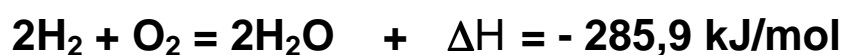
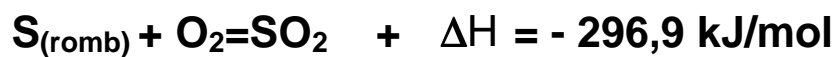
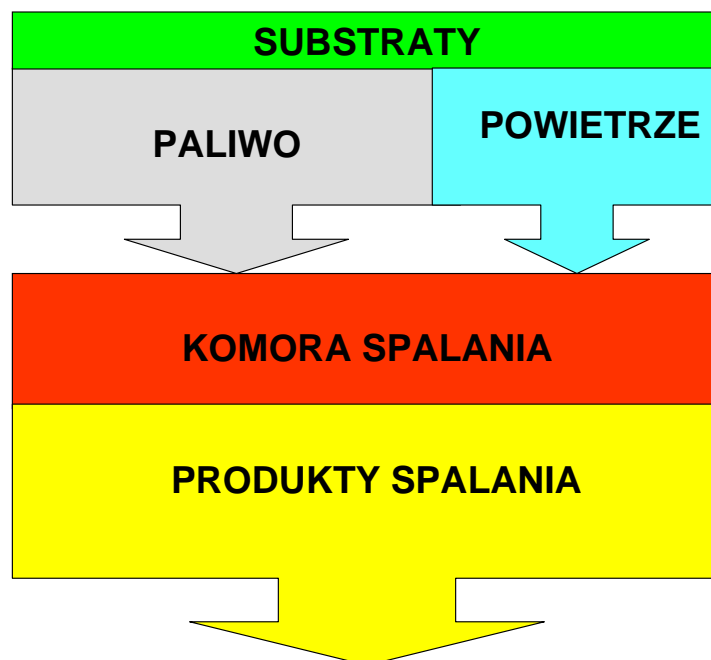


PALIWO STAŁE , PALIWO CIEKŁE				
SUBSTANCJA PALNA			BALAST	
C	S	H ₂	POPIÓŁ	WILGOĆ

PALIWO GAZOWE				
SUBSTANCJA PALNA			BALAST	
C	S	H ₂	CO ₂ , N ₂ , H ₂ O	



gdzie:

ΔH – entalpia reakcji, [kJ/kmol]

Spalanie zupełne – jeżeli w spalinach nie ma palnych części gazowych (np. CO, C_xH_y).

Spalanie całkowite – jeżeli w produktach spalania nie ma palnych części stałych (np. sadza, koksik lotny i in.).

Współczynnik nadmiaru powietrza λ :

$$\lambda = \frac{n_a}{n_{a\min}}$$

$n_a, n_{a\min}$ – rzeczywista ilość powietrza doprowadzonego do spalania, teoretyczna ilość powietrza niezbędna do spalania zupełnego i całkowitego paliwa [kmol/j.p].

j.p – jednostka ilości paliwa: w przypadku paliw stałych i ciekłych j.p=kg paliwa wilgotnego lub dla paliw gazowych j.p=kmol gazu suchego.

Kontrakcja chemiczna ΔV_{ch} – różnica objętości substratów i wilgotnych produktów spalania.

Kontrakcja fizyczna ΔV_f – różnica objętości substratów i produktów po uwzględnieniu wykroplenia się pary wodnej.

Kontrakcja całkowita $\Delta V = \Delta V_f + \Delta V_{ch}$ – suma kontrakcji chemicznej i fizycznej.

Wartość opałowa – Q_i jest to ilość ciepła, jaka powstaje w wyniku spalania zupełnego i całkowitego jednostki ilości paliwa przy założeniu, że produkty spalania zostaną ochłodzone do temperatury substratów, a para wodna zawarta w spalinach nie ulega wykropleniu.

Ciepło spalania – Q_s jest to ilość ciepła, jaka powstaje w wyniku spalania zupełnego i całkowitego jednostki ilości paliwa przy założeniu, że para wodna zawarta w spalinach ulegnie całkowitemu wykropleniu.

$$Q_i = Q_s - m'' \cdot r$$

m'' – masa skroplin uzyskana ze spalania jednostki ilości paliwa: dla paliw stałych i ciekłych [kg/kg], dla paliw gazowych [kg/um³]

r – entalpia skraplania pary, [kJ/kg]

Paliwa ciekłe i stałe: Q_i [kJ/kg], Q_s [kJ/kg],

Paliwa gazowe: Q_i [kJ/um³], Q_s [kJ/um³].

1 um³ (umowny metr sześcienny) jest to ilość substancji zawartej w 1 m³ gazu doskonałego lub półdoskonałego o ściśle określonym ciśnieniu p_N i temperaturze T_N . Parametry p_N , T_N nazywamy parametrami umownymi.

Najczęściej przyjmuje się następujące wartości parametrów umownych: $p_N = 1 \text{ bar}$, $T_N = 273,15 \text{ K}$, które nazywa się parametrami umownymi SI.

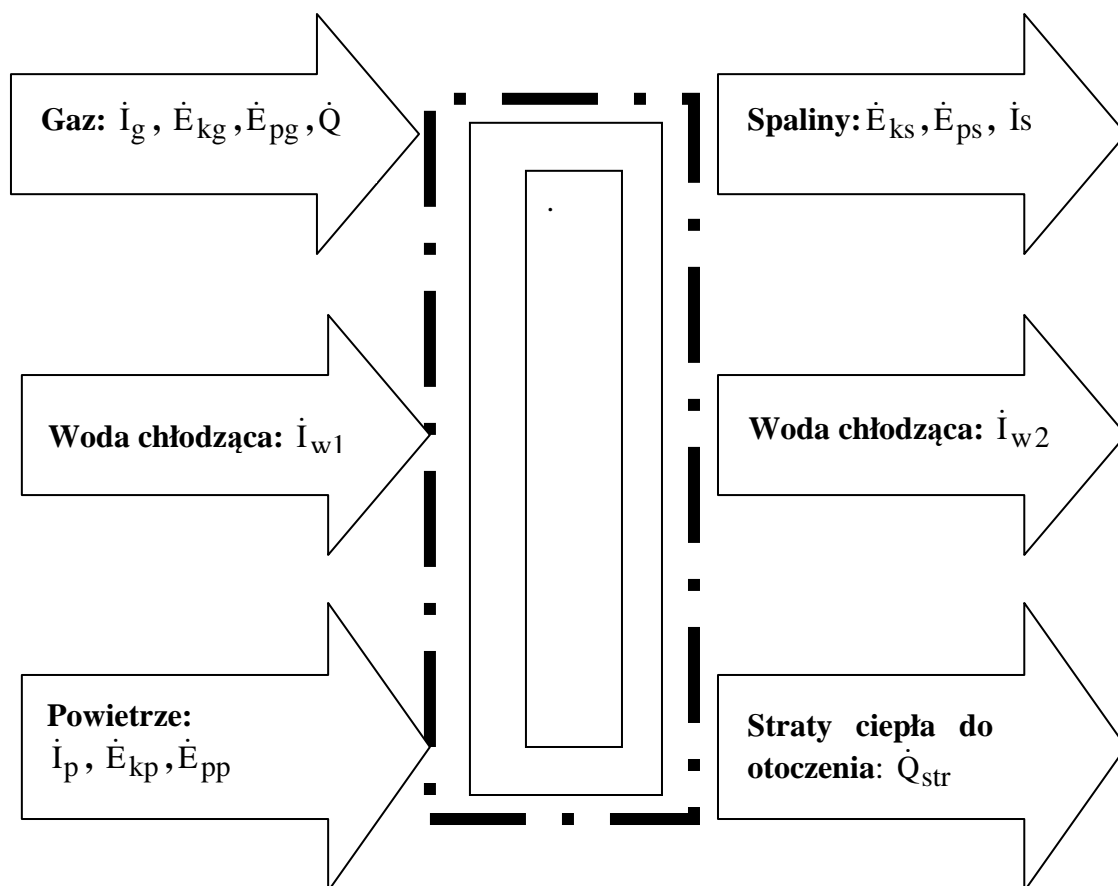
Bilans energetyczny kalorymetru Junkersa

$$\dot{E}_d = \dot{E}_w + \Delta\dot{E}_u$$

\dot{E}_d – strumień energii doprowadzonej do układu,

\dot{E}_w – strumień energii wyprowadzonej z układu,

$\Delta\dot{E}_u = \dot{E}_{u2} - \dot{E}_{u1}$, to przyrost strumienia energii układu.



gdzie:

- \dot{I}_g – strumień entalpii spalanego gazu,
- \dot{I}_p – strumień entalpii powietrza doprowadzanego do procesu spalania,
- \dot{I}_{w1} – strumień entalpii wody chłodzącej, dopływającej do kalorymetru Junkersa,
- \dot{E}_{kg} – strumień energii kinetycznej spalanego gazu,
- \dot{E}_{kp} – strumień energii kinetycznej powietrza doprowadzanego do procesu spalania,
- \dot{E}_{pg} – strumień energii potencjalnej spalanego gazu,
- \dot{E}_{pp} – strumień energii potencjalnej powietrza doprowadzanego do procesu spalania,
- \dot{Q} – strumień ciepła wydzielonego w wyniku spalania gazu,
- \dot{I}_s – strumień entalpii spalin,
- \dot{E}_{ks} – strumień energii kinetycznej spalin,
- \dot{E}_{ps} – strumień energii potencjalnej spalin,
- \dot{I}_{w2} – strumień entalpii wody chłodzącej, wypływającej z kalorymetru Junkersa,
- \dot{Q}_{str} – strumień strat ciepła do otoczenia.

Pomiar powinien być przeprowadzony w stanie ustalonym, wtedy $\Delta\dot{E}_u = 0$

Warunki, które powinny być spełnione, aby kalorymetr Junkersa znajdował się w stanie ustalonym są następujące:

- stałe natężenie przepływu: gazu, powietrza, wody chłodzącej oraz spalin,
- stałe ciśnienie gazu, otoczenia,
- stały rozkład temperatury.

Aby zminimalizować straty ciepła przez konwekcję oraz promieniowanie powinny być dodatkowo spełnione następujące warunki:

- różnica temperatury Δt_w między temperaturą wody wypływającej t_{w2} i dopływającej t_{w1} z/do kalorymetru Junkersa powinna mieścić się w przedziale $\Delta t_w = t_{w2} - t_{w1} = 6 \div 10K$
- średnia arytmetyczna temperatura wody chłodzącej kalorymetr t_w powinna być równa temperaturze otoczenia $t_w = 0,5(t_{w2} + t_{w1}) = t_{ot}$.

Jeżeli kalorymetr Junkersa znajduje się w stanie ustalonym, to przyrost strumienia energii układu $\Delta \dot{E}_u = \dot{E}_{u2} - \dot{E}_{u1} = 0$, czyli strumień energii układu pozostaje niezmienny $\dot{E}_{u2} = \dot{E}_{u1}$, zatem: $\dot{E}_d = \dot{E}_w$

Strumień energii dopływającej do układu \dot{E}_d :

$$\dot{E}_d = \dot{I}_g + \dot{E}_{kg} + \dot{E}_{pg} + \dot{Q} + \dot{I}_p + \dot{E}_{kp} + \dot{E}_{pp} + \dot{I}_{w1}$$

Strumień energii wypływającej z układu \dot{E}_w :

$$\dot{E}_w = \dot{I}_s + \dot{E}_{ks} + \dot{E}_{ps} + \dot{I}_{w2} + \dot{Q}_{str}$$

Wobec tego, że w stanie ustalonym spełnione jest równanie $\dot{E}_d = \dot{E}_w$ zatem:

$$\dot{I}_g + \dot{E}_{kg} + \dot{E}_{pg} + \dot{Q} + \dot{I}_p + \dot{E}_{kp} + \dot{E}_{pp} + \dot{I}_{w1} = \dot{I}_s + \dot{E}_{ks} + \dot{E}_{ps} + \dot{I}_{w2} + \dot{Q}_{str}$$

Założenia upraszczające bilans energetyczny kalorymetru Junkersa:

- ze względu na bardzo małą prędkość przepływu ($v \approx 0$): gazu, powietrza oraz spalin, można pominąć strumienie energii kinetycznej: gazu, powietrza oraz spalin $\dot{E}_{kg}, \dot{E}_{kp}, \dot{E}_{ks} \approx 0$,
- ze względu na to, że różnica poziomów $\Delta h < 80-100m$, można pominąć strumienie energii potencjalnej: gazu, powietrza oraz spalin $\dot{E}_{pg}, \dot{E}_{pp}, \dot{E}_{ps} \approx 0$
- nie ma kontrakcji chemicznej, czyli różnica między objętością substratów oraz objętością wilgotnych produktów spalania $\Delta V_{ch} = 0$

$$\Delta V_{ch} = V_{substratów} - V_{wilgotnych\ produktów} = 0$$

gdzie:

$$V_{substratów} = V_g + V_p = V_{wilgotnych\ produktów} = V_s,$$

V_g, V_p, V_s – objętość gazu, powietrza, spalin

- jeżeli założymy dodatkowo, że gęstość gazu (ρ_g), powietrza (ρ_p), spalin (ρ_s) jest taka sama:

$$\rho_g \approx \rho_p \approx \rho_s$$

to można zapisać, że suma masy gazu (m_g) i powietrza (m_p), czyli substratów jest w przybliżeniu równa masie spalin (m_s)

$$m_g + m_p \approx m_s$$

- jeżeli założymy, z błędem $\pm 0,5\%$, że ciepło właściwe gazu c_{pg} , powietrza c_{pp} , spalin c_{ps} przy stałym ciśnieniu jest w przybliżeniu takie samo:

$$c_{pg} \approx c_{pp} \approx c_{ps} \approx c_p$$

- z definicji wartości opałowej wynika, że temperatura gazu (t_g), powietrza (t_p) i spalin (t_s) jest taka sama

$$t_g = t_p = t_s = t$$

wobec tego po obustronnym pomnożeniu równania:

$$m_g + m_p \approx m_s$$

przez iloczyn $c_p \cdot t \approx c_{pg} \cdot t_g \approx c_{pp} \cdot t_p \approx c_{ps} \cdot t_s$

uzyskuje się następujące równanie :

$$m_g \cdot c_{pg} \cdot t_g + m_p \cdot c_{pp} \cdot t_p \approx m_s \cdot c_{ps} \cdot t_s$$

które po wykorzystaniu równania definiującego entalpię :

$$I = m c_p t$$

można zapisać w następującej postaci:

$$I_g + I_p \approx I_s$$

gdzie:

I_g – entalpia gazu,

I_p – entalpia powietrza,

I_s – entalpia spalin,

Posługując się strumieniem entalpii (\dot{I}), czyli ilorazem entalpii (I) i czasu (τ):

$$\dot{I} = \frac{I}{\tau}$$

można napisać, że suma strumieni entalpii gazu (\dot{I}_g) i powietrza (\dot{I}_p) jest równa strumieniowi entalpii spalin (\dot{I}_s):

$$\dot{I}_g + \dot{I}_p = \dot{I}_s$$

- strumień strat ciepła do otoczenia:

$$\dot{Q}_{\text{str}} = \dot{Q}_k + \dot{Q}_r = 0$$

gdzie:

\dot{Q}_k – strumień ciepła, traconego do otoczenia przez konwekcję,

\dot{Q}_r – strumień ciepła, traconego do otoczenia przez promieniowanie.

$\dot{Q}_k = 0$, $\dot{Q}_r = 0$ wynika to z konstrukcji kalorymetru Junkersa oraz warunków przeprowadzania pomiaru, o czym wspomniano wcześniej:

$$\Delta t_w = t_{w2} - t_{w1} = 6 \div 10\text{K}, \quad t_w = 0,5(t_{w2} + t_{w1}) = t_{\text{ot}}$$

Ostatecznie, po wprowadzeniu uproszczeń, bilans energetyczny kalorymetru Junkersa można zapisać w następującej postaci:

$$\dot{Q} + \dot{I}_{w1} = \dot{I}_{w2}$$

lub po przekształceniu

$$\dot{Q} = \dot{I}_{w2} - \dot{I}_{w1} = \dot{m}_w \cdot c_{|_{t_{w1}}^{t_{w2}}} \cdot (t_{w2} - t_{w1})$$

gdzie:

\dot{Q} – strumień ciepła wydzielonego podczas spalenia określonej ilości gazu,

$\dot{I}_{w1}, \dot{I}_{w2}$ – strumień entalpii wody chłodzącej na dopływie oraz wypływie z kalorymetru Junkersa,

$c_{|_{t_{w1}}^{t_{w2}}}$ – średnie ciepło właściwe wody w zakresie temperatur t_{w1} i t_{w2} . Ponieważ zmiana temperatury wody jest niewielka, wobec tego można nie uwzględniać wpływu temperatury wody na wartość ciepła właściwego wody i przyjmować wartość $c_w = 4,19 \text{ kJ/kgK}$.

Strumień wydzielanego ciepła:

$$\dot{Q} = \dot{V}_{gN} \cdot Q_s$$

gdzie :

Q_s – ciepło spalania paliwa gazowego,

\dot{V}_{gN} – strumień spalanego gazu [um^3].

Ciepło spalania gazu Q_s :

$$Q_s = \frac{\dot{Q}}{\dot{V}_{gN}} = \frac{\dot{m}_w \cdot c_w \cdot (t_{w2} - t_{w1})}{\dot{V}_{gN}} = \frac{\dot{m}_w \cdot c_w \cdot (t_{w2} - t_{w1})}{V_{gN}}$$

Wartość opałowa gazu:

$$Q_i = Q_s - m'' \cdot r = Q_s - \frac{m_{\text{skr}} \cdot r}{V_{\text{gN}}}$$

gdzie:

m'' – masa skroplin uzyskana ze spalania jednostki ilości paliwa gazowego, [kg/um³]

r – entalpia skraplania pary, [kJ/kg]

$$m'' = \frac{m_{\text{skr}}}{V_{\text{gN}}}, \left[\frac{\text{kg}}{\text{um}^3} \right]$$

Ilość spalonego gazu oblicza się ze wzoru:

$$\frac{p_N V_{\text{gN}}}{T_N} = \frac{p_g V_g}{T_g} \longrightarrow V_{\text{gN}} = \frac{p_g \cdot V_g \cdot T_N}{p_N \cdot T_g}, [\text{um}^3]$$

Ciśnienie gazu suchego (p_g)

$$p_g = \Delta p_g + p_b - p_s$$

Δp_g – nadciśnienie gazu w gazomierzu, [Pa]

p_b – ciśnienie barometryczne, [Pa]

p_s – ciśnienie nasycenia pary wodnej dla temperatury gazu t_g , [Pa]

MATERIAŁY PRZYDATNE DO ANALIZY WYNIKÓW POMIARÓW

1. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 2lipca 2010 w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu gazowego (Dz.U.z 2010r. Nr.133, poz.891).

2. Polskie Normy:

- **PN-C-04750: Paliwa gazowe. Klasyfikacja, oznaczenia i wymagania.**
- **PN-C-04753: Gaz ziemny. Jakość gazu dostarczanego odbiorcom z sieci rozdzielczej.**

WZGLĘDNA GĘSTOŚĆ GAZU

Stosunek gęstości danego gazu do gęstości suchego powietrza w tej samej temperaturze i pod tym samym ciśnieniem.

$$d = \Delta = \frac{\rho_g}{\rho_p}$$

LICZBA WOBBEGO

Liczba Wobbego- W_o , [kJ/um³]: ciepło spalania gazu podzielone przez pierwiastek kwadratowy ze względnej gęstości gazu odniesionej do powietrza:

$$W_o = \frac{Q_s}{\sqrt{d}}$$

Wartość liczby Wobbego jest podstawą do podziału paliw gazowych na podgrupy.

Wyszczególnienie	Jednostka	System		
		gazu ziemnego grupy E	gazu ziemnego grupy Lw	gazu ziemnego grupy Ls
ciepło spalania	MJ/m ³	≥ 34,1	≥ 30,1	≥ 26,1
wartość opałowa	MJ/m ³	≥ 31,0	≥ 27,0	≥ 24,0
górną liczbą Wobbego				
- nominalna	MJ/m ³	50,0	41,5	35,0
- zakres zmienności	MJ/m ³	45,0-54,0	37,5-45,0	32,5-37,5
zawartość siarkowodoru	mg/m ³	≤ 7,0	≤ 7,0	≤ 7,0
zawartość tlenu	% mol/mol	≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,2
zawartość ditlenku węgla	% mol/mol	≤ 3,0	≤ 3,0	≤ 3,0
zawartość par rtęci	μg/m ³	≤ 30,0	≤ 30,0	≤ 30,0
temperatura punktu rosy wody dla 5,5 MPa od 1 kwietnia do 30 września	°C	≤ +3,7	≤ +3,7	≤ +3,7
temperatura punktu rosy wody dla 5,5 MPa od 1 października do 31 marca	°C	≤ -5,0	≤ -5,0	≤ -5,0
temperatura punktu rosy węglowodorów	°C	0	0	0
zawartość węglowodorów mogących ulec kondensacji w temp. -5°C przy ciśnieniu panującym w gazociągu	mg/m ³	≤ 30,0	≤ 30,0	≤ 30,0
zawartość pyłu o średnicy cząstek większej niż 5 μm	mg/m ³	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0
zawartość siarki merkaptanowej	mg/m ³	≤ 16,0	≤ 16,0	≤ 16,0
zawartość siarki całkowitej	mg/m ³	≤ 40,0	≤ 40,0	≤ 40,0