

A decorative graphic consisting of a vertical line and a horizontal line intersecting at the center of the slide.

ОСНОВЕ ПАРНИХ КОТЛОВА

3. предавање

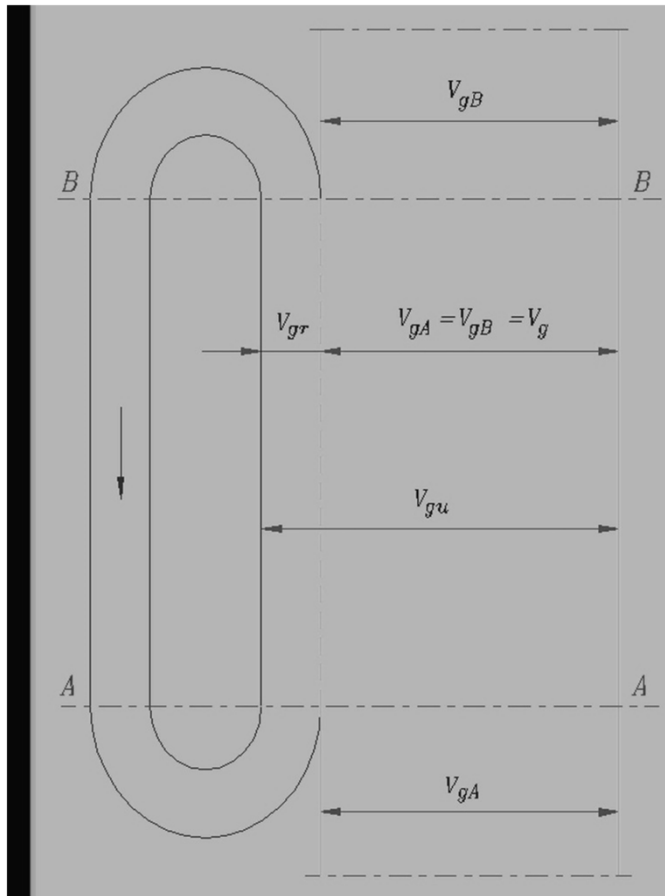
Теме предавања:

- Рециркулација димних гасова.
- Горива – општа подела и карактеристике појединих врста.
- Токсичне компоненте продуката сагоревања – настајање и методе за смањење њихове емисије.

Рециркулација продуката сагоревања

- Под рециркулацијом се подразумева одузимање продуката сагоревања из гасног тракта котла и њихово враћање у гасни тракт на место које се налази испред места одузимања по току гасова, то јест, на место гасног тракта са температуром гасова нижом од температуре рециркулисаних гасова.
- Рециркулација се најчешће врши у циљу
 - сушења влажних угљева при сагоревању у лету, када се одузимају димни гасови високе температуре са врха ложишта
 - рециркулација хладних гасова са краја котла ради регулисања температуре у млину и инертизовања аеросмеше.
- Посматрано са термодинамичке тачке гледишта, рециркулација је неповољна, јер снижава ексергетски ниво продуката сагоревања на месту увођења, тако да је, у могућој мери, треба избегавати.
- Рециркулацијом се мењају струјни и температурски услови између места увођења и места одузимања продуката сагоревања.

Рециркулација продуката сагоревања



Случај рециркулације са краја ложишта (B - B) и враћања на улаз у ложиште (A - A) - ток запремина димних гасова

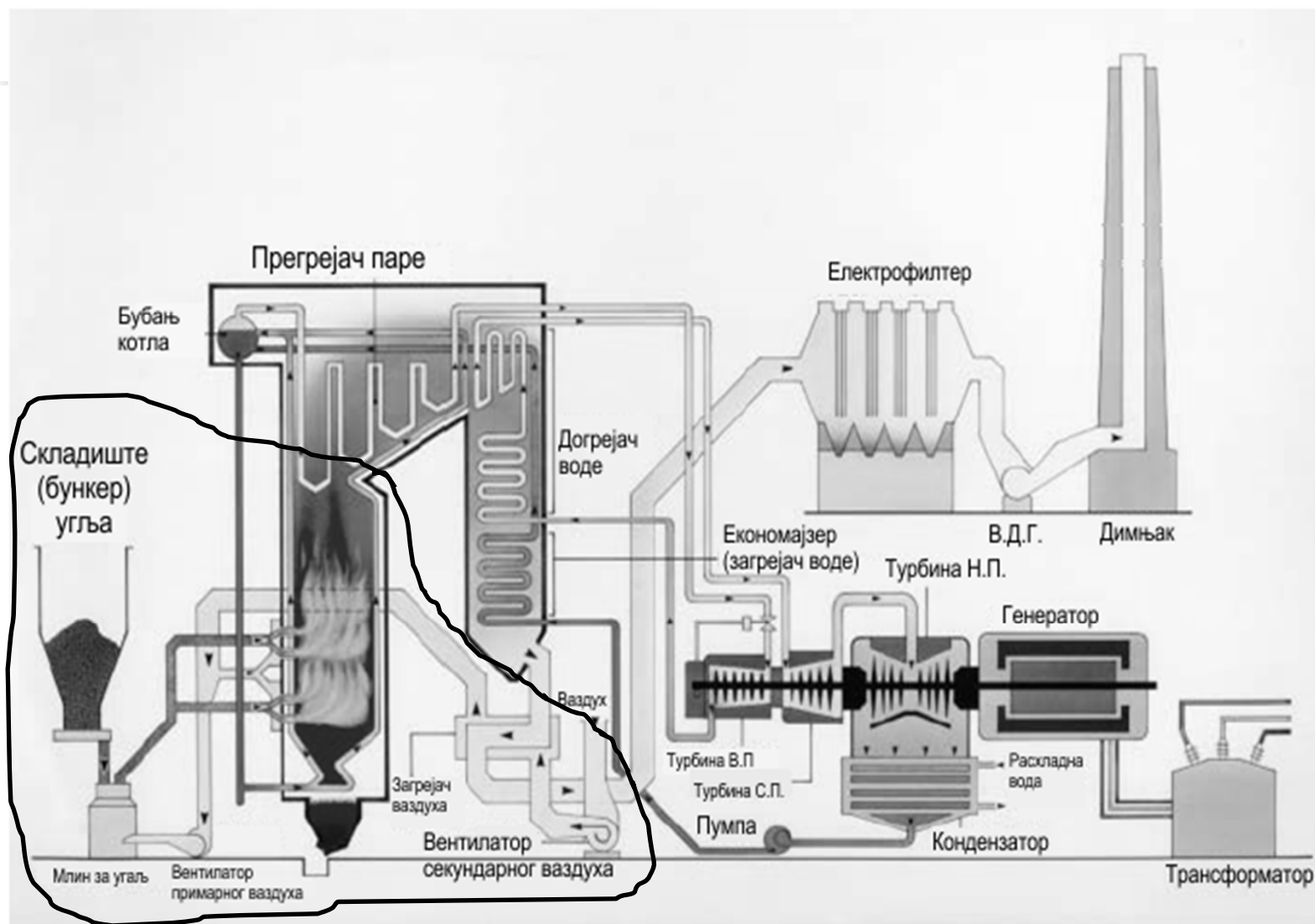
Степен рециркулације - Однос запремине рециркулисаних гасова и запремине гасова иза места одузимања назива се.

$$r = \frac{V_{gr}}{V_{gB}}$$

Запремина продуката сагоревања на произвољном месту између места увођења и места одузимања рециркулисаних гасова је

$$V_{gu} = V_{gA} + V_{gr} \quad \left[\text{m}^3 / \text{kg} \right]$$

Термoeлектрана



Рециркулација продуката сагоревања

- При нормалним условима

$$V_{gA} = V_{gB} = V_g$$

- па је укупна запремина продуката сагоревања

$$V_{gu} = (1 + r) V_g \quad [\text{m}^3/\text{kg}]$$

- Температура продуката сагоревања на месту увођења рециркулисаних гасова је

$$t_{guA} = \frac{I_{guA}}{(V \cdot c)_{guA}} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

- I_{guA} [kJ/kg] - енталпија продуката сагоревања на месту увођења гасова после мешања
- $(V \cdot c_{guA})$ [kJ/kgK] - топлотни капацитет продуката сагоревања на месту увођења рециркулисаних гасова после мешања

Рециркулација продуката сагоревања

- Енталпија продуката сагоревања на месту увођења рециркулисаних гасова после мешања је

$$I_{\text{guA}} = I_{\text{gA}} + rI_{\text{gB}} \quad [\text{kJ/kg}]$$

I_{gA} [kJ/kg] - енталпија продуката сагоревања горива на месту увођења рециркулисаних гасова пре мешања

I_{gB} [kJ/kg] - енталпија рециркулисаних димних гасова

- Топлотни капацитет продуката сагоревања на месту увођења рециркулисаних гасова после мешања је

$$(V \cdot c)_{\text{guA}} = (V \cdot c)_{\text{gA}} + r(V \cdot c)_{\text{gB}} \quad [\text{kJ/kgK}]$$

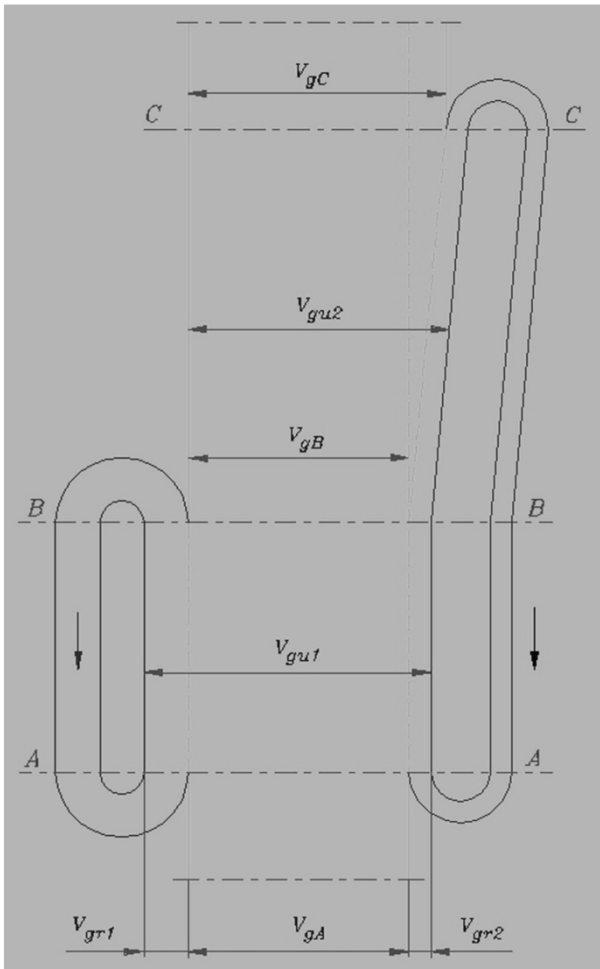
$(Vc)_{\text{gA}}$ [kJ/kgK] - топлотни капацитет продуката сагоревања горива на месту увођења рециркулисаних гасова пре мешања

$(Vc)_{\text{gB}}$ [kJ/kgK] - топлотни капацитет рециркулисаних димних гасова

- Температура продуката сагоревања на месту одузимања гасова може да се одреди помоћу енталпије и топлотног капацитета пре или после одузимања гасова

$$t_{\text{B}} = \frac{I_{\text{guB}}}{(V \cdot c)_{\text{guB}}} = \frac{(1+r)I_{\text{gB}}}{(1+r)(V \cdot c)_{\text{gB}}} = \frac{I_{\text{gB}}}{(V \cdot c)_{\text{gB}}} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Рециркулација продуката сагоревања



Поред рециркулисања гасова са краја ложишта, рециркулишу се и хладни димни гасови са краја котла. У том случају постоје **два степена рециркулације**

$$r_1 = \frac{V_{gr1}}{V_{gB}} ; r_2 = \frac{V_{gr2}}{V_{gC}}$$

Укупна запремина продуката сагоревања између места одузимања врелих гасова ($B - B$) и места одузимања хладних гасова ($C - C$) се мења због присисавања хладног ваздуха из околине.

У случају двоструке рециркулације најбоље је да се изради $I - t$ дијаграм за гасове са хладном рециркулацијом, тако што ће се енталпије продуката сагоревања горива множити **степеном рециркулације хладних гасова** после чега се случај своди на једноструку рециркулацију

$$I_{gu2} = r_2 I_g$$



Горива

Врсте горива

Према агрегатном стању	Према степену прераде	
	Природна	Прерађена
Чврсто	Дрво, тресет, угаљ, гориви шкриљци	Дрвени угаљ, брикети, пелети, полукокс, кокс
Течно	Нафта	Бензин, петролеј, дизел, уља за ложење
Гасовито	Природни земни гас	Рафинеријски, дестилациони, генераторски, биогас

Чврста горива

- Природна чврста горива се према генетском пореклу и старости деле на:

- дрво
- тресет
- лигнит
- мрки угаљ
- камени угаљ
- полуантрацит
- антрацит
- уљни шкриљци.

Лигнит

- Домаћи угљеви
 - лигнити, мрко-лигнитски, мрки и камени
- Лигнит
 - најмлађи домаћи угаљ
 - велики садржај влаге
 - мали садржај угљеника
 - велики садржај волатила
 - по структури
 - дрвенасти (ксилитни)
 - аморфно - земљасти (барски)

Лигнит

- Садржај воде
 - изнад 40 % (до 50 %)
- Садржај пепела
 - мали до умерени садржај пепела (до 20 %)
- Доња топлотна моћ
 - у границама 23.000 до 25.000 kJ/kg (сагорљива маса).
- Садржај волатила
 - од 50 до 60 % (сагорљива маса)
- Налазишта су обично на малим дубинама, тако да се добија у површинским откопима.
- Основно домаће гориво. Налазишта:
 - Косовски басен
 - Колубарски басен
 - Костолачки басен.
- У новије време је откривено налазиште лигнита у околини Ковина.

Волатили

- Состав: H_2 , C_mH_n , CO, S једињења (COS, H_2S), тер (катран)
- Млађи угљеви (геолошки) → већи садржај волатила
 - Дрво $V_g = 85 \%$
 - Лигнит $V_g = 50 - 60 \%$
 - Мрки угљеви $V_g = 35 - 50 \%$
 - Антрацит $V_g = 4 - 7 \%$
- Утицај на процес сагоревања горива
 - већи садржај волатила →
 - гориво се лакше пали
 - дугачак светао пламен
 - високореакциона горива
 - мали садржај волатила →
 - пале се знатно теже
 - кратак пламен
 - спорије сагоревају
 - ниско-реакциона горива

Мрки угљеви

- Мрко - лигнитски угаљ
 - садржај воде 30 до 40 %
 - доња топлотна моћ: 25.000 – 26.000 kJ/kg (сагорљива маса)
- Мрки угаљ
 - чврста структура
 - дробљив је и непостојан на ваздуху
 - садржај воде од 10 - 30 %
 - доња топлотна моћ: 26.000 до 30.000 kJ/kg (сагорљива маса)
 - садржај волатила је у границама 40 - 50 %
 - главна налазишта мрког угља у нашој земљи су (резерве неупоредиво мање од лигнита):
 - Сењско-ресавски басен
 - околина Алексинца и Зајечара.

Камени угљеви

■ Камени угаљ

- потиче из старијих геолошких формација
- зрнасте је структуре
- садржај влаге је испод 10 %.
- доња топлотна моћ преко 30.000 kJ/kg (сагорљива маса)
- садржај волатила креће се у границама 10 - 50 %
- каменог угља у нашој земљи:
 - Ибарски басен
 - Источна Србија.
- домаћи камени угаљ има повећан садржај сумпора и пепела, о чему треба водити рачуна при његовом коришћењу у парним котловима.

Карактеристике угља

- Сортиман угља СРПС Б.Х0.001.
- Густина угља
 - Стварна
 - маса јединице запремине компактног горива, износи око 1440 kg/m^3
 - Насипна
 - маса јединице запремине горива, при чему су у запремину урачунати и међупростори између комада угља
 - зависи од влажности, гранулометријског састава и степена сабијености угља
- Механичка чврстоћа угља
 - нарочито важна при сагоревању угља у лету (у спрашеном стању)
 - зависи од врсте горива, количине и квалитета минералних материја, геолошког састава и структуре горива

Биомаса

- Биомаса

- дрво
- дрвни отпаци
- отпаци пољопривредних производа

- значајан енергетски извор у домаћим условима
- обновљив извор примарне енергије (карактеристика јој је да у највећој количини доспева у јесен, када потрошња електричне и топлотне енергије почиње да расте)
- топлотна моћи биомасе → одговара домаћим мрким и мрко-лигнитским угљевима
сличан састав сагорљиве масе
веома мала густина
- пелети и брикети → повећање густине
олакшан транспорт и складиштење

Пелети и брикети

- Основна предност при производњи пелета или брикета је добијање горива хомогеног састава, густине и квалитета. Предности коришћења пелета, односно брикета, као горива су:
 - обновљив вид енергије,
 - могућност аутоматске регулације процеса сагоревања,
 - већа ефикасност при сагоревању,
 - мања емисија загађујућих компоненти (CO , NO_x),
 - повољна цена и
 - погодни за паковање, транспорт и руковање.

Пелети од пиљевине



Брикети од пиљевине



Врсте горива

Према агрегатном стању	Према степену прераде	
	Природна	Прерађена
Чврсто	Дрво, тресет, угаљ, гориви шкриљци	Дрвени угаљ, брикети, пелети, полукокс, кокс
Течно	Нафта	Бензин, петролеј, дизел, уља за ложење
Гасовито	Природни земни гас	Рафинеријски, дестилациони, генераторски, биогас

Течно гориво

- Нафта → разне врсте C_mH_n
настала је распадањем биљних и животињских материја у ранијим епохама геолошки старија од угља
- Течна горива - предности у односу на чврсто
→ већа топлотна моћ
лакша експлоатација, транспорт и складиштење
лакше регулисање и аутоматизација котла
користи се као основно или додатно гориво у парним котловима
- Резерве нафте у нашој земљи налазе се у Војводини, а нова налазишта откривена су и на неким другим местима (Источна Србија). Међутим, експлоатација нафте из ових налазишта није ни близу потрошње течног горива, тако да смо принуђени на увоз.
- Састав течног горива има исте елементе (угљеник, водоник, кисеоник, азот, сагорљиви сумпор, пепео и влага) и изражава се на исти начин (у процентима по маси) као и код чврстог горива, с тим што течно гориво има занемарљиво мали садржај пепела и незнатан садржај влаге.

Врсте течних горива

- Врсте течних горива
 - екстра лако уље за ложење
 - лако уље за ложење
 - средње уље за ложење
 - тешко уље за ложење
- За ложење у котловима као основно или додатно гориво најчешће се користи тешко уље, познатије под називом мазут.

Карактеристике мазута

■ Мазут

- велики садржај угљеника (86 - 88 %) и мали садржај водоника (10 %),
- мали садржај влаге,
- велика доња топлотна моћ (39.000 до 41.000 kJ/kg),
- мањи или већи садржај сумпора и парафина, који представљају његове штетне компоненте,
- сумпор проузрокује нискотемпературску корозију метала грејних површина котла,
- парафин повишава температуру стињавања, отежавајући на тај начин манипулацију са мазутом (транспорт и распршивање),
- у пепелу течних горива се често налазе ванадијум и натријум, чији су оксиди узрочници високотемпературске корозије,
- вискозност течних горива дефинише њихову течљивост односно потребу за загревањем пре транспорта и распршивања у горионцима.

Карактеристике течних горива

- Густина је веома значајно својство течних горива и она је при температури од 20 °C готово увек мања од густине воде. При загревању течних горива она се смањује због запреминског ширења

$$\rho_t = \frac{\rho_{20}}{1 + \beta(t - 20)} \quad [\text{kg/m}^3]$$

- ρ_{20} [kg/m³] – густина течног горива при температури од 20 °C
- β [1/°C] – коефицијент запреминског ширења на температури од 20 °C
- Температура стињавања је температура горива на којој течном гориву губи својство течења. Зависно од врсте горива, креће се од +40 °C до -36 °C.
- Температура или тачка паљења је температура горива на којој се смеша пара горива и ваздуха пали и тренутно сагори при приношењу спољашњег извора топлоте. Креће се у границама од 60 °C до 125 °C.
- Температура самопаљења је температура горива на којој се смеша течног горива и ваздуха пали сама од себе и креће се у границама од 500 - 600 °C.

Врсте горива

Према агрегатном стању	Према степену прераде	
	Природна	Прерађена
Чврсто	Дрво, тресет, угаљ, гориви шкриљци	Дрвени угаљ, брикети, пелети, полукокс, кокс
Течно	Нафта	Бензин, петролеј, дизел, уља за ложење
Гасовито	Природни земни гас	Рафинеријски, дестилациони, генераторски, биогас

Гасовито гориво

- Гасовито гориво → мешавина сагорљивих и несагорљивих гасова (CO_2 , N_2), састав се изражава у процентима по запремини
- Основно гасовито гориво које сагорева у парним котловима је природни или земни гас, који се може поделити на две групе:
 - гас из чистих налазишта - налазишта су она у којима се налази само гас
 - нафтни гас - добија се заједно са нафтом у којој је растворен у износу 10 - 15 % по маси нафте
- Природни гасови
 - метан (и до 98 %v/v)
 - виши угљоводоници (етан, пропан, бутан, пентан)
 - несагорљиви гасови (N_2 и CO_2) који представљају баласт гасовитог горива
 - доња топлотна моћ природног гаса креће се у границама 33.000 до 37.000 kJ/m^3
- Природног гаса у нашој земљи има у Војводини, али у скромним количинама.

Гасовито гориво

- Поред природног, у парним котловима се користе и вештачки гасови>
 - гас високих пећи
 - коксни гас
 - генераторски гас...
- Гас високих пећи
 - мала топлотна моћ - у границама $4.000 - 4.800 \text{ kJ/m}^3$ (последица великог садржаја несагорљивих гасова - $\text{N}_2 = 51-58 \%$ и $\text{CO}_2 = 10-12 \%$)
 - основни сагорљиви састојци су му угљен-моноксид ($\text{CO} = 27-28 \%$), водоник ($\text{H}_2 = 2-8 \%$) и метан ($\text{CH}_4 = 0,3-1,6 \%$)
- Коксни гас се добија приликом производње кокса
 - топлотна моћ се креће у границама $16.300 - 17.600 \text{ kJ/m}^3$
 - основне сагорљиве компоненте су H_2 (око 57%), CH_4 (око 22%) и CO (око 7%)

Гасовито гориво

- Генераторски гас се производи у гасогенераторима и ређе се примењује у котловима:
 - мала топлотна моћ од 5000 - 6300 kJ/m³
 - сагорљиве компоненте су CO (24 - 30 %), H₂ (13 - 15 %), CH₄ и H₂S (0,1 - 1 %).
- Код гасовитих горива је веома важно одредити концентрације гасова у ваздуху при којима је омогућено њихово сагоревање.
- Смеша гаса и ваздуха може да се запали само ако је концентрација гаса већа од оне која одговара доњој и мања од оне која одговара горњој граници запаљивости (паљења).
Уколико је концентрација гаса изван ових граница, сагоревање се не може остварити.

Гасовито гориво

- Топлотна моћ гасовитих горива одређује се у Јункерсовом калориметру, а може се и израчунати сабирањем топлотних моћи појединих сагорљивих компонената

$$H_d = \frac{1}{100} \left(H_{dCH_4} CH_4 + \dots \right) \quad [kJ/m^3]$$

Условно гориво

- При термичком прорачуну парних котлова треба користити вредности топлотних моћи одређене у лабораторији.
- У домаћој пракси се у термичким прорачунима користи доња топлотна моћ, јер се у парним котловима не користи топлота испаравања воде у излазним гасовима.
- Да би различита горива могла да се пореде по вредности и енергетској ефикасности уведен је појам условног горива. Као условно, усвојено је гориво чија је доња топлотна моћ 29.300 kJ/kg. Прерачунавање било ког горива на условно врши се према односу

$$B_{\text{ug}} = B \frac{H_{\text{d}}}{H_{\text{dug}}} = \frac{BH_{\text{d}}}{29300} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

- Поред условног горива, у употреби је и појам условне нафте. Топлотна моћ еквивалентне нафте износи 41.800 kJ/kg.

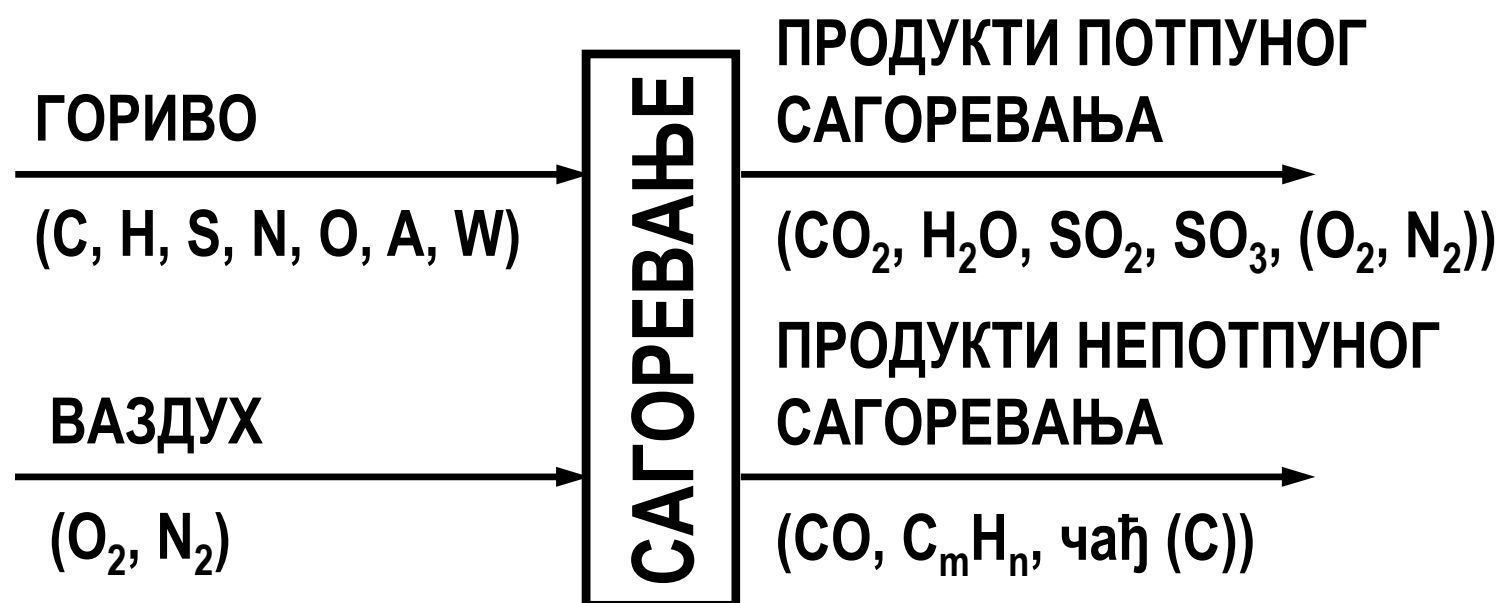


Токсичне компоненте

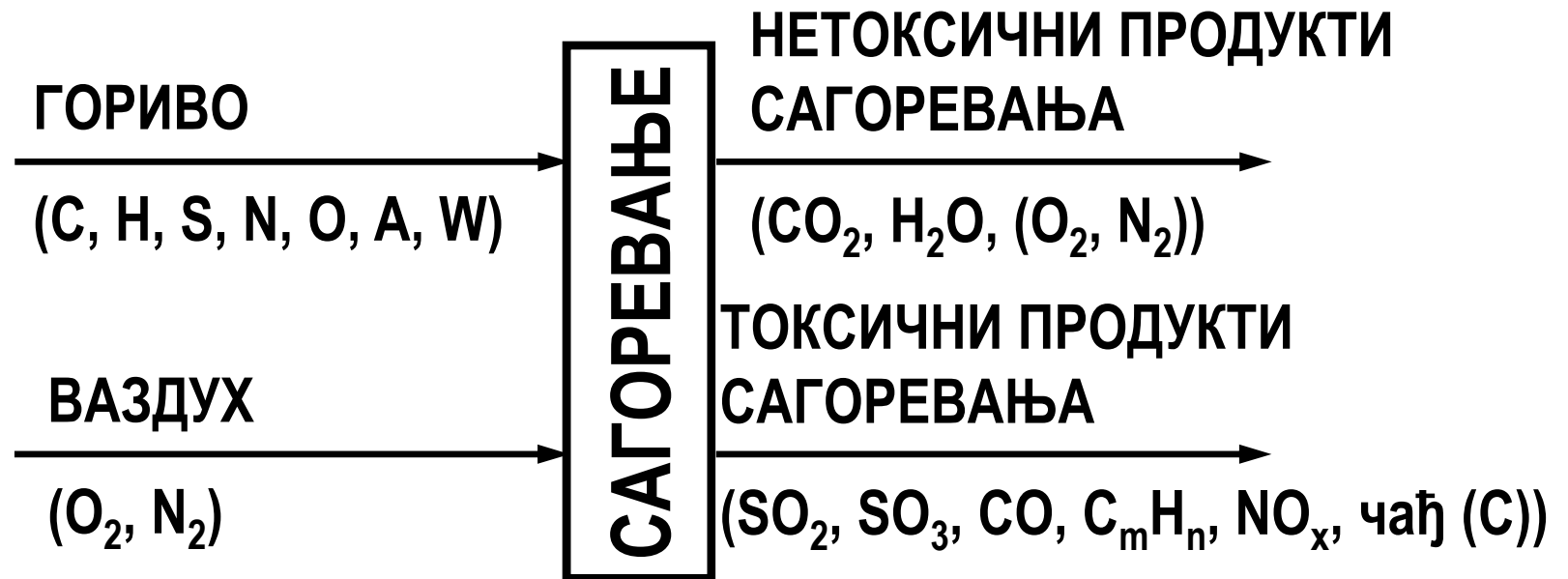
Класификација продуката сагоревања

- према критеријуму потпуног/непотпуног сагоревања
- према критеријуму токсичности
- према агрегатном стању (гасовити, течни, чврсти)
- према времену настајања (примарни и секундарни)
- према извору загађења (стационарни и нестационарни)
- према врсти горива (чврста, течна и гасовита)

Продукти сагоревања – класификација по критеријуму потпуности сагоревања



Продукти сагоревања – класификација по критеријуму ТОКСИЧНОСТИ



Најважније загађујуће материје

- угљен моноксид
- несагорели угљоводоници или делимично сагорели угљоводоници, као што су алдехиди
- сумпорни оксиди
 - SO_2
 - SO_3

Најважније загађујуће материје

- азотни оксиди (NO_x)
 - NO
 - NO_2
- чврсте честице
 - чађ
 - шљака
 - летећи пепео
 - тешки метали
- гасови стаклене баште – посебно CO_2 и N_2O

Угљен моноксид и несагорели угљоводоници

- недовољна количина ваздуха
 - недовољно висока температура сагоревања
 - недовољно време
 - лоше мешање горива и ваздуха
-
- CO – токсичан, спречава везивање кисеоника са хемоглобином
 - C_mH_n – токсични, а неки су и канцерогени

Азотни оксиди

- настају од азота у ваздуху
- настају од азота у гориву
- најважнији су NO и NO_2 – NO_x
- NO_3 , N_2O_3 , N_2O_4 , N_2O_5 – у малим концентрацијама, утицај занемарљив
- азот субоксид (N_2O) – потпуно другачији утицај и посебно се проучава
 - утичу на појаву киселих киша и фото хемијског смога, образовање озона и оштећење озонског омотача

Азотни оксиди

- три начина настанка

- термички

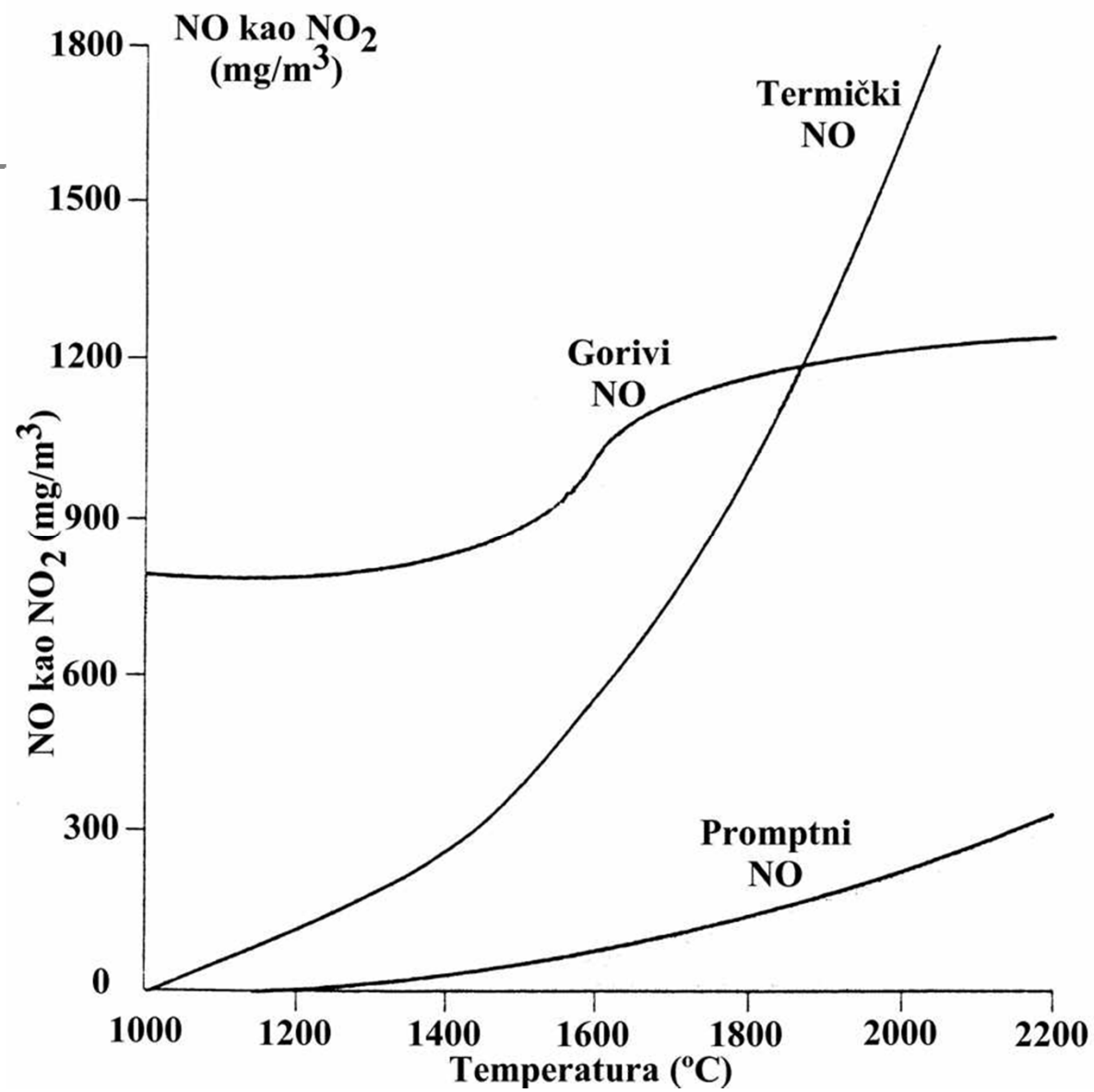
- промтни

- гориви

- термички NO: 5-25% - за угаљ, 50-60% - за друге врсте горива

- промтни (брзи) NO – мање од 5% код угља

- гориви NO: 70-80%



Сумпорни оксиди

- настају од сумпора у гориву
- SO_2 и SO_3 – стабилни продукти сагоревања
- SO и S_2O – нестабилни продукти сагоревања, утичу на образовање SO_2
- SO_3 – само неколико процената од количине образованог сумпор диоксида

Сумпорни оксиди

■ технички проблем

- утичу на стварање корозије, реагују са воденом паром из продуката сагоревања и настају H_2SO_3 и H_2SO_4

■ еколошки проблем

- појава киселих киша
- смањење видљивости
- делују штетно на дисајне органе, чак и у малим концентрацијама
- ометају процес фотосинтезе код биљака

Чврсте честице

- чађ (несагорели угљеник)
- шљака (до 30%, велики термички губици)
- летећи пепео (велики извор механичког загађења)
- тешки метали

- врста горива (садржај минералних примеса, присуство адитива)
- квалитет процеса сагоревања (непотпуно сагоревање)
- врста постројења (нерегуларан рад постројења)

Гасови стаклене баште

- гасови који омогућавају сунчевој светлости да продре до земљине површине уз делимично спречавање инфрацрвеног зрачења планете у атмосферу
 - угљен диоксид (CO_2)
 - метан (CH_4)
 - азот субоксид (N_2O)
 - флуоро угљоводоници (HFCs)
 - перфлуоро угљоводоници (PFCs)
 - сумпор хексафлуорид (SF_6)

Коефицијент емисије CO₂

KE_{CO2} (kg CO₂/GJ)

■ Камени угаљ	86,79
■ Мрки угаљ	93,84
■ Лигнит	94,50
■ Моторни бензин	73,40
■ Керозин	72,70
■ Дизел гориво	75,90
■ Уља за ложење	80,50
■ Природни земни гас	73,90

Начини смањења загађења ваздуха

- техничко-технолошке методе
- мере преоријентације на чистије или чисте изворе енергије

Техничко-технолошке методе

- методе пре процеса сагоревања – пречишћавање горива
- методе за време процеса сагоревања – примарни поступци (модификације у процесу сагоревања)
- методе после процеса сагоревања – секундарни поступци (пречишћавање димних гасова)

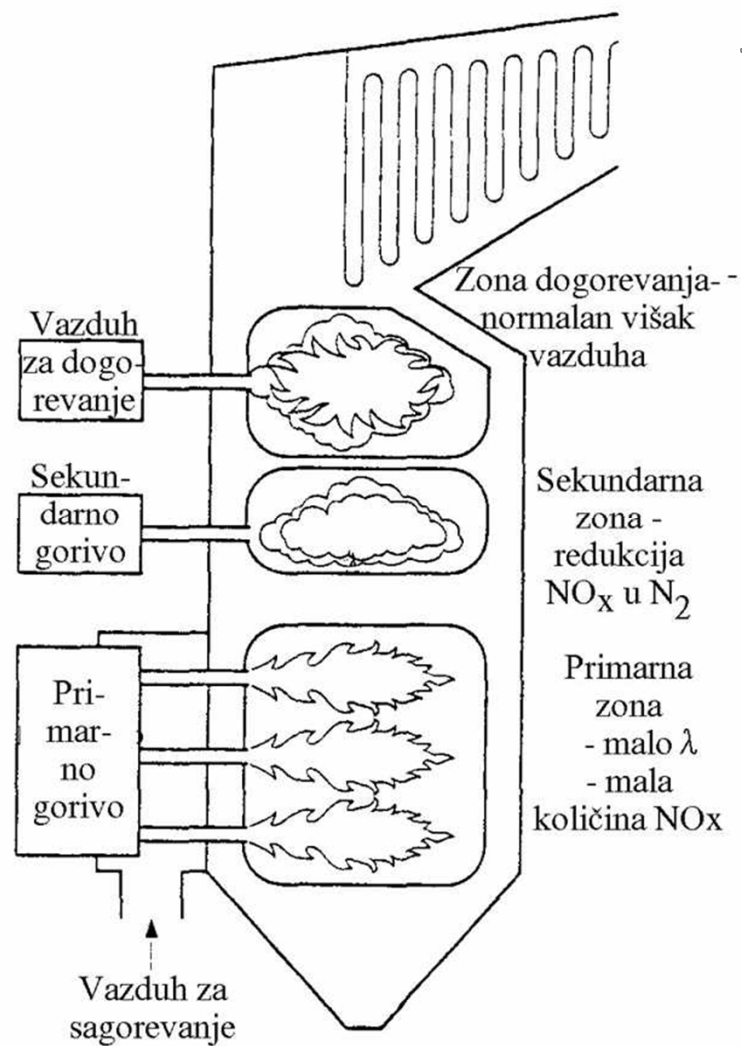
Угљен моноксид и несагорели угљоводоници

- регулисањем процеса сагоревања
- мали захвати код стационарних постројења

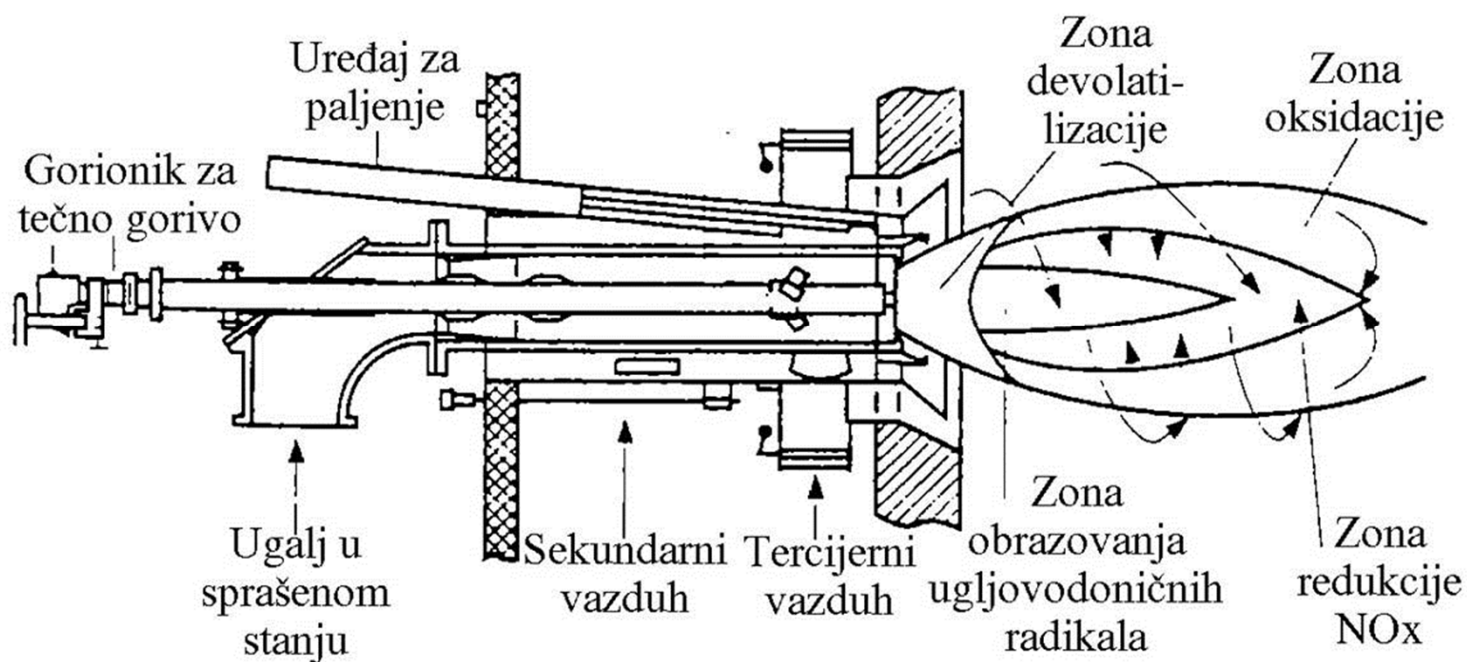
Азотни оксиди

- примарни поступци
 - оптимизација рада горионика
 - вишестепено довођење ваздуха у котао
 - рецикулација димних гасова
 - вишестепено довођење горива
 - горионици са ниском емисијом азотних оксида

Вишестепено сагоревање



Горионици са ниском емисијом азотних оксида



Комбиновани примарни поступци за смањење емисије NO_x

Поступак	Степен смањења емисије NO _x (%)
Горионици са ниском емисијом NO _x и вишестепено довођење ваздуха	35 - 70
Горионици са ниском емисијом NO _x и тростепено сагоревање	60 - 70
Тростепено сагоревање и рецикулација димних гасова	55 - 65

Азотни оксиди

- секундарни поступци

- поступци селективне каталитичке редукције (СКР)
- поступци селективне некаталитичке редукције (СНКР)
- комбиновани СНКР/СКР поступци
- комбиновани поступци за одстрањивање сумпорних и азотних оксида (SO_x - NO_x)

Сумпорни оксиди

■ Методе за пречишћавање горива

➤ Земни гас

- сумпор водоник (H_2S)
- Пречишћава се одмах после вађења из налазишта

➤ Нафта

- у току прераде у рафинеријама
- врло скупо
- налазишта нафте са ниским садржајем сумпора (0,3-0,5%) у Либији, Нигерији и Индонезији
- садржај сумпора зависи од врсте производа

➤ Угаљ

- начин одстрањивања зависи од облика у коме се сумпор налази – поступак прања, поступци превођења угља у гасовито или течно гориво, поступци пречишћавања помоћу бактерија
- за оцену квалитета gS/MJ
- резерве нискосумпорног угља у САД

Сумпорни оксиди

- примарни поступци

- сагоревање у флуидизованом слоју (додавање кречњака) – смањење емисије SO_x и до 90%

Сумпорни оксиди

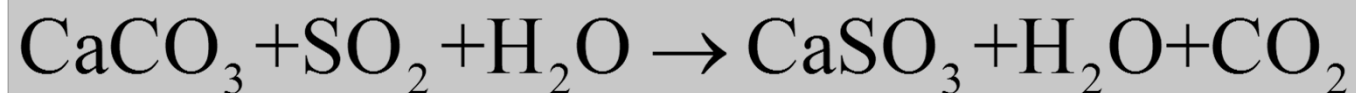
■ секундарни поступци

- развијено око 100 поступака
- погодни за горива са високим садржајем сумпора
- I критеријум – према добијеном производу (мокри и суви поступци)
- II критеријум – према могућности обновљивости сорбента (регенеративни и нерегенеративни поступци)

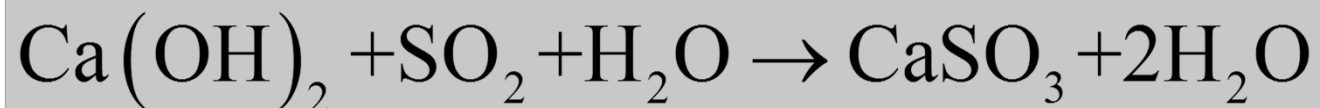
Сумпорни оксиди

■ Мокри поступци

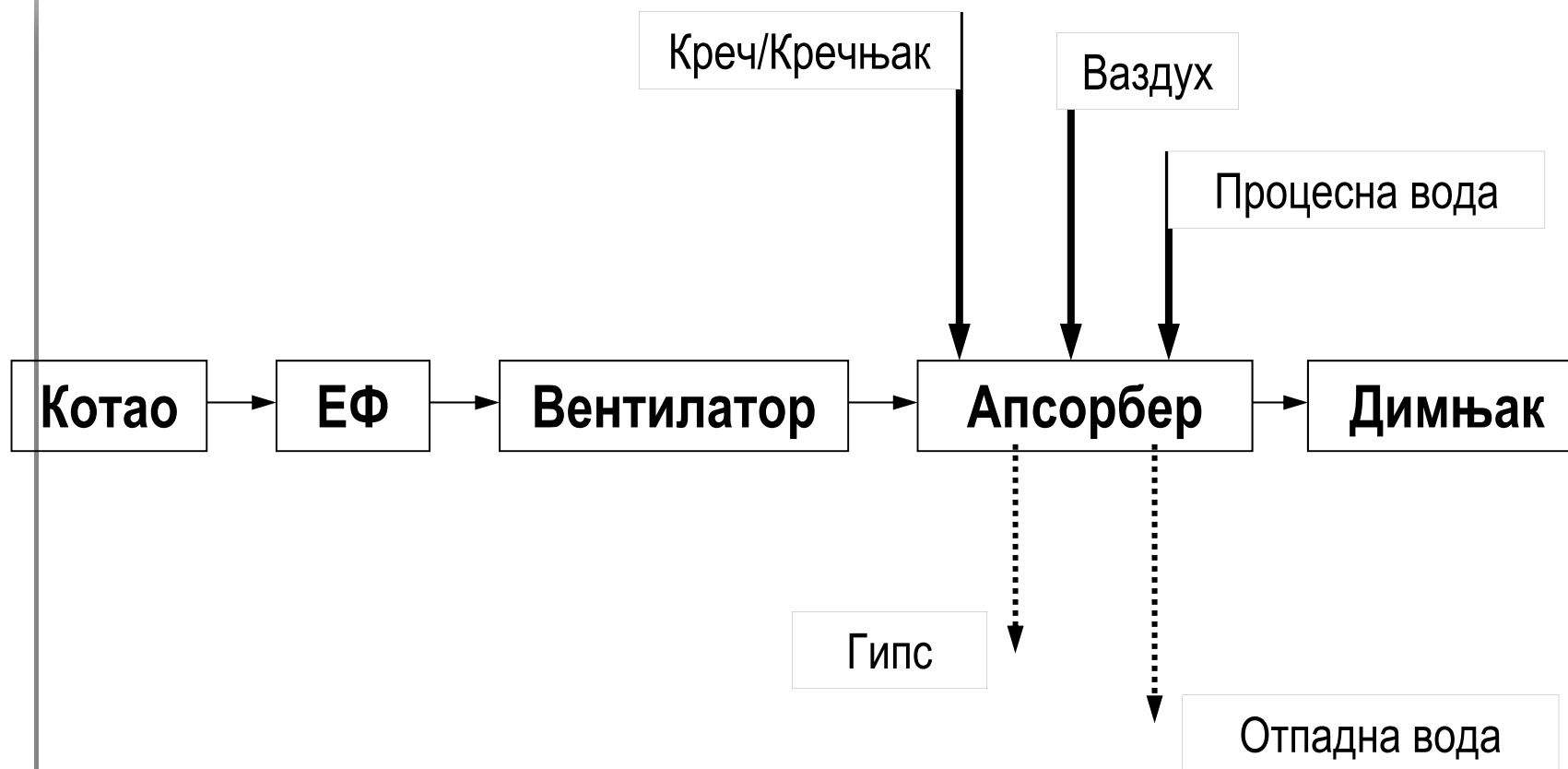
- Поступци на бази кречњака CaCO_3



- Поступци на бази креча Ca(OH)_2



Одсумпоравање димних гасова – мокри поступак



Чврсте честице

- чађ

- редовне контроле процеса сагоревања
- оптимирање појединих параметара процеса сагоревања

- летећи пепео

- издвајање у електростатичким филтерима, врећастим филтерима и циклонима

Гасови стаклене баште - CO₂

- перспективна горива

- биоетанол

- биометанол

- биодизел

- биомаса

- течни природни гас

- компримовани природни гас

- водоник

Гасови стаклене баште - CO₂

- стратегија смањења емисије
 - енергетски сектор
 - обнова постројења
 - замена горива
 - обновљиви извори енергије
 - повећање енергетске ефикасности
 - смањење губитака у преносу

Гасови стаклене баште - CO₂

- стратегија смањења емисије

- индустрија

- енергетска ефикасност, посебно у индустрији челика и цемента

- домаћинства

- повећање енергетске ефикасности уређаја за домаћинство

Анализатори димних гасова

- Хемијски анализатори – принцип мерења заснива се на селективном упијању појединих компонената димних гасова разним хемијским апсорбентима.
- Физички анализатори – принцип мерења заснива се на коришћењу одређеног физичког ефекта или физичке особине материје.