



Гориви технички гасови у процесима сагоревања

проф. др Драгослава Стојиљковић

др Владимир Јовановић, доцент

др Небојша Манић, доцент



Основне информације

■ Бодови

– 1 тест	40
– 1 колоквијум	10
– 1 задатак	5
– похађање наставе	5

■ Термини

– T1	према договору у јануару 2019.
– поправни T1	према договору



Основне информације

- Услов за полагање усменог испита је **20 поена** стечених за извршавање предиспитних обавеза без посебних услова у погледу начина стицања поена (за коју од предиспитних обавеза).
- Усмени испит вреди **40 поена** и коначна оцена се утврђује на основу броја поена стечених за извршавање предиспитних обавеза и броја поена стечених на усменом испиту.



Основне информације

- Информације
 - <http://nastava.mas.bg.ac.rs/nastava/viewforum.php?f=22>
- Консултације
 - четвртак 12-13 h каб./лаб. 147/151
- Литература
 - Радовановић М.: Горива
 - Аџић М., Рац А., Меметовић С.: Приручник за лабораторијске вежбе из Погонских материјала
 - М. Радовановић: Приручник за лабораторијске вежбе из сагоревања
 - **Помоћна литература** су ИЗВОДИ са предавања и вежби и они су доступни на званичном сајту Машинског факултета Универзитета у Београду, на адреси:
 - <http://nastava.mas.bg.ac.rs/nastava/viewforum.php?f=22>



Гориве материје

Појам горива

- Материје које сагоревањем (бурним сједињавањем са кисеоником), поред материјалних продуката процеса (продуката сагоревања), ослобађају одређену количину топлоте.





✓...

Захтеви – материја као гориво

- Да процесом сагоревања производи знатну количину топлоте у кратком временском периоду.
- Да се у природи налази у довољним количинама.
- Да је експлоатација релативно лака и економична.
- Да је производни процес технички остварљив и рентабилан.
- Да у себи не садржи велику количину негоривих материја.
- Да не мења битно свој састав при складиштењу, транспорту и руковању.
- ...



Врсте горива

Према агрегатном стању	Према степену прераде	
	Природна	Прерађена
Чврсто	Дрво, тресет, угаљ, гориви шкриљци, биомаса	Дрвени угаљ, брикети, пелети, полукокс, кокс
Течно	Нафта	Бензин, петролеј, гасна уља (дизел гориво и екстра лако уље за ложење), уља за ложење (средње и тешко)
Гасовито	Природни (земни) гас	Рафинеријски, дестилациони, генераторски, биогаз



Горива

Фосилна горива

Обновљива горива

Природна

Произведена

Природна

Произведена

Чврста

тресет

угаљ

гориви шкриљци

брикети

кокс

моторни бензин

дизел гориво

уља за ложење

петролеј

керозин

дестилациони гас

рафинеријски гас

течни нафтни гас

генераторски гас

Чврста

Течна

Гасовита

Чврста

дрвна биомаса

пољопривредна
биомаса

алге

Течна

Гасовита

дрвени угаљ

брикети

пелети

торификовани
пелети/брикети

биометанол

биоетанол

биодизел

биотечности

биогаз

водоник

Чврста

Течна

Гасовита

Течна

нафта

Гасовита

барски гас

јамски гас

природни гас



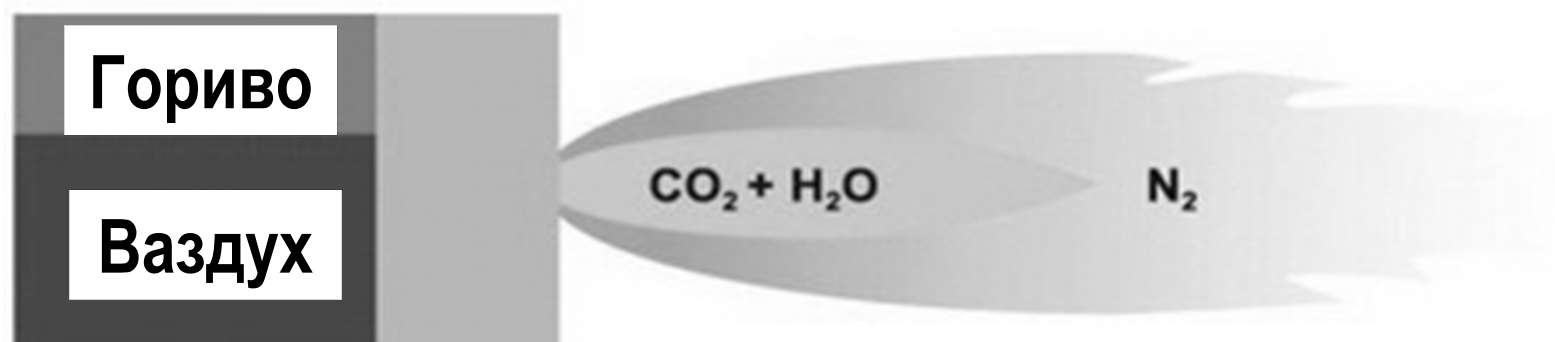
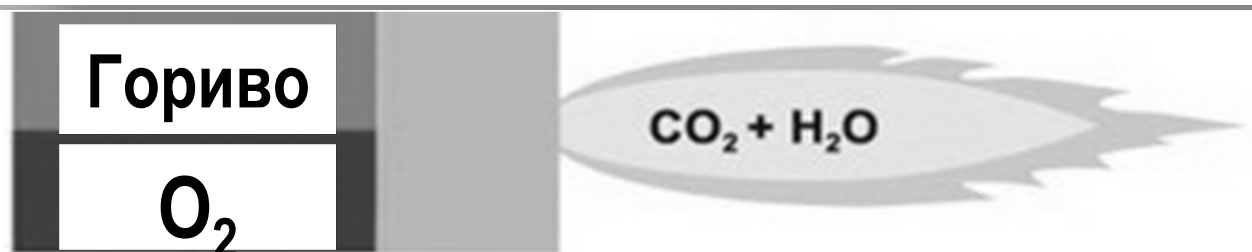


Технички гасови

O_2	Ацетилен - C_2H_2
N_2	Водоник - H_2
CO_2	Метилацетилен пропadiен - C_3H_4
NH_3	Пропан-бутан - C_3H_8 - C_4H_{10}
Ar	Пропилен - C_3H_6
He	Природни гас – углавном CH_4
N_2O	



Шта се збива у процесу сагоревања гасовитог горива?





Састав горива – елементарна анализа

- Гориви елементи:

- C, H, S

- Баласт:

- Унутрашњи: O, N

- Спољашњи: A, W



Угљеник

- Најважнија компонента горива – има га највише и његовим сагоревањем настаје највећи део количине топлоте коју гориво ослобађа.
- Налази се у слободном стању и везан (у сложеним органским једињењима, везан са водоником, кисеоником, азотом и сумпором).
- Сагоревањем 1 kg настаје количина топлоте од 33,829 MJ.
- Максимална температура сагоревања угљеника износи 2240 °C.



Водоник

- Друга компонента по важности.
- Везан - код чврстих, течних и гасовитих горива.
- Чист у мешавини са другим горивим компонентама (код гасовитих горива).
- Сагоревањем 1 kg настаје количина топлоте од 142,014 MJ (4,2 пута више у односу на угљеник).
- Максимална температура сагоревања водоника износи 2235 °C.



Сумпор

- Сагоревањем 1 kg настаје количина топлоте од 9,295 MJ, али је непожељан јер делује кородивно и утиче на загађење животне средине.



Сумпор

- Природни (земни) гас
 - сумпор водоник (H_2S)
 - пречишћавање одмах се 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 течено гориво, поступци пречишћавања помоћу бактерија
 - за оцену квалитета gS/MJ
 - резерве нискосумпорног угља у САД.



Кисеоник

- **Није гориви елемент, али помаже и омогућава сагоревање.**
- **Јавља се везан са другим елементима.**
- **У гасовитим горивима јавља се и у слободном стању (у мањим количинама).**
- **Смањује потребну количину кисеоника за сагоревање.**



Азот

- **Јавља се у виду сложених органских једињења.**
- У чврстим и течним горивима има га мало (0-2 %), а код гасовитих горива (нарочито произведених) може га бити далеко више.
- **У процесу сагоревања највећим делом се понаша као инертан, а један део се везује са кисеоником образујући азотне оксиде (NO_x).**



Топлотна моћ

- Количина топлоте која се ослобађа при потпуном сагоревању јединице количине (масе, запремине или материје) горива.



Топлотна моћ - подела

- Према условима сагоревања
 - $p = \text{const}$
 - $V = \text{const}$
- Према топлотном нивоу продуката сагоревања
 - Горња топлотна моћ H_g
 - Доња топлотна моћ H_d



Горња топлотна моћ

- Количина топлоте која се добија потпуним сагоревањем јединице количине горива под следећим условима:
 - Угљеник и сумпор из гориве материје су сагорели у своје диоксиде, док до сагоревања азота није дошло.
 - Продукти сагоревања су охлађени на температуру коју је гориво имало пре почетка сагоревања (20 °C)
 - Вода, која у продуктима сагоревања потиче од влаге из горива и сагорелог водоника, преведена је у течно стање.



Доња топлотна моћ

- Количина топлоте која се добија потпуним сагоревањем јединице масе горива под следећим условима:
 - Угљеник и сумпор из гориве материје су сагорели у своје диоксиде, док до сагоревања азота није дошло.
 - Продукти сагоревања су охлађени на температуру коју је гориво имало пре почетка сагоревања (20 °C).
 - Вода, која у продуктима сагоревања потиче од влаге из горива и сагорелог водоника, остаје у парном стању.



Веза између горње и доње топлотне моћи



$$H_g = H_d + 25 \cdot (9 \cdot H + W) \quad (\text{kJ/kg})$$

$$H_g = H_d + 2500 \cdot (9 \cdot g_H + g_w) \quad (\text{kJ/kg})$$

- Количина топлоте која се добија ако се вода, настала сагоревањем водоника и испаравњем влаге, преведе из парног у течно стање
- Топлота испаравања воде (кондензације водене паре) на атмосферском притиску је око 2500 kJ/kg.
- При сагоревању 1 kg водоника, добија се 9 kg воде.



Начини одређивања топлотне моћи горива



- Експериментално одређивање
 - Калориметар са бомбом
 - Јункерсов калориметар
- Рачунско одређивање



Рачунско одређивање топлотне моћи горива

- На бази елементарног састава
 - VDI обрасци

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

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



Рачунско одређивање топлотне моћи горива на основу познатог састава по горивим компонентама

$$H_g = 127,5 \cdot H_2 + 126,2 \cdot CO + 398,1 \cdot CH_4 + 632,4 \cdot C_2H_4 + \dots \quad (\text{MJ/m}^3)$$

$$H_d = 107,8 \cdot H_2 + 126,2 \cdot CO + 358,7 CH_4 + 594,8 \cdot C_2H_4 + \dots \quad (\text{MJ/m}^3)$$



Основи сагоревања

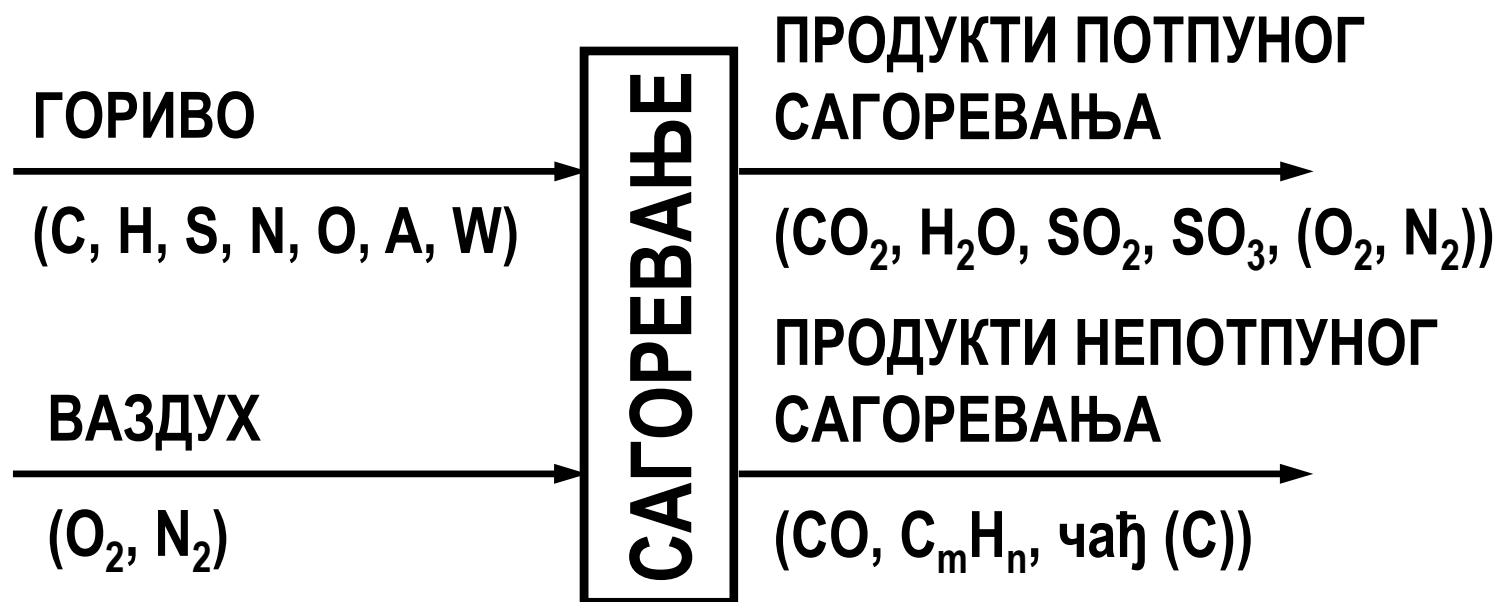


Сагоревање

- Сагоревање представља сложен физичко-хемијски процес оксидације горива праћен интензивним ослобађањем топлоте.
- Током процеса сагоревања добијају се продукти који се могу одредити помоћу једноставних хемијских једначина – стехиометријске једначине.

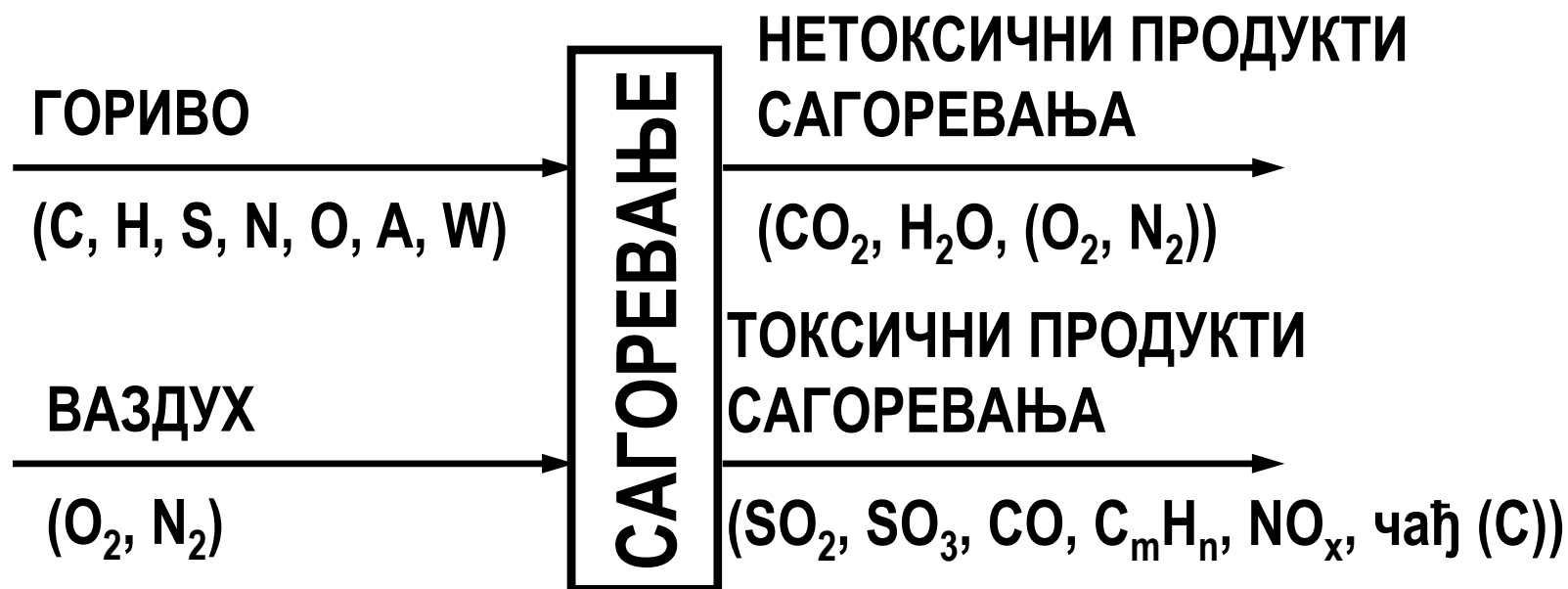


Продукти сагоревања – класификација по критеријуму потпуности сагоревања





Продукти сагоревања – класификација по критеријуму ТОКСИЧНОСТИ





Стехиометријске једначине дефинишу



- **међусобне односе** у којима се једине угљеник, водоник и сумпор са кисеоником,
- **количину ваздуха** која је потребна за потпуно сагоревање,
- **количину продукта сагоревања** која настаје у процесу,
- **количину топлоте** која се током процеса ослобађа.



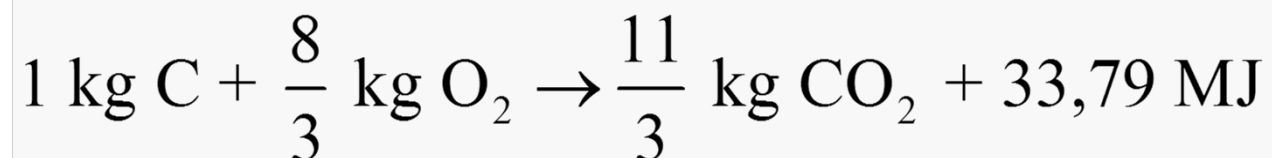
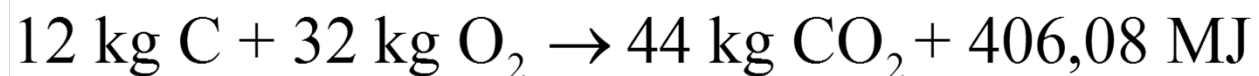
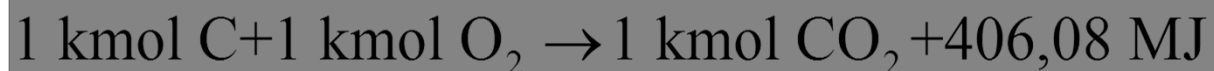
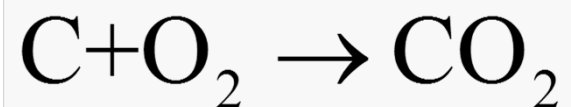
Шта мора да се зна?

■ атомске масе хемијских елемената који учествују у процесу сагоревања:

– угљеник	12 kg/kmol
– водоник	1 kg/kmol
– сумпор	32 kg/kmol
– кисеоник	16 kg/kmol
– азот	14 kg/kmol

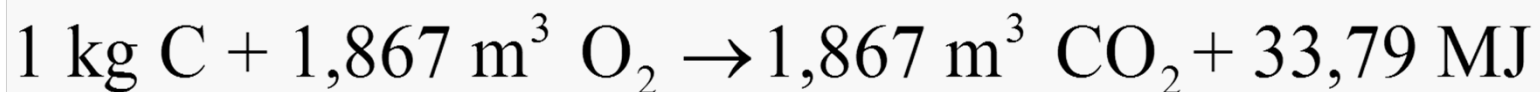
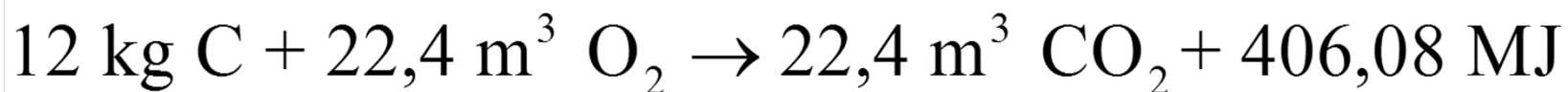
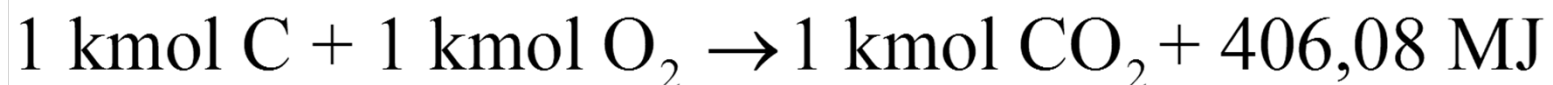
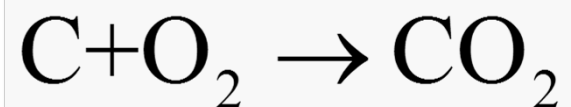


Стехиометријска једначина потпуног сагоревања угљеника



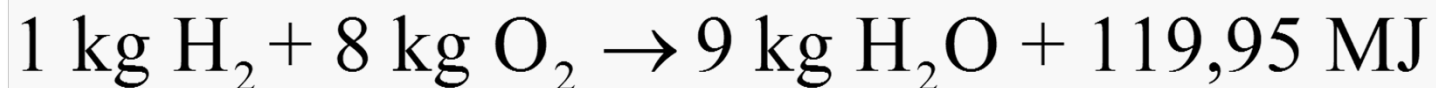
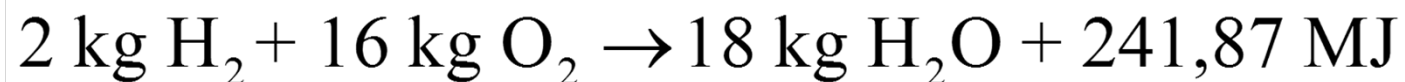
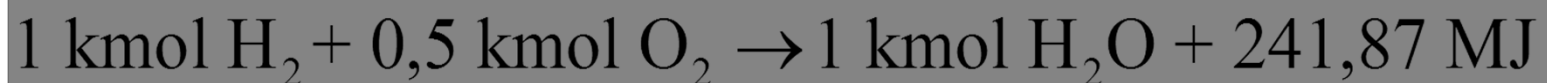
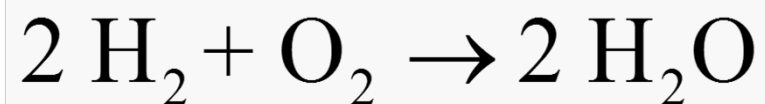


Стехиометријска једначина потпуног сагоревања угљеника ✓



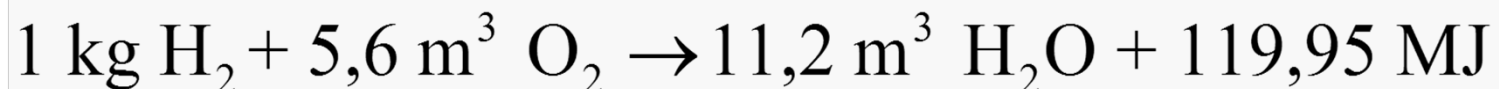
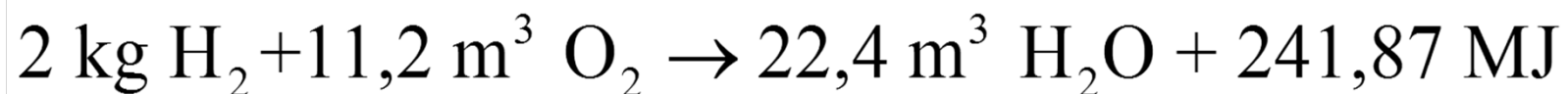
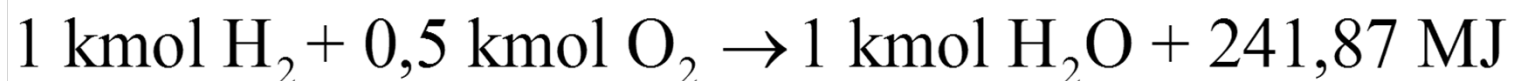
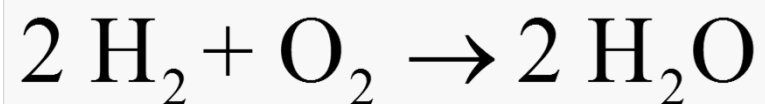


Стехиометријска једначина сагоревања водоника



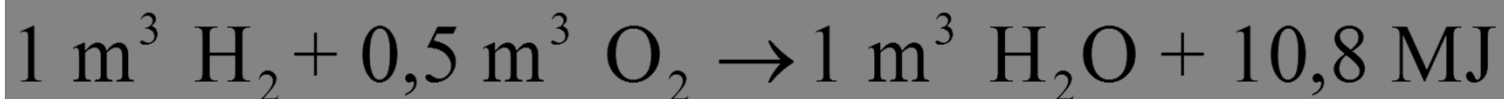
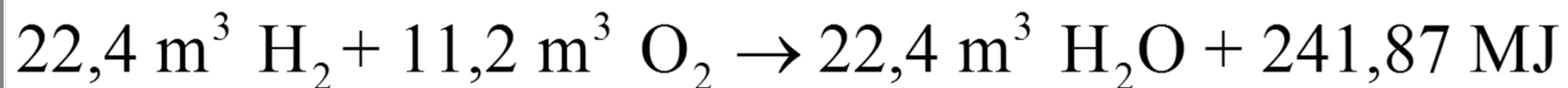
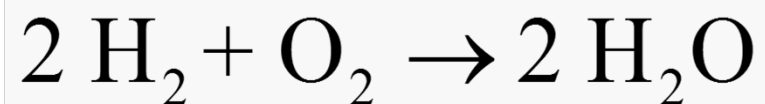


Стехиометријска једначина сагоревања водоника



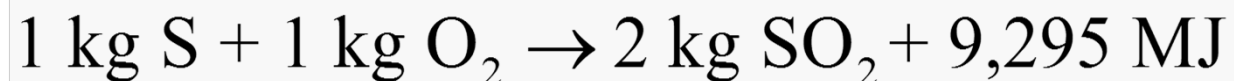
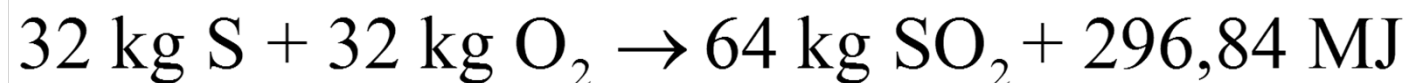
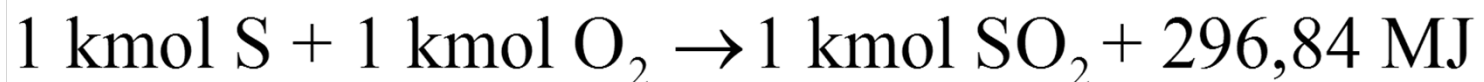
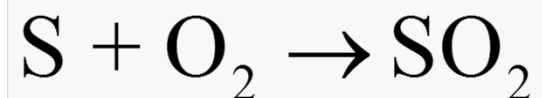


Стехиометријска једначина сагоревања водоника



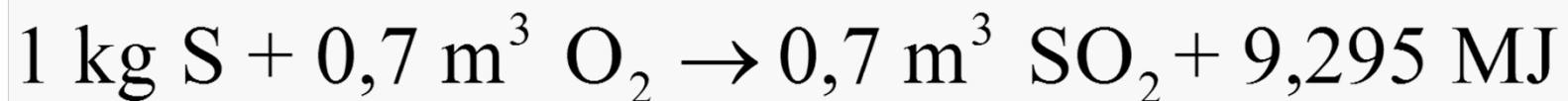
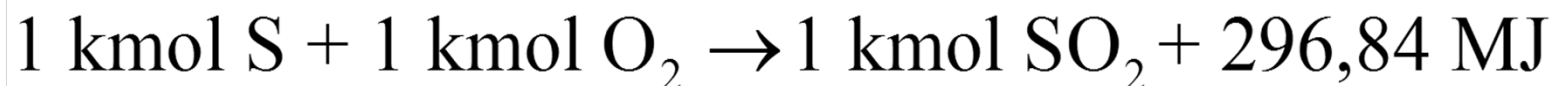
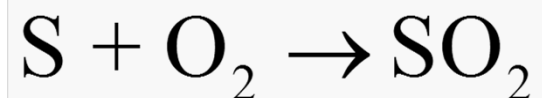


Стехиометријска једначина сагоревања сумпора





Стехиометријска једначина сагоревања сумпора





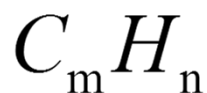
Теоријска количина кисеоника за потпуно сагоревање

$$O_{\min} \left(\text{m}^3 / \text{kg} \right) = (O_{\min})_{\text{C}} + (O_{\min})_{\text{H}} + (O_{\min})_{\text{S}}$$

$$O_{\min} \left(\text{m}^3 / \text{m}^3 \right) = (O_{\min})_{\text{C}} + (O_{\min})_{\text{H}} + (O_{\min})_{\text{S}}$$



Теоријска количина кисеоника за потпуно сагоревање фиктивног горива типа $C_m H_n$



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

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

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



$$O_{\min} \text{ (kmol/kmol)} = m + \frac{n}{4} - \frac{o}{2}$$

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

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



Одређивање теоријске количине ваздуха



$$L_{\min} (\text{kg/kg}) = \frac{O_{\min} (\text{kg/kg})}{0,23}$$

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

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



Стварна количина ваздуха и коефицијент вишка ваздуха



■ Стварна количина ваздуха

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

■ Коефицијент вишка ваздуха

- $\lambda > 1$ сиромашна смеша
- $\lambda < 1$ богата смеша



Количина продуката сагоревања

$$V_{\text{CO}_2} \left(\text{m}^3 / \text{kg} \right) = \frac{22,4m}{12m + n}$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} \left(\text{m}^3 / \text{kg} \right) = \frac{11,2n}{12m + n}$$



Гасовита
горива

$$V_{\text{CO}_2} \left(\text{m}^3 / \text{m}^3 \right) = r_{\text{CO}} + r_{\text{CO}_2} + \sum r_i \cdot m_i$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} \left(\text{m}^3 / \text{m}^3 \right) = r_{\text{H}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}} + \frac{1}{2} \sum r_i \cdot n_i$$



Количина продуката сагоревања

$$V_v \left(\text{m}^3 / \text{kg} \right) = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2}$$

$$V_s \left(\text{m}^3 / \text{kg} \right) = V_v - V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2}$$



Састав продуката сагоревања

$$X = \frac{V_X}{V_{ps}} \cdot 100 \quad (\% \text{ } v / v)$$

X – x-ти продукт сагоревања

ps – продукти сагоревања (влажни/суви)

Пример за угљен диоксид:

$$CO_{2v} = \frac{V_{CO_2}}{V_v} \cdot 100 \quad (\% \text{ } v / v) \quad CO_{2s} = \frac{V_{CO_2}}{V_s} \cdot 100 \quad (\% \text{ } v / v)$$



Одређивање коефицијента вишка ваздуха из састава продуката сагоревања ✓...

$$\lambda = \frac{21}{21 - O_2}$$

потпуно сагоревање

непотпуно сагоревање

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

Гориви технички гасови у процесима заваривања,
Школска 2019/20 година



Температура сагоревања

- **Температура** коју имају **гасовити продукти**, као **резултат загревања топлотом** која је настала сагоревањем горива.
- Пропорционална је тоplotној моћи горива.
- Обрнуто пропорционална запремини продукта сагоревања и њиховом тоplotном капацитету.



Калориметарска температура сагоревања ✓

- Температура сагоревања коју имају продукти сагоревања при потпуном сагоревању, при чему **не долази до топлотних губитака насталих дисоцијацијом** продуката сагоревања на повишеним температурама и услед размене топлоте са околином.

$$t_s = \frac{H_d + L \cdot h_v + h_G}{\sum V_i \cdot c_{pmi} \Big|_0^{t_s}}$$



Теоријска температура сагоревања



- Температура сагоревања коју имају продукти сагоревања при потпуном сагоревању, при чему **се узимају у обзир топлотни губици настали дисоцијацијом** продукта сагоревања на повишеним температурама , а **не узимају се у обзир губици услед размене топлоте са околином.**

$$t_s = \frac{H_d + L \cdot h_v + h_G - Q_d}{\sum V_i \cdot c_{pmi} \Big|_0^{t_s}}$$



Стварна температура сагоревања



- Температура 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.**

$$t_s = \frac{H_d + L \cdot h_v + h_G - Q_d - Q_{tg}}{\sum V_i \cdot c_{pmi} \Big|_0^{t_s}}$$



Произведена гасовита горива

- Подела у зависности од процеса добијања:
 - гасови добијени прерадом нафте,
 - гасови добијени прерадом производа прераде нафте,
 - гасови добијени из гасовитих природних горива,
 - гасови добијени из чврстих горива.



Предности

- Потпуније сагоревају.
- Поседују мањи садржај баласта.
- Сагоревају са малим коефицијентом ваздуха, блиским стехиометријском.
- Процес сагоревања се може лако регулисати.
- Продукти сагоревања су чистији.
- Лако се транспортују.
- Производе се у централизованим постројњима великог капацитета, ако се ради о произведеним горивима.



Остале карактеристике

- Одликују се лаком упаљивошћу.
- Деле се на:
 - елементарна (водоник),
 - хомогена једињења (метан, бутан, ...),
 - мешавине елемената и једињења,
 - мешавине једињења.



Природна гасовита горива

- Природна гасовита горива (условно):
 - јамски (руднички) гас
 - барски гас
- Природно гасовито гориво – природни (земни) гас
 - Јавља се на местима где има нафте или самостално.
 - Настао истим процесом трансформације од исте праматерије као и нафта.
 - Јавља се као:
 - слободан - гасна капа
 - везан – растворен у нафти



Састав природног гаса

- Највише метана
- Примесе
 - водоник
 - угљен моноксид
 - негориви гасови
 - угљен диоксид
 - азот
- Везан – растворен са нафтом:
 - етан (до 10 %)
 - пропан (до 7 %)
 - бутан (до 7 %)
- Слободан - у гасној капи:
 - метан (до 98 %)
 - остали парафински угљоводоници (1,5 – 2 %)

Влажни или богати

Суви или сиромашни



Примена природног гаса

- У процесима топљења руде
- У процесима прераде метала
- Термохемијска обрада метала
- Хемијска индустрија
- Добијање водоника, амонијака, метанола, ацетилена, ...
- Као гориво за погон мотора



Карактеристике природног гаса

- Топлотна моћ
 - Суви: 36 - 36,5 MJ/m³
 - Влажни: 37,7 – 41 MJ/m³
- Садржај сумпор водоника (H₂S) – до 2 %
- Највећа налазишта:
 - Русија
 - САД
 - Иран
 - Холандија
 - ...
- Србија
 - Елемир
 - Кикинда
 - Пландиште