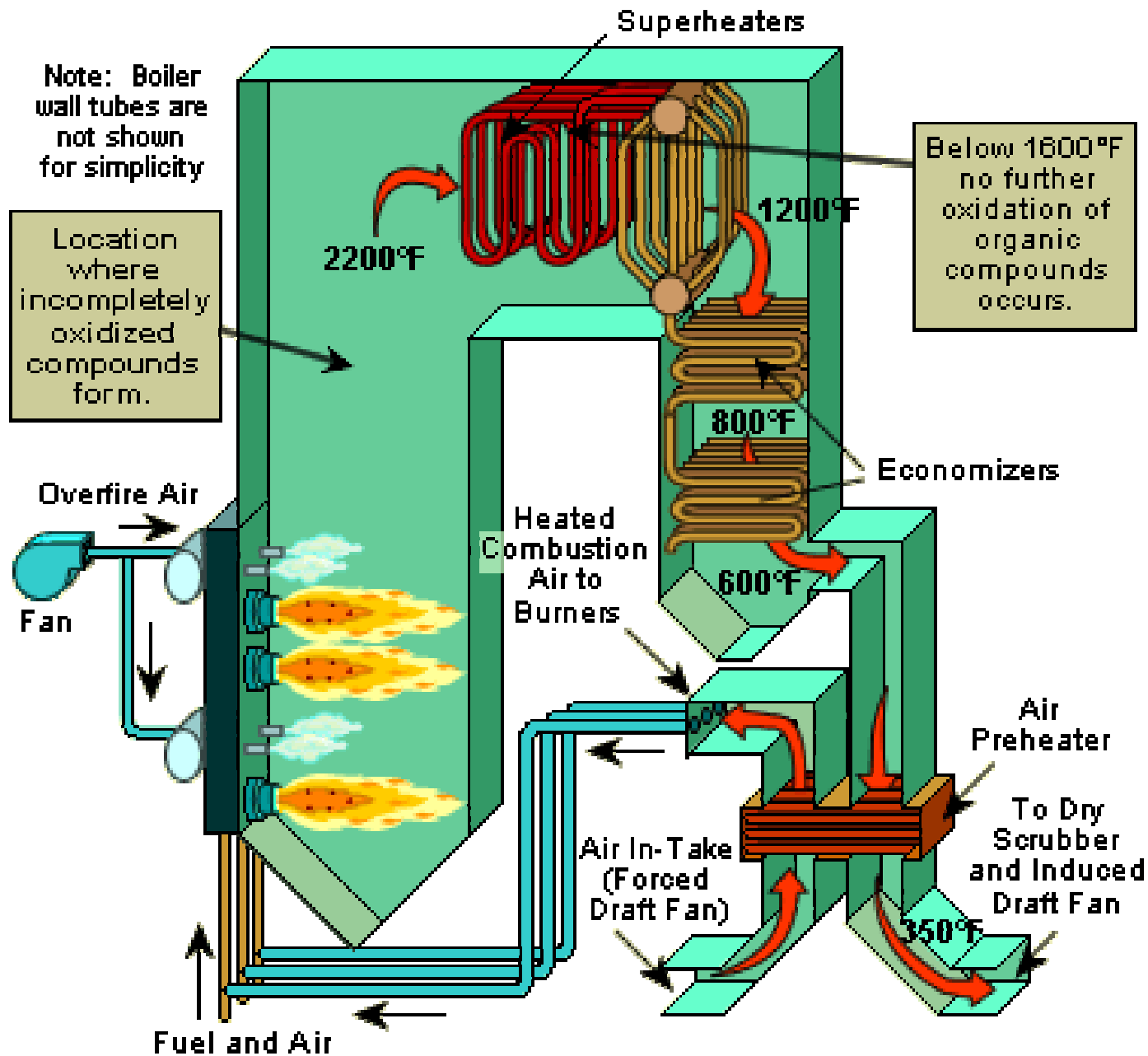
$H_{dC_mH_n}$  – доња топлотна моћ угљоводоника

Figure 2. Concentrations of Incompletely Oxidized Compounds vs. Oxygen Concentrations



- A - Insufficient air:  $C + 1/2 O_2 \rightarrow CO$
- B - Appropriate operating region
- C - "Cold Burning"

**Figure 1. Location Where Incompletely Oxidized Compounds are Formed in a Boiler**



$$u_4 = \frac{(V_{RSt} + V_L - V_{Lmin})(100 - a_1 - a_2 - a_3)u_4 H_{da4}}{100H_d} = \frac{V_{R5}(100 - a_1 - a_2 - a_3)u_4 H_{da4}}{100H_d} [\%]$$

На величину губитка услед хемијски непотпуног сагоревања утичу:

- Хемијски састав испарљивих делова. Потпуност сагоревања је већа када се испарљиви делови састоје из лаких у односу на тешке угљоводонике.
- Расподела ваздуха и довод горива у циљу стварања хомогене мешавине.

Савремене конструкције котлова имају тзв.  $\lambda$  сонду којом мере количину кисеоника у продуктима сагоревања и регулишу довод ваздуха.

# Губитак услед чађи

Овај губитак настаје зато што се на хладне грејне површине таложи у виду чађи угљеник из хемијских једињења која се јављају у продуктима сагоревања. И овај губитак може да се сврста у групу губитака услед непотпуно сагорелог горива.

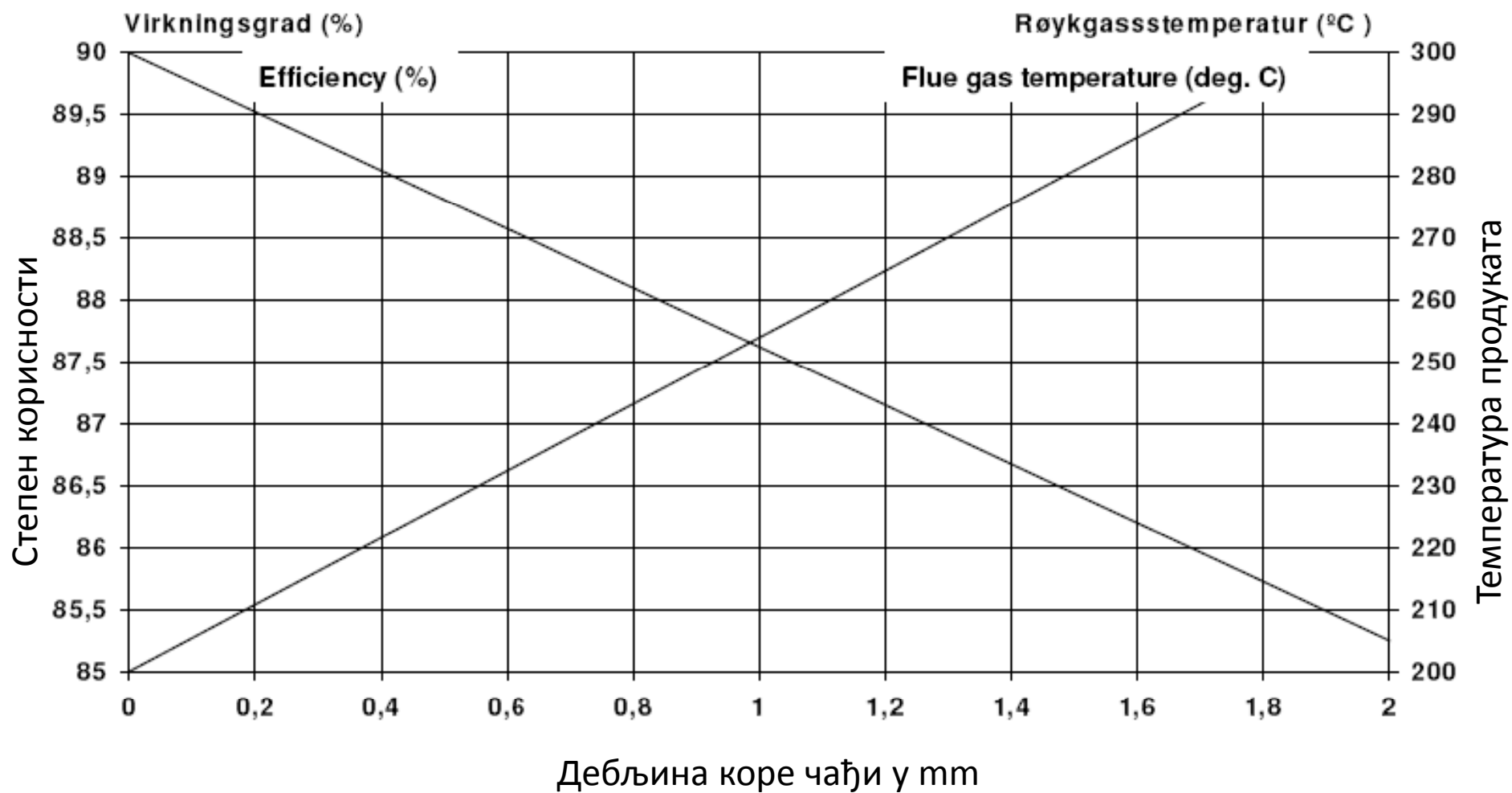
$$u_5 = \frac{33915 V_{RW} \mu_5}{H_d} \cdot \eta_g [\%]$$

$\mu_5 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$  - садржај чађи у продуктима сагоревања

Овај губитак је код савремених котлова занемарљив.

Уколико је топлотно оптерећење ложишта мање, а ложиште интензивније хлађено долази до стварања чађи. На стварање чађи делују нарочито повољно мање топле или сасвим хладне ложишне екранске цеви, ово је повезано са распоредом циркулационих токова у екранском систему ложишта.

Мера којом се спречава стварање чађи је избегавање хладних екранских цеви и уопште великих температурских разлика у ложишту.



Губитак услед стварања коре чађи на зидовима котла



# Губитак услед физичке топлоте шљаке

Јавља се само приликом сагоревања чврстог горива и то нарочито при течном режиму приликом сагоревања чврстог горива у лету. То су ложишта код којих се шљака одводи у течном стању из ложишта. Температура шљаке је увек виша од температуре пепела јер је пепео хлађен примарним ваздухом који се на тај начин загрева.

Пошто су у питању разне температуре посебно треба рачунати губитак у пепелу а посебно у шљаци.

$$u_6 = \frac{G_s(t_s - t_l)c_{ps}100}{B_1 H_d} [\%]$$

$G_s \left[ \frac{kg}{s} \right]$  - количина шљаке која је одстрањена.

$t_s [^{\circ}C]$  - средња температура шљаке при напуштању ложишта.

$c_{ps} \left[ \frac{kJ}{kgK} \right]$  - специфична топлота шљаке.

Величина овог губитка зависи од:

- температуре шљаке при излазу из ложишта;
- процента пепела А у гориву;
- степена везивања шљаке за ложиште;
- специфичне топлоте шљаке, односно њеног састава;
- топлотне моћи горива са којом је у обрнутој сразмери.

Овај се губитак не може смањити, али се може компензовати коришћењем физичке топлоте шљаке ван ложишта или њеним коришћењем у грађевинске сврхе.

# Губитак у излазним гасовима

Јавља се код сагоревања свих горива и најзначајнији је котловски губитак. То је губитак услед физичке топлоте излазних гасова. За његово одређивање користе се разни теоријски и емпиријски обрасци.

$$u_7 = \eta_g \frac{V_{RW} c_{pm} (t_g - t_l)}{H_d} \quad [\%]$$

$c_{pm} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}} \right]$  - средња специфична топлота гасова на излазу.

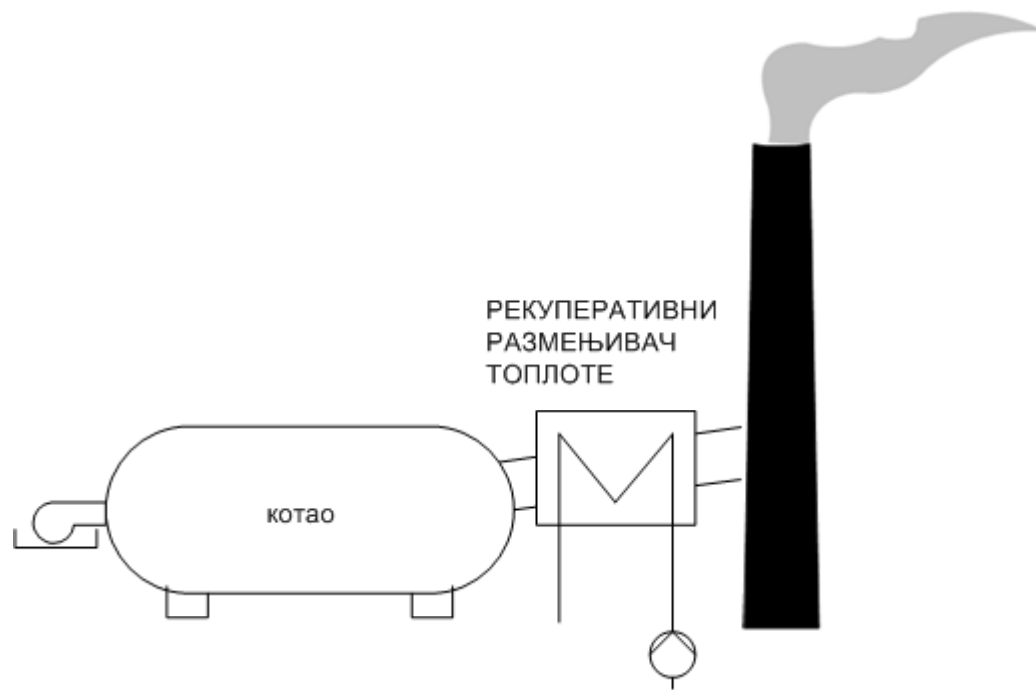
Овај се губитак може одредити и из  $H - t$  дијаграма.

На величину овог губитка утиче неколико фактора:

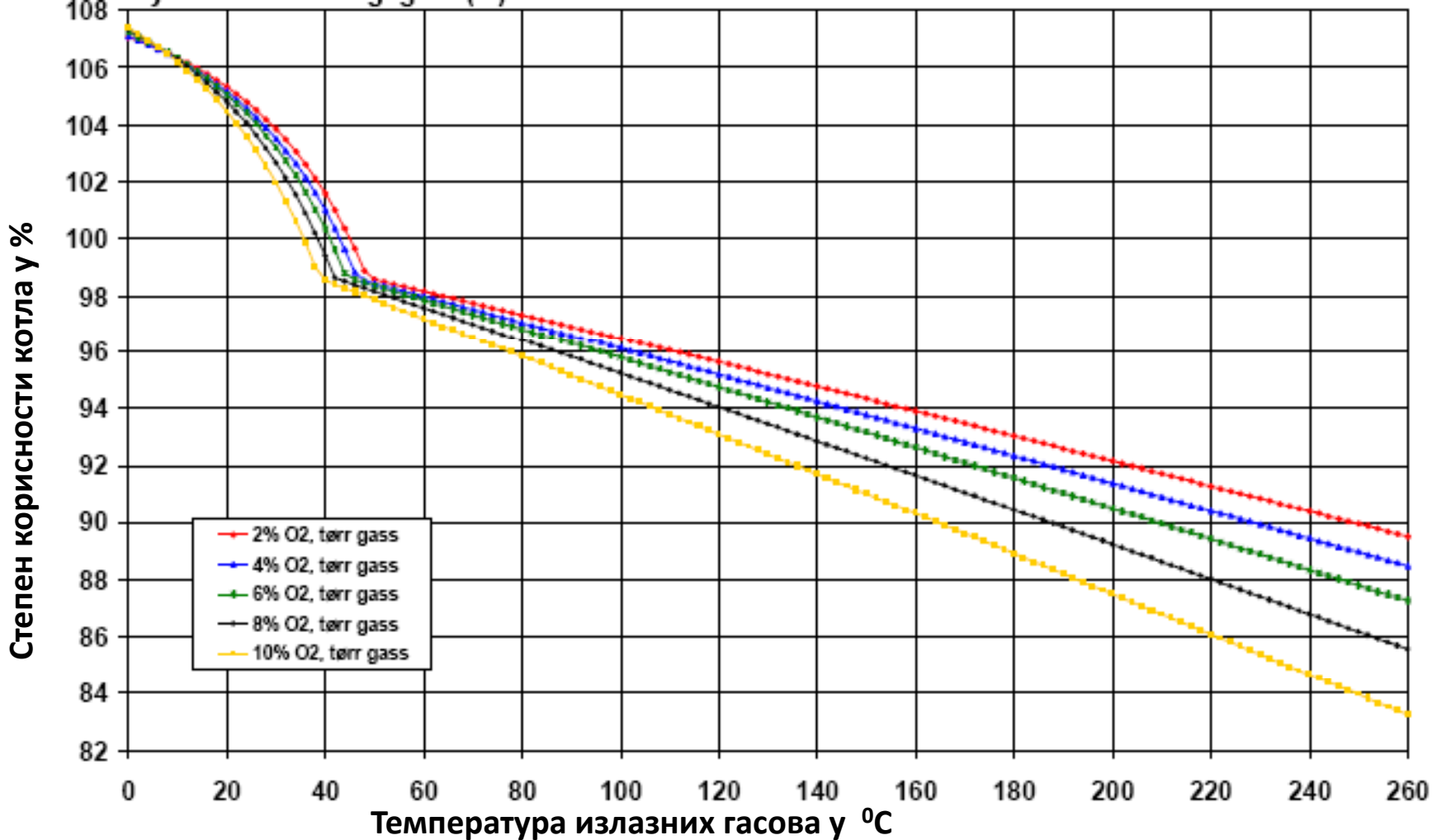
- Температура излазних гасова и њихова енталпија, која зависи од састава горива. Код влажних горива енталпија је нарочито велика јер влага из горива пролази кроз цео катао и напушта га носећи са собом и своју топлоту испаравања.
- Температура и количина улазног ваздуха. Од значаја је и количина влаге у ваздуху. Уколико је ваздух веће влажности, губитак је мањи.
- Квалитета горива. Код влажнијих горива овај је губитак већи. Овај је губитак мањи код квалитетнијих горива (са већом топлотном моћи).
- Степена корисности горива који представља гасифицирану количину горива тј. количину горива која је у виду гаса прошла кроз катао. Ова количина гаса је већа уколико је степен корисности горива већи па је и већи губитак у излазним гасовима, међутим нижи су губици  $u_1$ - $u_3$ , тј. гориво је боље искоришћено.

На снижење овог губитка може се утицати помоћу снижења температуре излазних гасова и смањењем вишка ваздуха. Примена ових мера често зависи од низа других фактора.

Код наших веома влажних угљева овај се губитак смањује тако што се гориво суши по отвореној шеми.



Применом рекуперативног размењивача топлоте могуће је знатно смањити губитак услед спољашњег расхлађења.



На слици је приказан степен корисности котла (губитак у излазним гасовима) у зависности од температуре продуката на излазу из котла и вишка ваздуха (овде изражен као % кисеоника у продуктима сагоревања), при сагоревању лаког лож уља. Степен корисности котла је за излазне температуре продуката ниже од температуре тачке росе влажних продуката виши од 100% зато што котлао користи и горњу топлотну моћ (узима у обзир топлоту која се ослобађа кондензацијом водене паре из продуката сагоревања) а степен корисности се рачуна у односу на доњу топлотну моћ горива.

# Губитак услед спољашњег расхлађивања

Услед разлике спољашње температуре котла и температуре околине топлота се са спољне површине одаје конвекцијом и зрачењем.

Величина овог губитка зависи од  $u_g = f(\alpha, \Delta t, A)$ .

Сваки од ових фактора са своје стране зависи од низа других фактора.

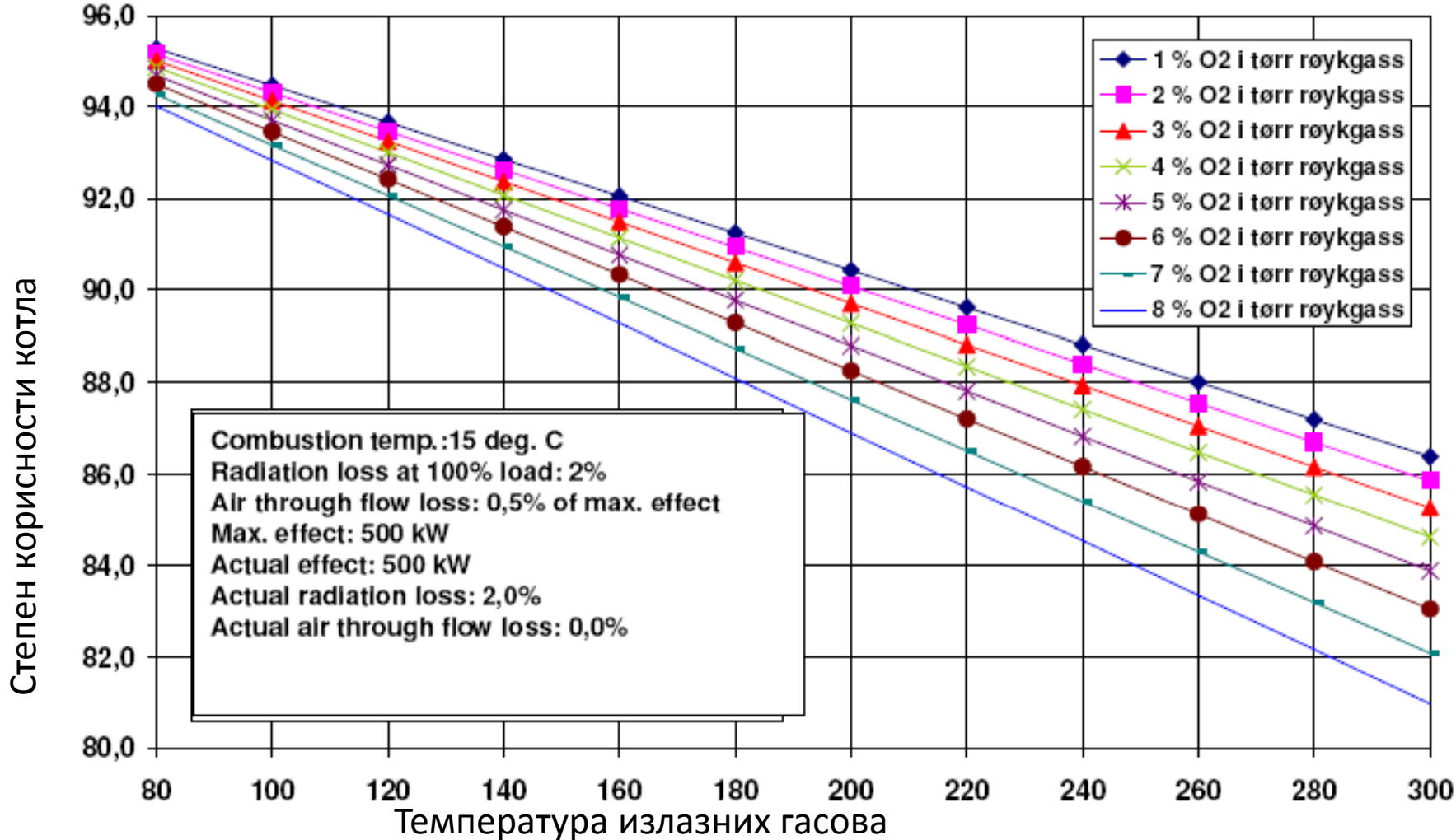
На смањење овог губитка најбоље се утиче изолацијом.

Код котлова код којих је сталан изнас (нпр. само пара сталног притиска или топла вода сталне температуре) губитак услед спољашњег расхлађивања веома мало зависи од степена оптерећења котла.

Топлотни губици у једном котлу, а са њима и степен корисности котла *зависе од*:

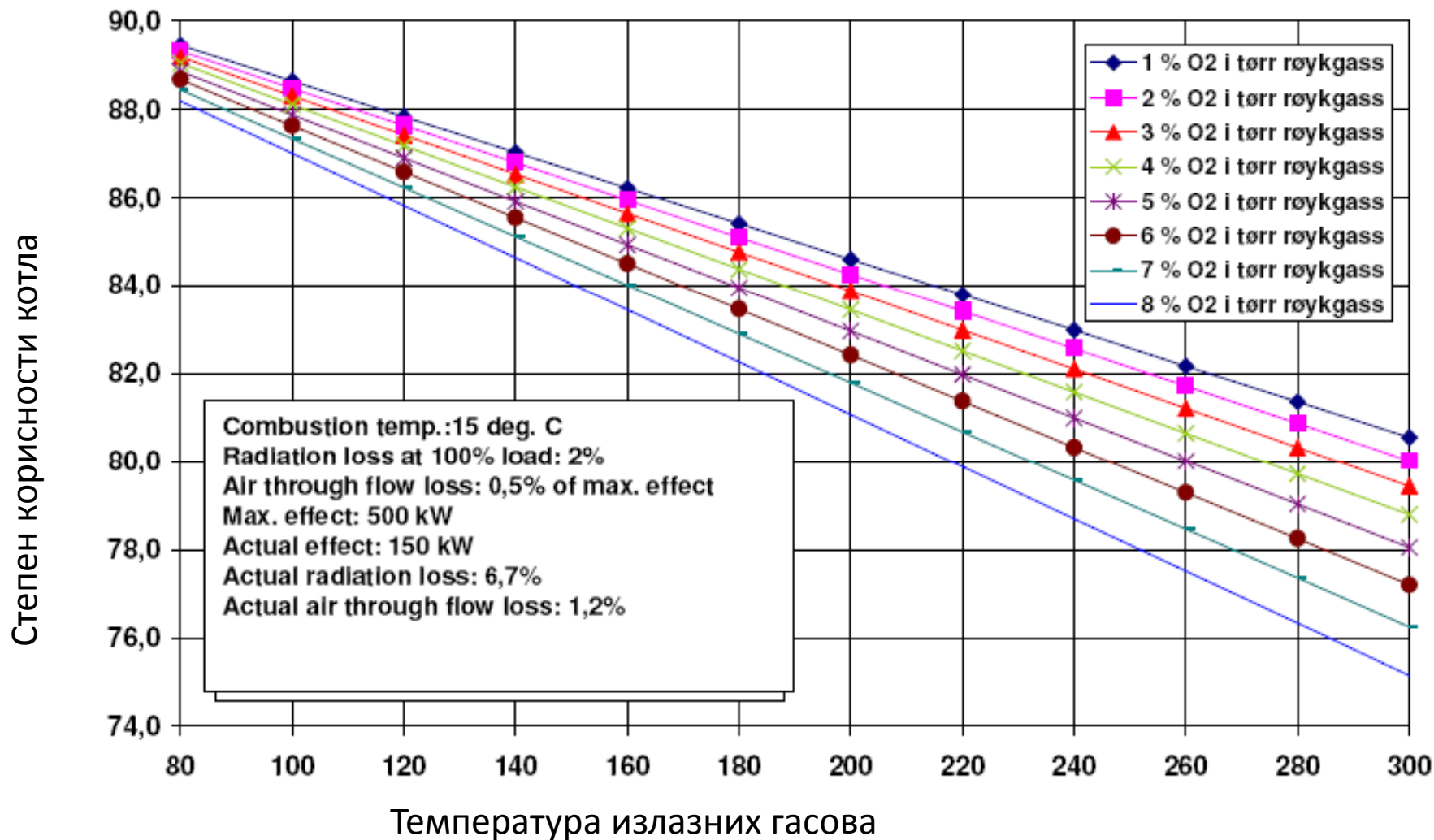
- капацитета котла,
- система ложења и конструктивних појединости котла,
- квалитета горива (сортиман,  $A$ ,  $W$ ,  $S$ , температура топљења пепела),
- температуре излазних гасова,
- проценат оптерећења котла,
- врсте и квалитета изолације,

Приликом покушаја смањивања појединих губитака потребно је водити рачуна о међуповезаности појединих губитака.

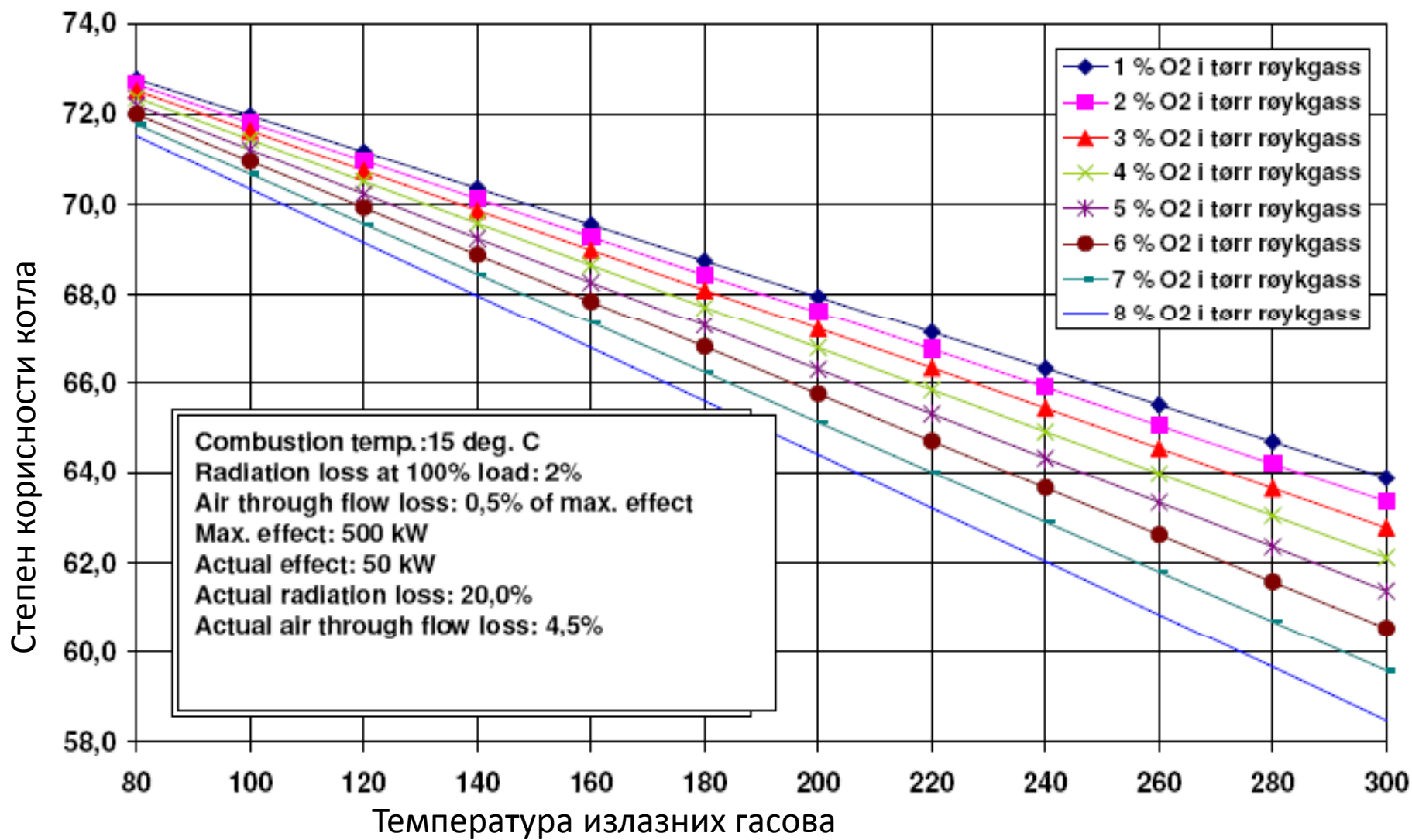


Степен корисности котла при капацитету котла од 100 % при коришћењу уља за ложење као горива.

Објашњење: губитак услед спољашњег расхлађивања је 2% од максималног капацитета котла без обзира на режим рада котла. Приликом рада котла на капацитету мањем од 100 % долази до честих прекида у раду котла. Том приликом да не би дошло до експлозије котла пропушта се кроз котао извесна количина ваздуха. При раду котла на малом капацитету врло су чести ови прекиди, тј. већи је губитак топлоте.



Степен корисности котла при капацитету котла од 30 % при коришћењу уља за ложење као горива.



Степен корисности котла при капацитету котла од 30 % при коришћењу уља за ложење као горива.



# Шта је степен корисности котла?

То је однос количине топлоте која је предата медијуму (најчешће вода) који се загрева и енергије коју са собом у процес уноси горива смеша (гориво+ваздух за сагоревање). Нпр. код топловодног котла који има степен корисности 90% то значи да је 90% енергије коју је са собом унела у процес горива смеша предато води.

# Како се најједноставније одређује степен корисности котла?

У једноставном приступу потребно је мерити само 3 величине:

- садржај кисеоника у продуктима сагоревања
- температуру продукта сагоревања
- температуру околине

Ова три податка омогућавају да се приближно одреди степен корисности котла.

Код кондензационих котлова, додатно је потребно мерити **количину кондензата** која се избацује из котла, или релативне влажности ваздуха за сагоревање и димног гаса.

# Зашто су ова мерења довољна?

- Генерално карактеристике горива (природни гас, ТНГ, мазут, дрва, угаљ...) су познате.
- Особина горива која зависи од садржаја угљеника у њему је садржај  $\text{CO}_2$  у димном гасу у случају идеалног сагоревања (са теоријски потребном количином ваздуха).
- Ова количина  $\text{CO}_2$  је максимум који се никада не среће у пракси.
- Мерењем садржаја кисеоника у димним гасовима омогућава да видимо колико је  $\text{CO}_2$  мање од теоријског максимума тј. колико је кисеоника више него што је потребно. Односно која количина ваздуха пролази кроз котла а да не учествује у сагоревању. Ова количина горива се зове **вишак ваздуха** и изражава се **коефицијентом вишка ваздуха (који представља однос стварне и теоријски потребне количине ваздуха за потпуно сагоревање)**. Он је код гасовитих горива нпр. 1.03 док је код течних у опсегу 1.1 до 1.2.

Са нижом вредношћу вишка ваздуха мања је количина дима која излази из димњака тј. мањи је и губитак топлоте коју са собом у околину носе димни гасови. Да би се степен корисности одредио потребно је и да се процени губитак са површине котла у околину.

Губитак топлоте са површине котлова је код савремених котлова мањи од 1% док код старији котлова може бити и до неколико %. Тако да је коначно:

**Степен корисности котла% = 100% - губитак у димним гасовима% - губитак кроз омотач котла%**



# Материјални и топлотни биланс термичког постројења

представља биланс свих материја и топлота на улазу у пећ или котлао и свих материја и топлота на излазу из пећи или котла. И не само котла или пећи већ било ког уређаја у коме има трансформације материје или енергије. Користи се ради:

- ✓ оцењивања квалитета рада термичког постројења, односно степена корисности, и
- ✓ дефинисање начина за побољшање процеса.

Степен корисности дефинише који се део топлоте унешен у термичко постројење горивом може корисно употребити.

# Материјални биланс

Биланс материја на улазу и излазу из термичког постројења може се свести на јединицу времена, јединицу горива илиј јединицу материјала који се термички обрађује. Топлота се предаје на **директан начин** у постројењима где су продукти сагоревања у директном контакту са материјалом који се термички третира ( примери размене топлоте су код: високих пећи, шахтних пећи, ротационих пећи и др.). Код **индиректне топлотне размене** ( примери су код: котлова, парних котлова, хемијских реактора, реторти) продукти нису у физичком контакту са материјалом. Због овога постоје 2 начина за израду материјалног биланса. При индиректном начину неопходне су 2 једначине, док је код директне размене топлоте довољна једна једначина. У случајевима кад нема мешања материјала који се термички третира и продуката сагоревања материјални биланс је следећег облика:

$$(1 + \lambda L_{min}) = V_{vp} \frac{M_{vp}}{22.4} + g_{1.1} + g_{1.2} + g_{1.3} \quad [kg/kg_B]$$

ако се овај израз жели изразити у јединици времена множи се са потрошњом горива и добива се следећи израз за материјални биланс сведен на јединицу времена:

$$B_1(1 + \lambda L_{min}) = B_1 V_{vp} \frac{M_{vp}}{22.4} + G_{1,1} + G_{1,2} + G_{1,3} \quad [kg/s]$$

гасовито

гасовито

чврсто аг. стање

зависи од врсте горива

У горњој су једначини:

$B_1$  [kg/s] - потрошња горива

$L_{min}$  [kg/kg<sub>B</sub>] - минимално потребна количина ваздуха за сагоревање

$V_{vp}$  [m<sup>3</sup>/kg<sub>B</sub>] - запремина влажних продуката сагоревања

$M_{vp}$  [kg/kgmol] - моларна маса влажних продуката сагоревања

$G_{1,1}$  [kg/s] - маса пропалог горива кроз решетку

$G_{1,2}$  [kg/s] - маса чврстог остатка после сагоревања у шљаци и пепелу

$G_{1,3}$  [kg/s] - количина летећег кокса у продуктима сагоревања на изласку из термичког постројења

## Билансна једначина сировина

$$G_s = G_m + \left( V_{gs} \frac{M_{ps}}{22.4} + G_{cs} + G_{ps} \right) G_s \quad [kg/kg_B]$$

где су:

$G_s$   $[kg/kg_B]$  - количина сировине (шарже) убачена у пећ по 1кг горива

$G_m$   $[kg/kg_B]$  - количина материјала (производа) на излазу из термичког постројења по 1 кг горива

$V_{gs}$   $[m^3/kg_B]$  - запремина гасова (продуката) из сировине

$M_{ps}$   $[kg/kgmol]$  - моларна маса гасова (продуката) из сировине

$G_{cs}$   $[kg/kg_s]$  - количина чврстог остатка из сировине

$G_{ps}$   $[kg/kg_s]$  - количина пепела и летећих честица у гасовитим продуктима технолошког процеса



Основни проблем при одређивању материјалног биланса је немогућност мерења свих величина које улазе у материјални биланс.

У претходном билансу ако се изостави потрошња горива добија се биланс по јединици потрошеног горива. Ако се у једначини материјалног биланса за шаржу подели са количином материјала, а прва једначина помножи са потрошњом горива по јединици масе шарже (сировине) добива се биланс по килограму шарже (сировине).

Уколико постоји директан додир сировине и продуката једначина материјалног биланса по јединици количине горива је:

$$G_s + (1 + \lambda L_{min}) = V_{vp} \frac{M_{vp}}{22.4} + g_{1.1} + g_{1.2} + g_{1.3} + G_m + \left( V_{gs} \frac{M_{ps}}{22.4} + G_{cs} + G_{ps} \right) G_s$$

# Топлотни биланс

Топлотни биланс такође може да се сведе на јединицу горива, материјала и времена. Ово је заправо примењен Први закон термодинамике на термичко постројење. Важан је што код постојећих постројења даје могућност да се на основу јасног увида утврди да ли су могућа побољшања у смислу степена корисности на термичком постројењу. У условима рада постројења које се мења са временом тзв. стационарни режим дефинишемо топлотни биланс као:

$$Q = Q_k + Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \text{ [kJ/kg]} \quad \text{где су:}$$

$Q \text{ [kJ/kg]}$  - укупна уложена количина топлоте по 1 кг горива (за гасовито горво по  $\text{m}^3$ )

$Q_k \text{ [kJ/kg]}$  - укупна искоришћена количина топлоте по кг горива

$Q_1 \text{ [kJ/kg]}$  - топлотни губитак услед механички непотпуног сагоревања

$Q_2 \text{ [kJ/kg]}$  - топлотни губитак услед хемијски непотпуног сагоревања

$Q_3 \text{ [kJ/kg]}$  - топлотни губитак садржан у физичкој топлоти шљаке и пепела

$Q_4 \text{ [kJ/kg]}$  - топлотни губитак садржан у физичкој топлоти гасовитих продуката

$Q_5 \text{ [kJ/kg]}$  - топлотни губитак услед спољашњег расхлађивања

Нормално, степен корисности једног постројења је искоришћена топлота кроз уложену топлоту:

$$\eta = \frac{Q_k}{Q}$$

# КОТЛОВИ

Котло је затворени суд у коме се вода, ваздух или неки други флуид загрева. Разликујемо:

- Парне котлова – који производе сувозасићену и прегрејану пару. Некада су се користили за погон парних локомотива, данас производе водену пару за индустријске сврхе (нпр. за технолошке процесе, кување...) и за производњу водене паре у термоелектранама
- Котлове који раде у надкритичном подручју воде тзв. суперкритичне котлове (изнад критичне тачке која је на 22.09 МПа и 647.3 К), где се не одвајају фазе . Користе се готово искључиво у термоелектранама за производњу електричне енергије.
- Вреловодне котлове – у којима је вода у течном стању при температура изнад 100 °С, а у течном стању се одржава помоћу притиска који је виши од атмосферског. Користе се у индустрији и веома често у системима даљинског грејања. Нпр. у Краљеву је радни режим вреловодних котлова 130/90 °С.

■ Топловодне котлове – у којима је температура воде ниже од  $100^{\circ}\text{C}$ . Користе се у мањим системима даљинског грејања и у индустрији. Данас савремени котлови ове врсте имају степене корисности изнад 100%, зато што користе латентну топлоту кондензације водене паре која се налази у продуктима сагоревања. Најчешће котлови који као енергент користе природни гас раде као кондензациони. Ово је последица све већег коришћења панелног и др. грејања које захтева ниже температуре радних флуида.

■ Ваздушне котлове - за грејање домаћинства (веома често у САД), пластеника, стакленика, спортских балона у котловима се не загрева вода већ ваздух.

# Материјали и захтеви за сигурношћу

Суд под притиском у котлу је најчешће израђиван од челика (или легираног челика), или историјски од кованог гвожђа. Забрањено је коришћење нерђајућег челика у деловима модерних котлова у којима се налази вода, али се користе у прегрејачима паре како не би били изложени течности. Честа је примена код парних котлова бакра и месинга зато што је са њима много лакша израда мањих котлова.

Ливено гвожђе се користи код грејних посуда топоводних котлова. Кртост ливеног гвожђа онемогућава његову употребу код парних котлова високог притиска.

Котлови подлежу инспекцији као и остали судови под притиском. Веома су опасне незгоде са котловима. Од прекорачења притиска осигурани су коришћењем сигурносних вентила.

# Подела парних котлова

- **Котлови са пламеним (димним) цевима.**

Код ових котлова вода делимично испуњава котловски простор, а изнад воде се налази мала запремина неопходна за смештај водене паре. Ложиште је стално окружено водом која се налази на температури одмах испод температуре кључања. Обично се ложиште налази на једном крају котла како би била продужена путања гасова кроз котлао, што доприноси повећању расположиве површине за прелаз топлоте. У поређењу са другом главном врстом парних котлова са воденим цевима ови котлови имају мању продукцију паре, али већи складништечки простор

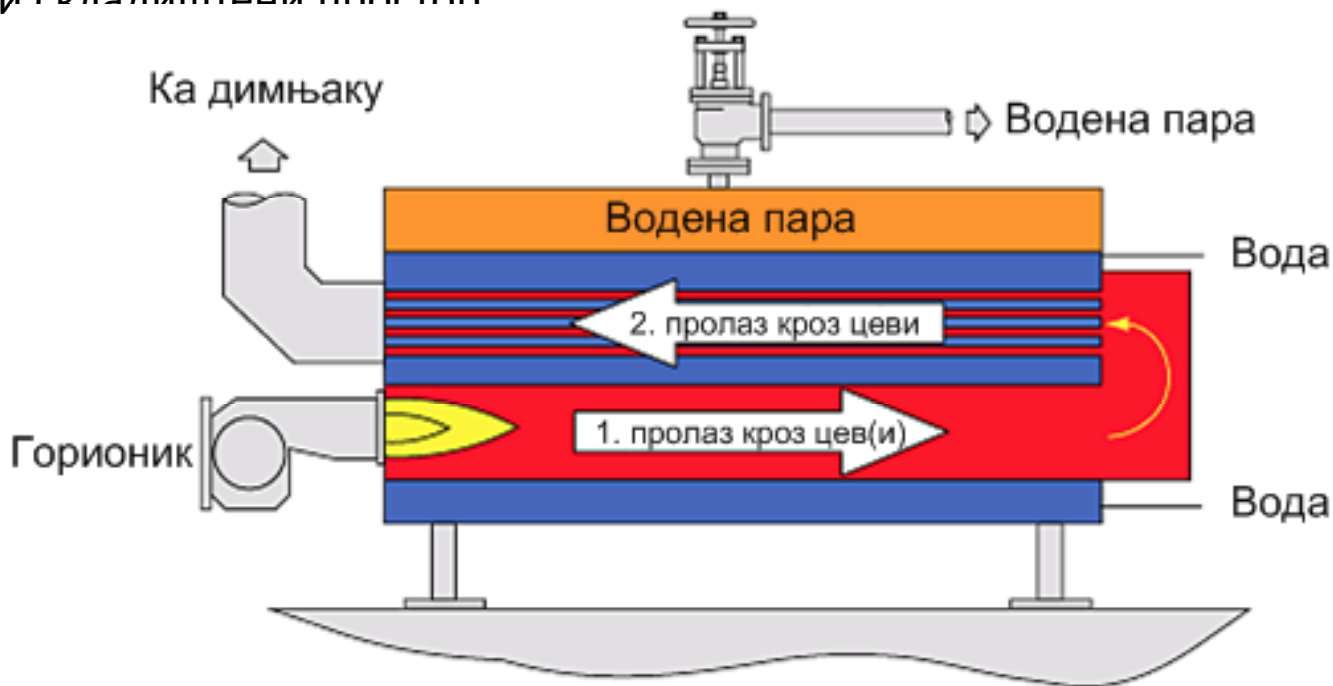
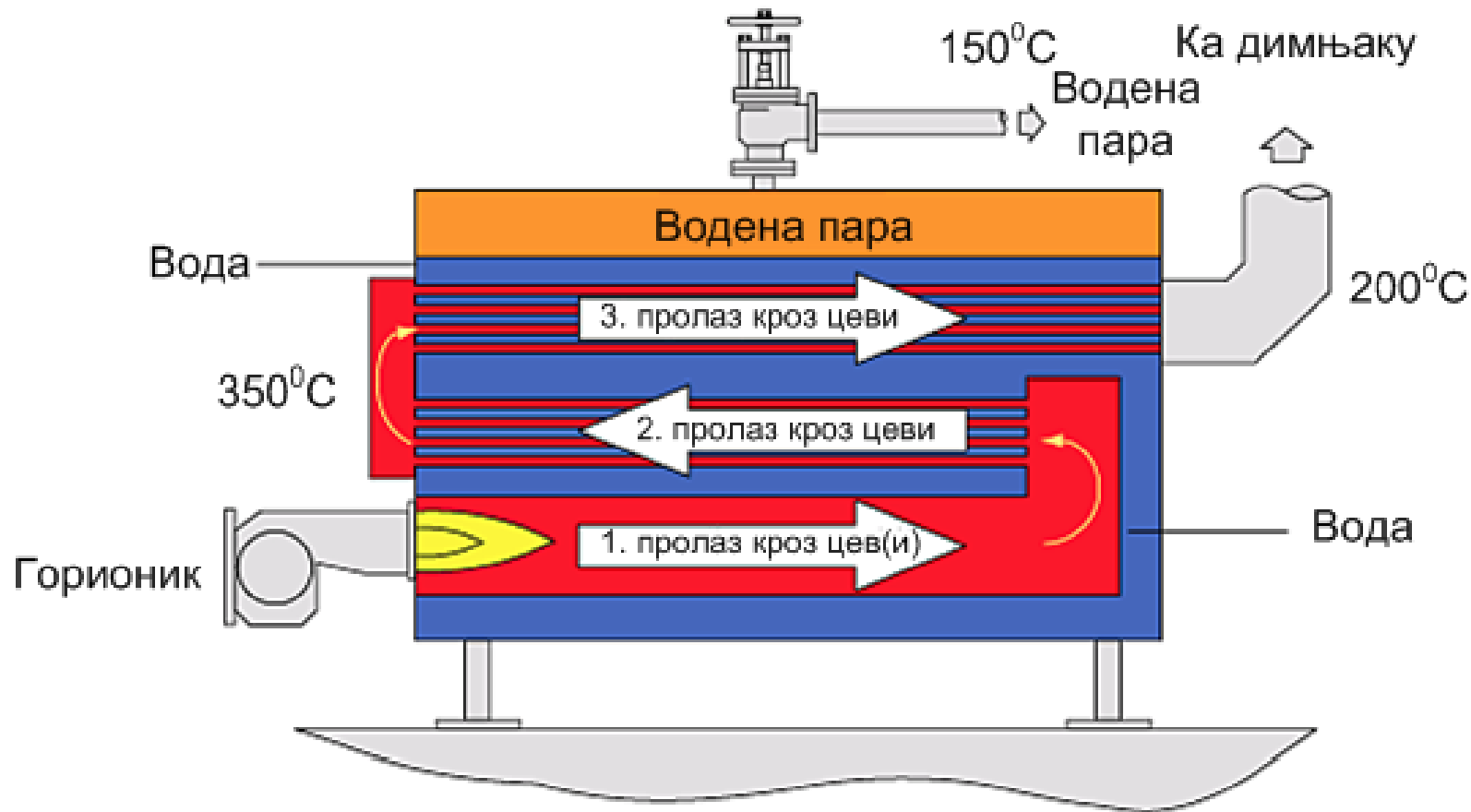


Схема струјања код двопролазног котла, примењују се за притиске до 17 bar

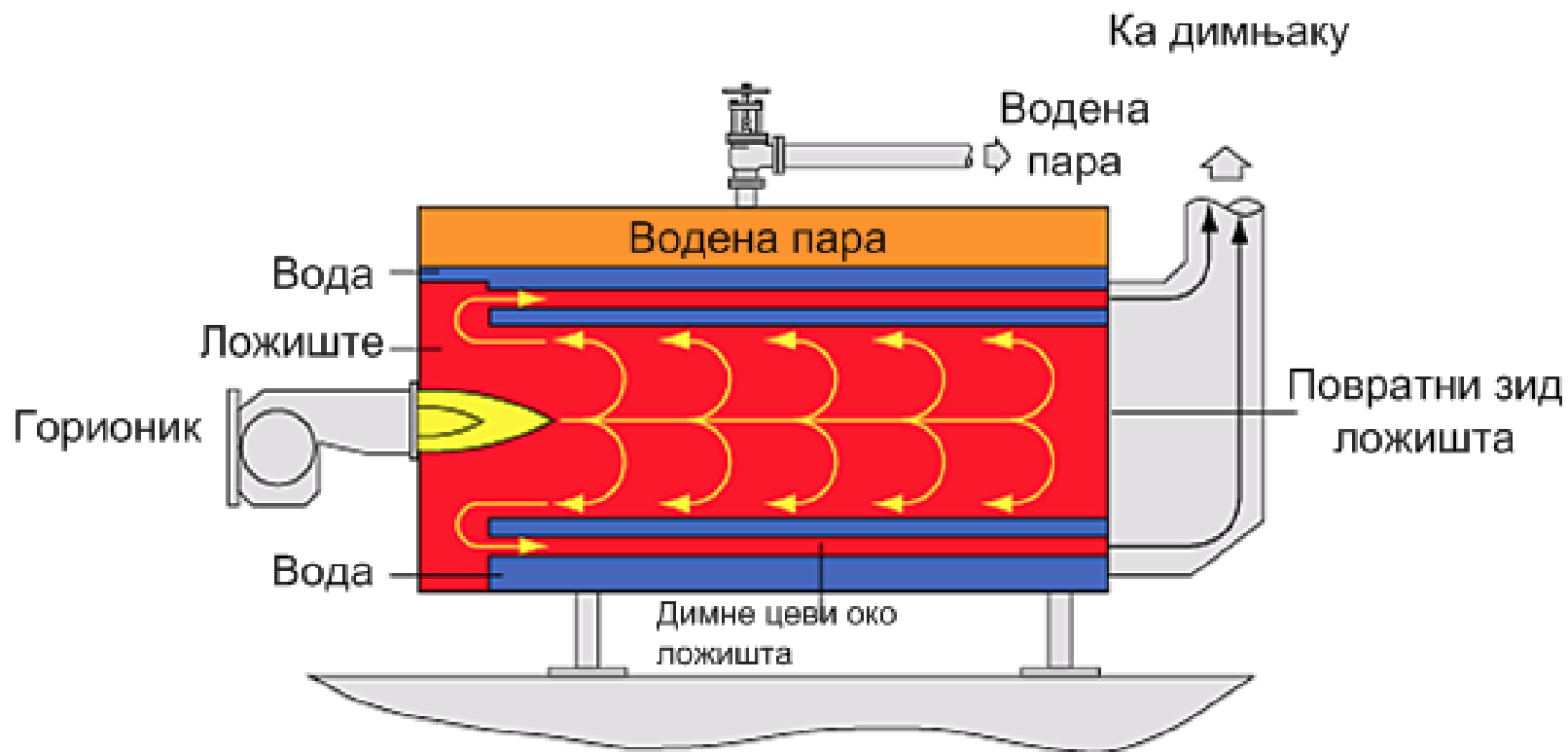


Котао са три пролаза (ово је данас типична конфигурација и код вреловодних котлова)

Типичне вредности трансфера топлоте код тропролазних парних котлова са воденим крајем

	Површина цев(и)	Температура	Процент од укупног преноса топлоте
1. пролаз	11 m <sup>2</sup>	1 600 °C	65%
2. пролаз	43 m <sup>2</sup>	400 °C	25%
3. пролаз	46 m <sup>2</sup>	350 °C	10%





Котао са повратним пламеном – такође спада у котлове са пламеним цевима

## Котлови са воденим цевима

Код ових котлова цеви у којима струји вода су порђане унутар ложишта на многобројне различите начине: често цеви у којима вода струји повезују велике цилиндри, где доњи цилиндар садржи воду а горњи воду и пару; у осталим случајевима, као што је котао са једном цеви, вода струји принудно струји кроз сукцесивне цевне змије. Овај тип котлова генерално даје високу продуктивност паре, али и мањи складишни капацитет паре. Обично се ова врста котлова користи код високопритисних примена где конструкција са већим бројем цеви може да поднесе већи притисак и са мањом дебелином цеви.

Котлови са воденим цевима се користе код:

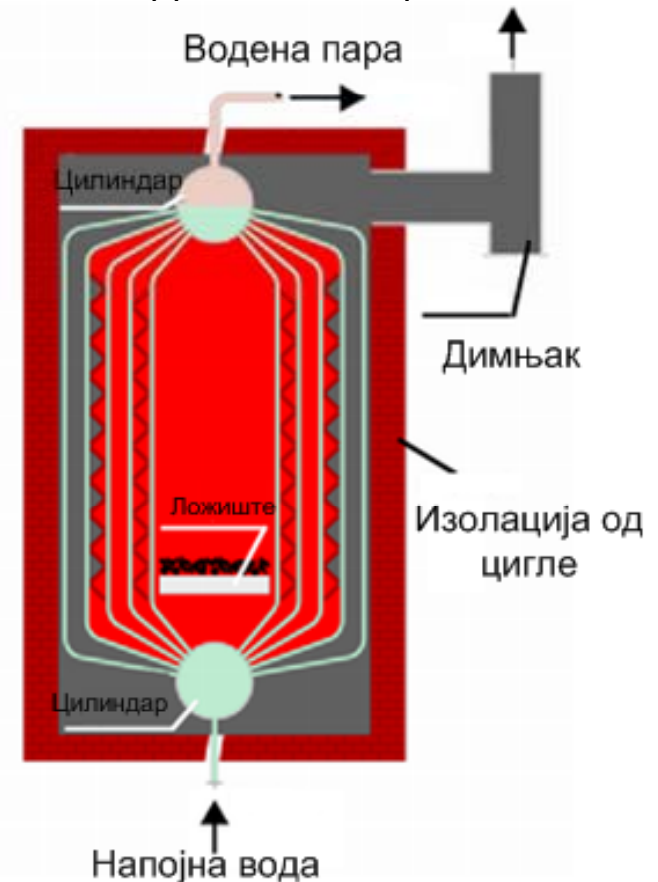
- Високе продукције паре (и до 500 kg/s).
- При коришћењу паре високог притиска (до 160 bar).
- Код коришћења прегрејане паре (до 550°C)

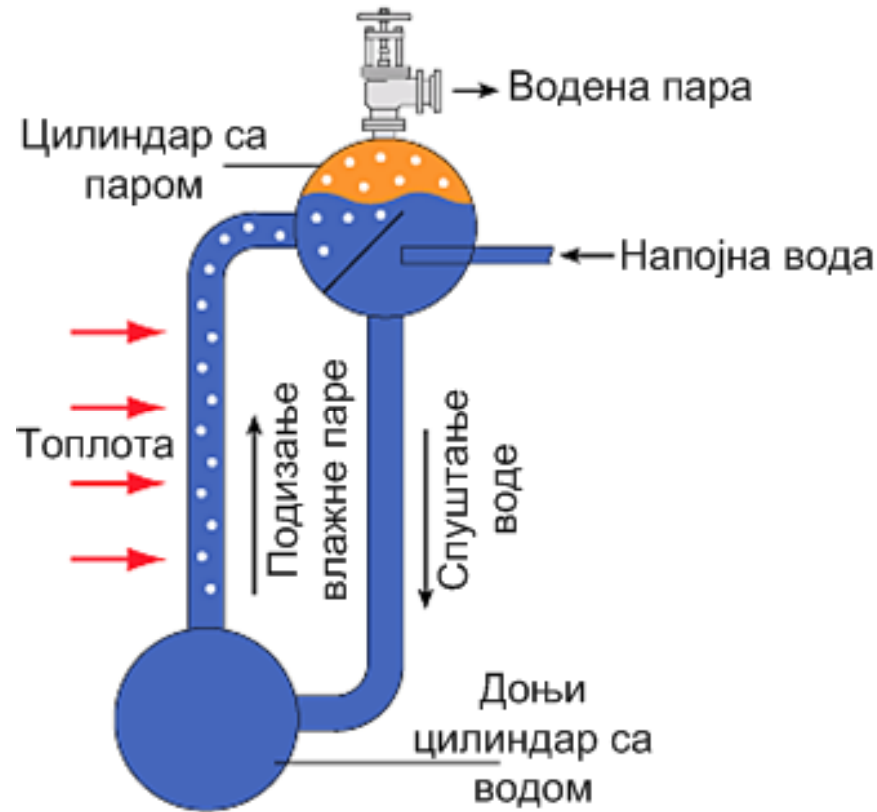
$$\sigma = \frac{PD}{2\chi} \text{ - напон на цилиндричној плочи}$$

P – притисак унутар цилиндра,

D – пречник цилиндра,

$\chi$  - дебелина зида цилиндра





Принцип рада термосифона – гравитационе циркулације

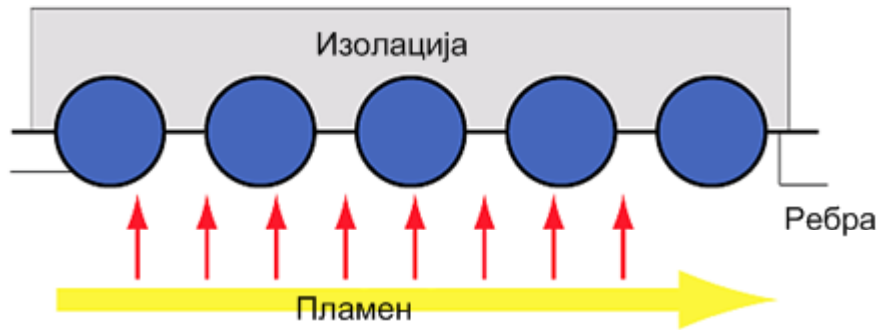
Проблем циркулацији може да представља кад притисак нарасте, тада разлика у густинама између паре и воде опада, што за последицу има смањење циркулације. Да би се на већим притисцима производила иста количина водене паре, потребно је повећавати растојање између доњег и парног цилиндра, или да се примени принудна циркулација.

Топлота настала сагоревањем преноси се зрачењем, прелазом и провођењем.

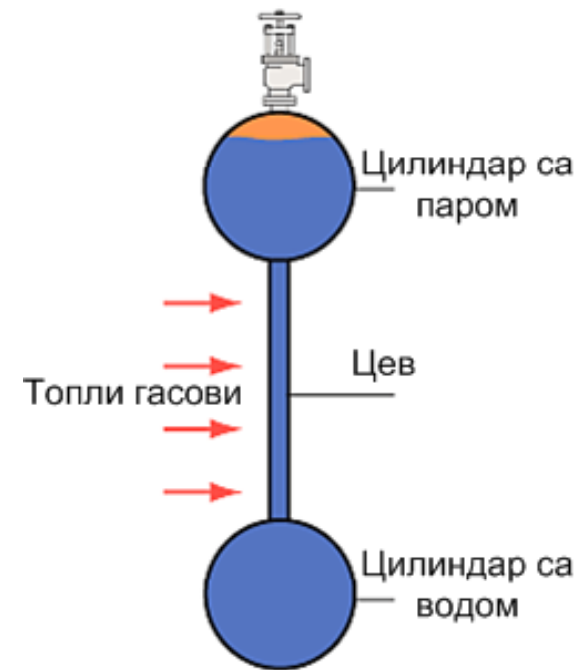
### Део у коме се топлота преноси зрачењем

Ово је отворени део у коме се простире пламен настао сагоревањем горива. Ако би пламен дошао у контакт са цевима, дошло би до њиховог оштећења.

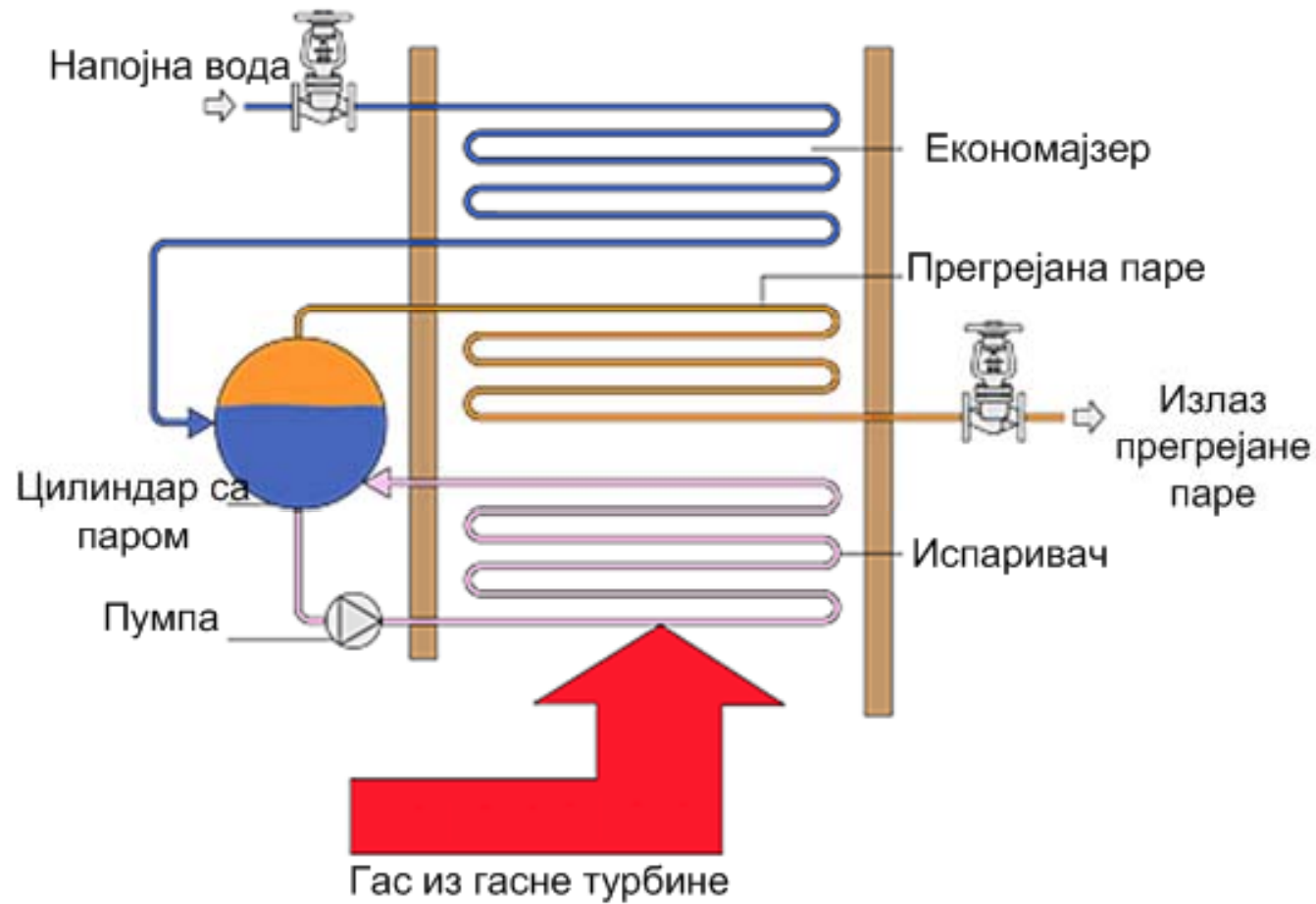
Због тога је део ложишта израђен тако да је обложен са оребреним цевима који чине тзв. мембранске панеле, који су пројектовани тако да апсорбују највећи део енергије зрачења.



Пренос топлоте - доминантно зрачењем

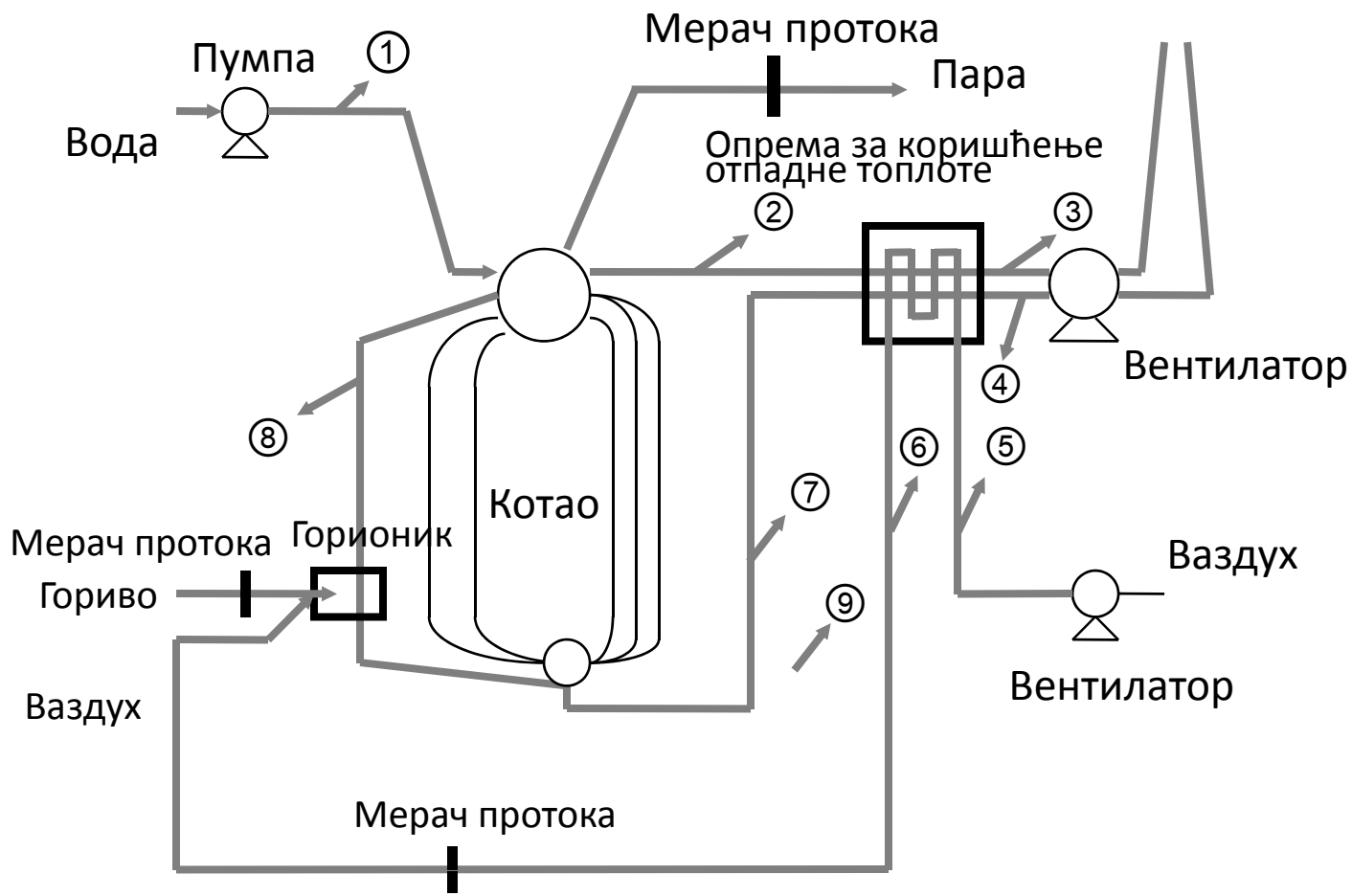


Пренос топлоте – доминанта пролаз топлоте



Котао са воденим цевима и принудном циркулацијом воде – овакве конструкције се користе код когенеративних постројења

# Одређивање енергетске ефикасности КОТЛА



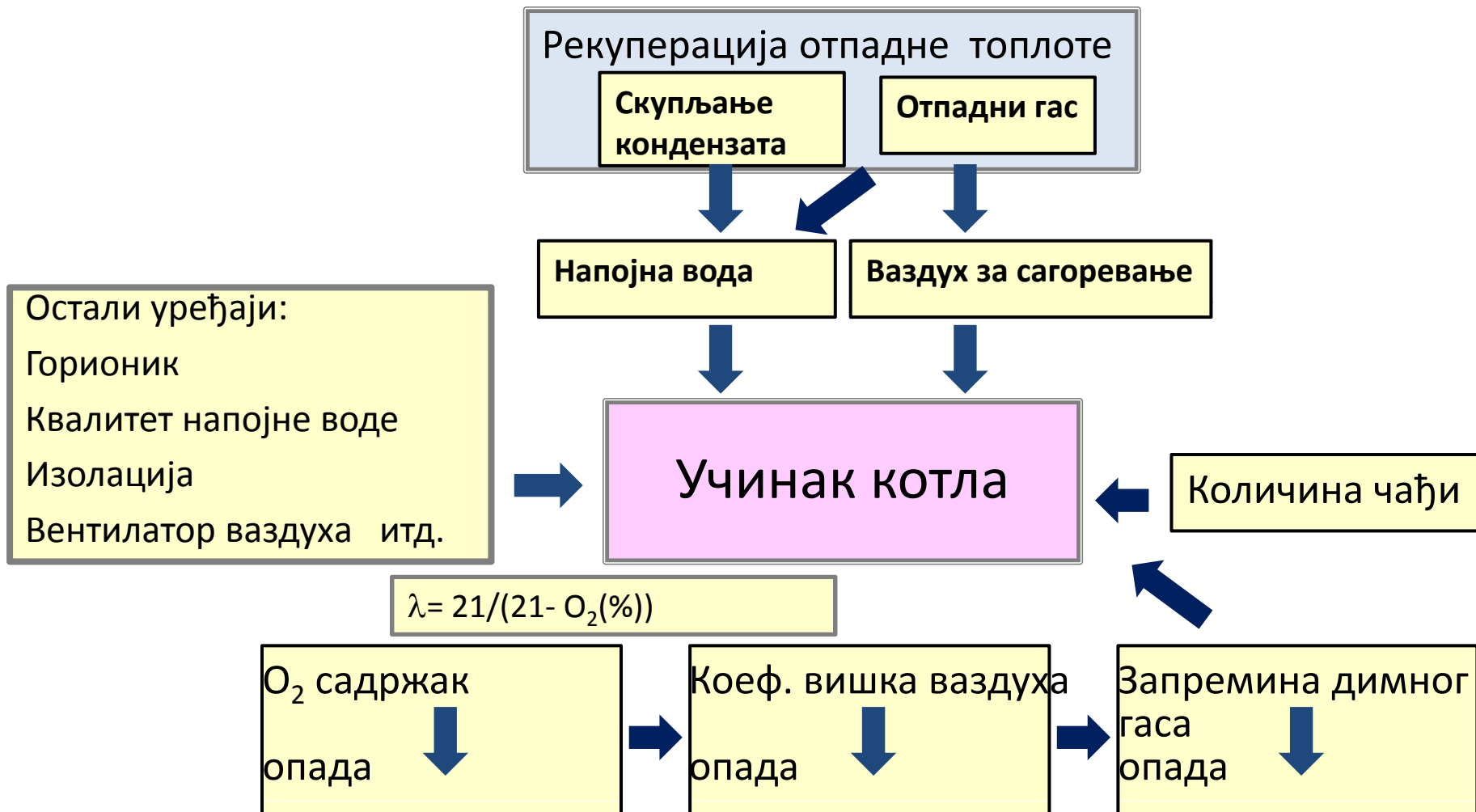
Схематски приказ мерних места потребних за одређивање енергетске ефикасности једног парног котловског постројења

# Мерна места неопходна за одређивање енергетске ефикасности парног (воденог) котала

Мерна места са претходног цртежа → врста мерног уређаја

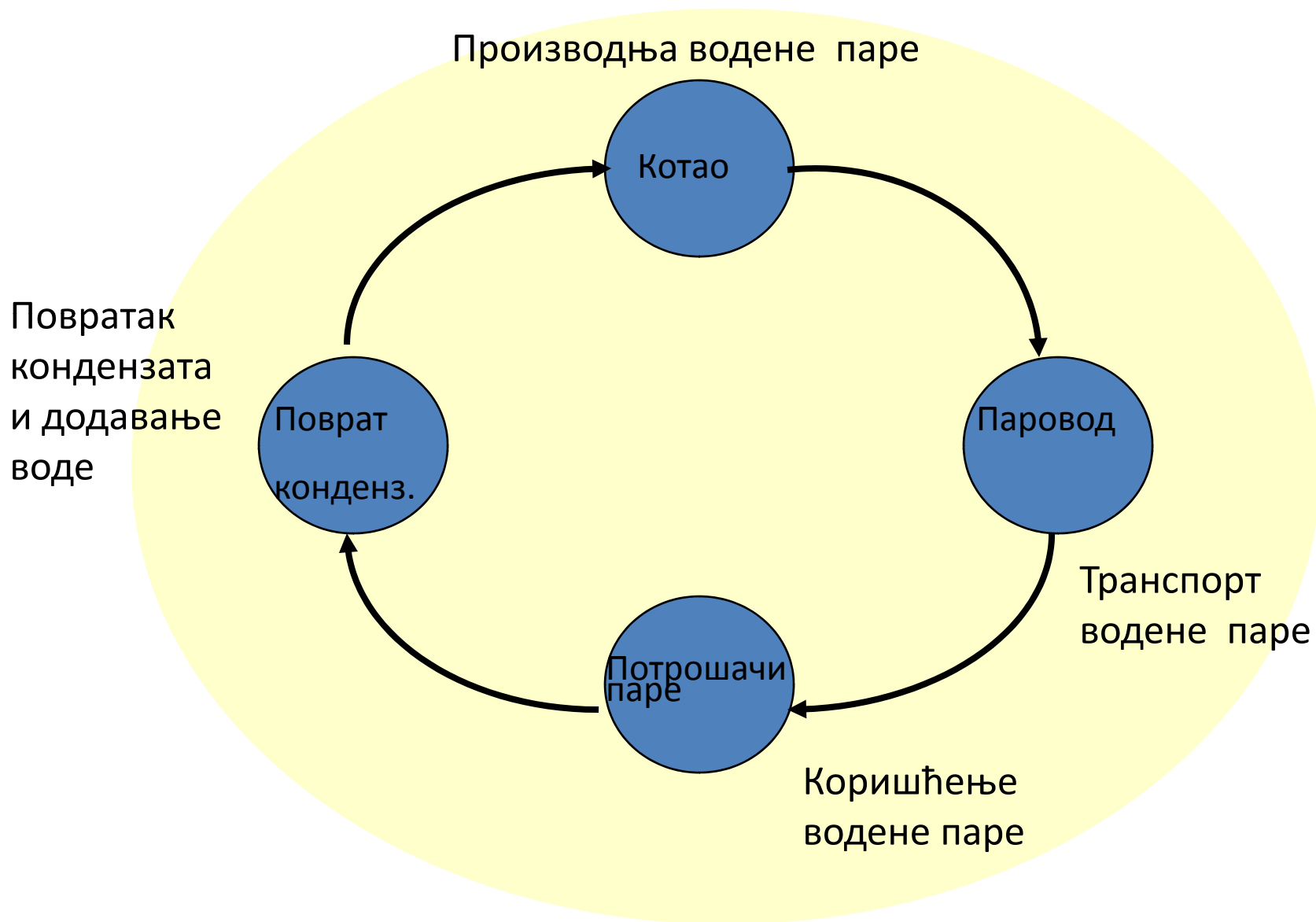
- ① Проток воде → Ултразвучни мерач протока
- ② Састав димног гаса (улаз у рекуператор) → CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> анализатор  
Температура димних гасова (улаз у рекуператор) → К тип термопара
- ③ Температура димног гаса (излаз са рекуператора) → К тип термопара  
Садржај кисеоника у димном гасу (излаз са рекуператора) → O<sub>2</sub> анализатор
- ④ Притисак (статички и динамички) → Пито-ва цев
- ⑤ Температура ваздуха (улаз у рекуператор) → К тип термопара
- ⑥ Температура ваздуха (излаз са рекуператора) → К тип термопара
- ⑦ ⑧ Температура површине → Површински термометар
- ⑨ Температура атмосфере → К тип термопара

# Фактори који утичу на степен корисности котла

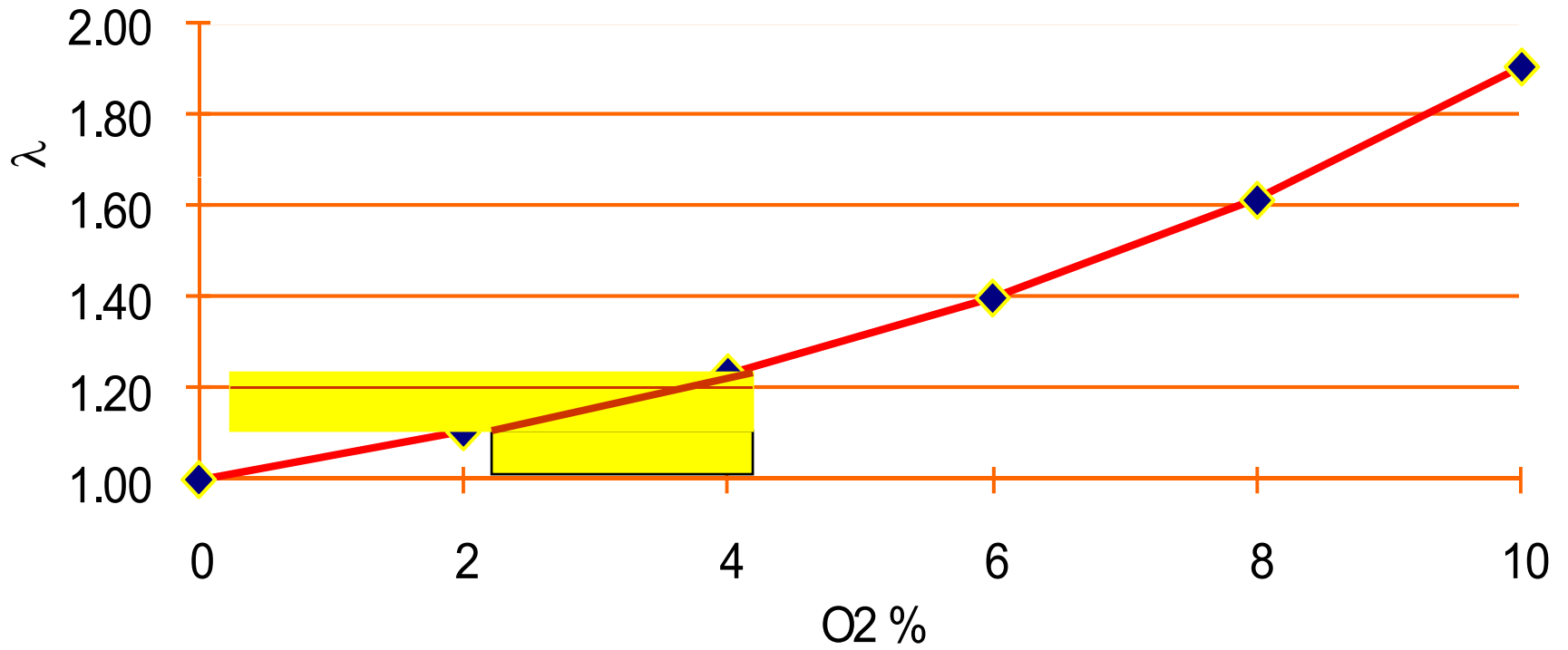




# Круг коришћења паре у индустријском постројењу



# Коефицијент вишка ваздуха - O<sub>2</sub>



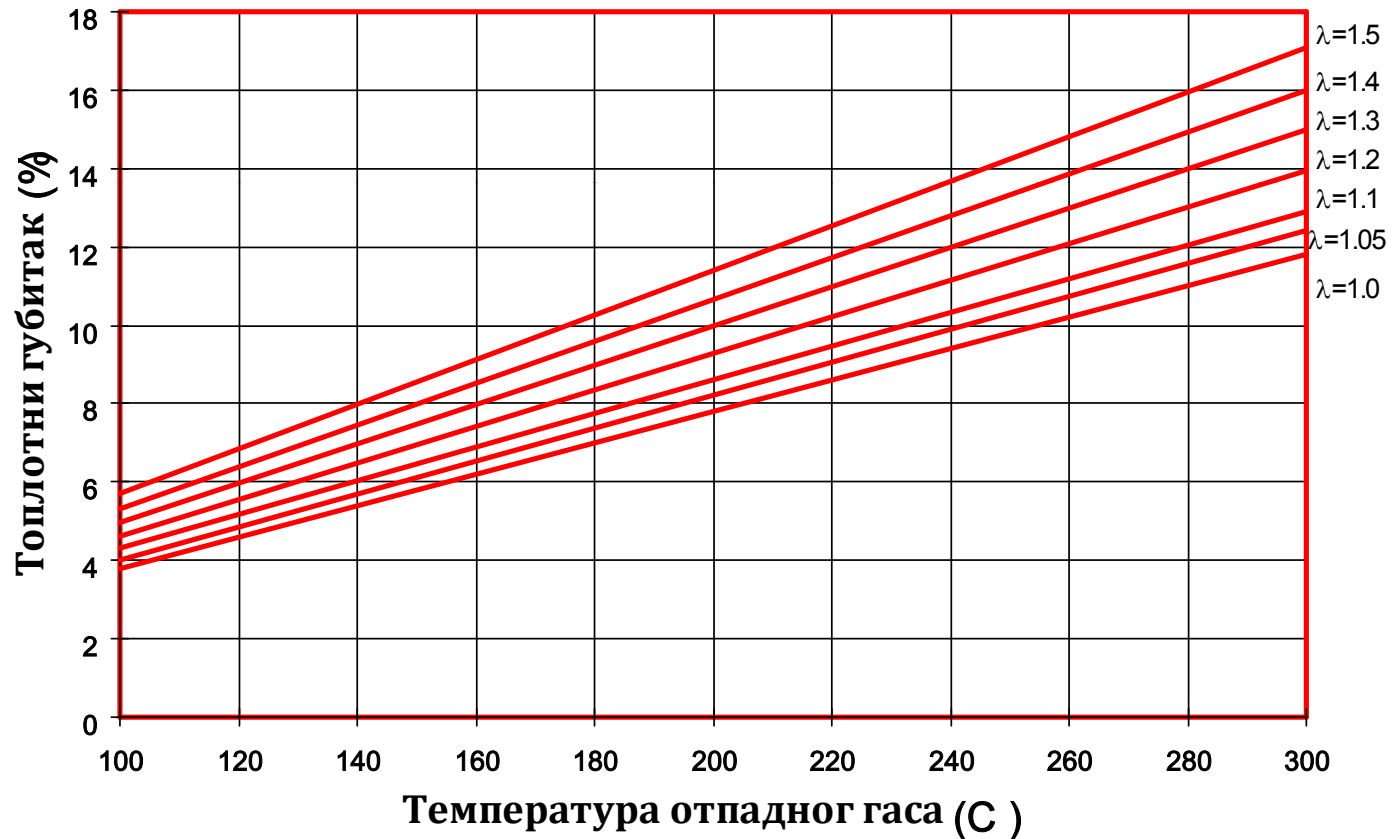
$$\lambda = 21 / (21 - O_2)$$

# Губитак топлоте у димном гасу у зависности од коефицијента вишка

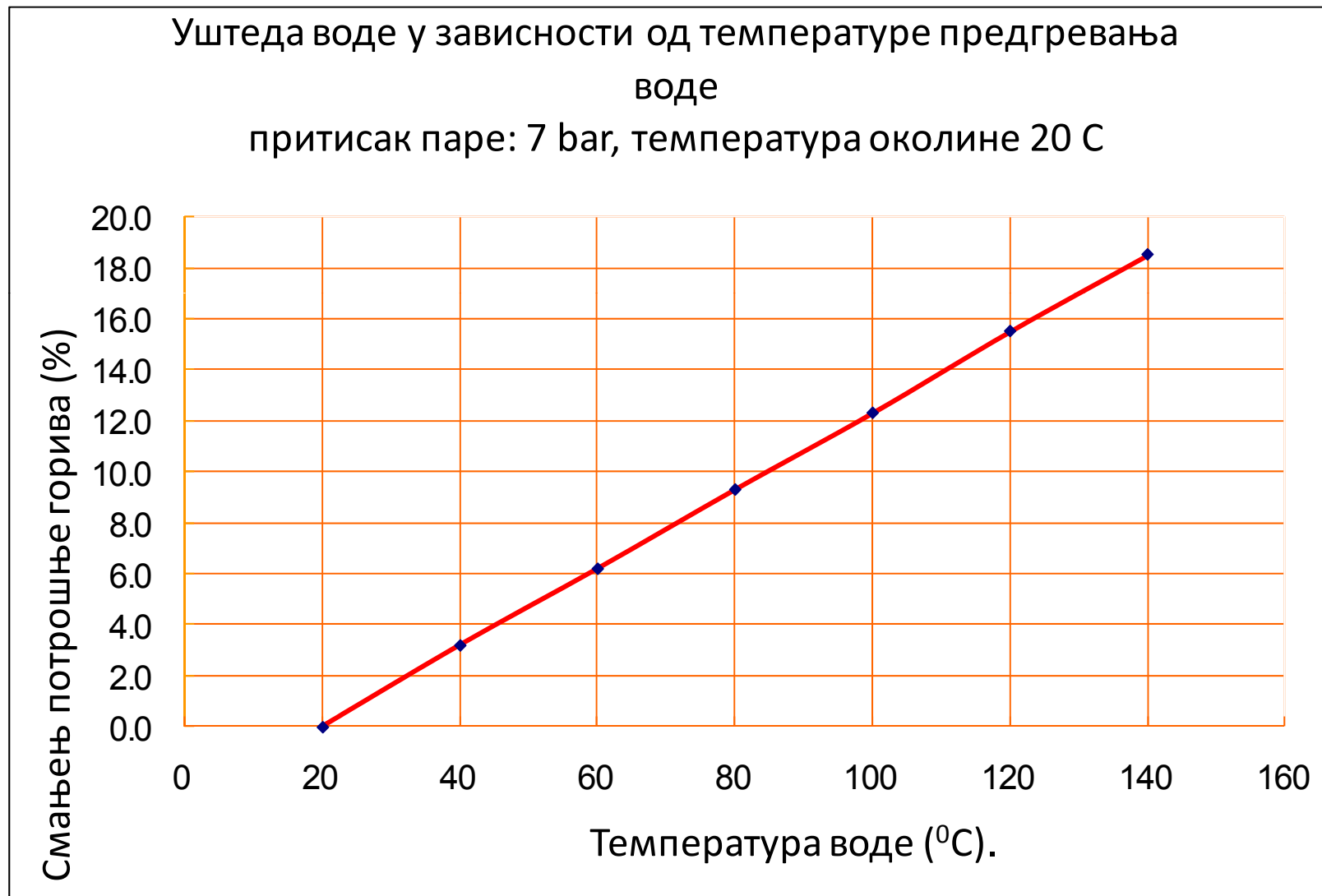
ваздуха

Губитак топлоте у димном гасу у зависности од коеф.

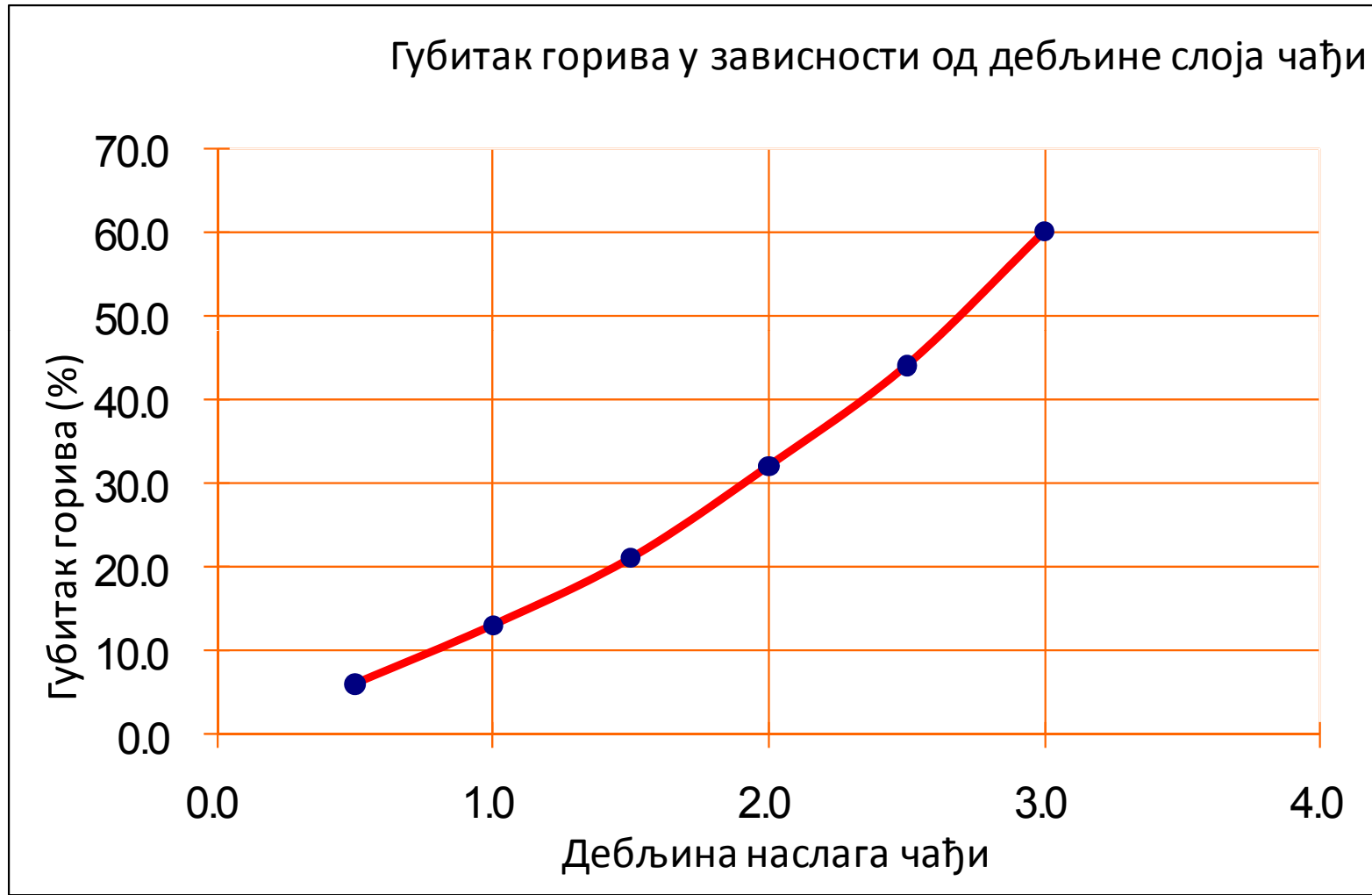
вишка ваздуха



Уштеда горива у зависности од температуре предгревања воде при радним параметрима котла:  
притиска паре 7 bar температура околине 20 °C



# Губитак горива у зависности од дебљине чађи на зидовима котла



# Цурење паре кроз мале отворе

Проток паре  $G$  kg/h

$$G = K' \times P$$

$P$ ; апсолутни притисак паре (bar)

$K'$ ; Емпиријски коефицијент

Пречник мајушног отвора (mm)	1.6	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0
$K'$	0.62	0.97	1.5	2.2	3.9	6.0

Подаци ЕССЈ

# Утицај изолације паровода је јако велик

**Изолација дебљине  
65mm од (CaSiO<sub>4</sub>)**



**100mm цевовод  
10 bar пара**



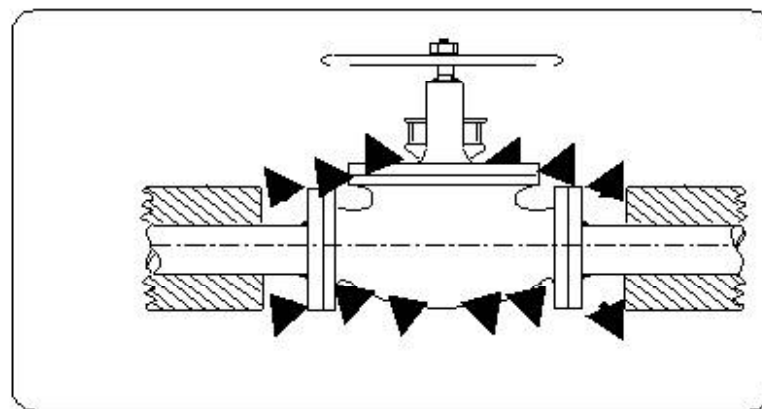
**Губитак топлоте  
1052 W/m (неизолована)**



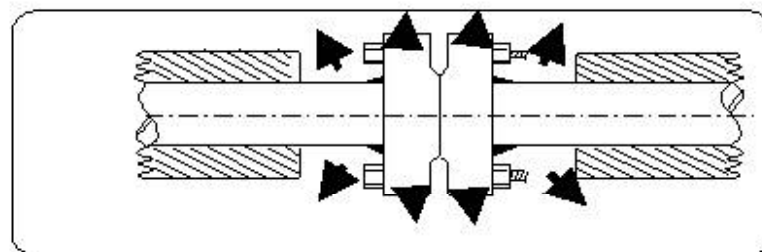
**73 W/m (изолована цев)**

# Губитак топлоте са неизолованих вентила и прирубница

Опрема	Еквивалентна дужина
10 К лоптасти вентил	1.1-1.3m
10 К прирубница	0.3 - 0.4m



10К лоптасти вентил



10 К прирубница



# Резервоар кондензата

Довод

Најчешће се овде  
уводи кондензат у  
суд (ово није добро)

Треба довести уводну  
цев што ближе дну  
резервоара

Резервоар  
кондензата

5C вишу температуру напојне воде  
добивамо ако овде уводимо  
кондензат

Пумпа

Ка котлу

5C воду више температуре  
можемо увести у котло

