

1 Podział termodynamiki

Rodzaje termodynamiki:

- **Termodynamika klasyczna** - zajmuje się makroskopowymi, równowagowymi zjawiskami termodynamicznymi w oparciu o pewne aksjomaty poparte doświadczeniami. Ze względu na fakt, że nauka ta zajmuje się układami w stanie równowagi, w związku z czym nie zajmuje się zmiennością w czasie, niektórzy uważają, że powinna nosić nazwę termostatyki.
- **Termodynamika kwantowa**
- **Termodynamika statystyczna** - specyfiką tej teorii jest jej metoda. Poszczególne ciała są bowiem opisane przez zmienne losowe. Obliczenia prowadzone w ramach mechaniki statystycznej dotyczą średnich z tych zmiennych wykorzystując metody statystyczne. Fizyczną podstawą mechaniki statystycznej jest termodynamika fenomenologiczna.
- **Termodynamika techniczna** - służy analizie wymiany ciepła (przewodzenie, konwekcja, przejmowanie, przenikanie) oraz zmianie energii cieplnej w inne rodzaje energii.
- **Termodynamika chemiczna** - dział nauki z pogranicza fizyki i chemii (zaliczany do chemii fizycznej) badająca energetyczne aspekty reakcji chemicznych. Termodynamika chemiczna stosuje aparat matematyczny i pojęciowy wypracowany przez termodynamikę ogólną. Posługuje się funkcjami stanu znanymi w termodynamice, a zwłaszcza entropią, entalpią i energią swobodną. Oprócz ogólnych funkcji stanu termodynamika chemiczna wypracowała szereg pojęć charakterystycznych tylko dla niej.
- **Termodynamika procesów nierównowagowych**

2 Gaz doskonały, półdoskonały i rzeczywisty

- **gaz doskonały** - zerowa objętość drobin i brak sił wzajemnego przyciągania i drgań w obrębie drobin, chaotyczny ruch drobin jest tylko ruchem postępowym i obrotowym. Podlega prawom Boyle-Mariotte'a, Gay-Lussaca, Avogadra. Stosuje się ściśle do prawa Clapeyrona i ma stałą pojemność cieplną c_w . Przykład: gazy jednoatomowe (H , N , Ar)
- **gaz półdoskonały** - c_w zależy od temperatury. W obrębie drobin ruchy oscylacyjne. Przykład: gazy dwuatomowe O_2 , N_2 ...
- **gaz rzeczywisty** - podlega w/w tylko z pewnym przybliżeniem. Im bardziej złożony tym dalszy od doskonałego, np. CH_4 , CO_2 ...

3 Termiczne równanie gazu doskonałego i półdoskonałego + zastosowanie

3.1 Równanie gazu doskonałego

Równaniem stanu gazu doskonałego jest **równanie Clapeyrona**:

$$pV = mR_iT \quad (1)$$

gdzie:

- p - ciśnienie,
- V - objętość
- m - masa gazu zajmującego objętość V ,
- R_i - stała gazowa,
- T - temperatura

Dla strumieni i przepływów stosujemy równanie Clapeyrona dla strumieni:

$$p\dot{V} = \dot{m}R_iT \quad (2)$$

3.1.1 Zastosowanie: obliczanie strumienia objętości gazu w warunkach rzeczywistych

Mamy dane wartości strumieni dla gazu w warunkach początkowych \dot{V}_0 , strumień masy jest stały dla obu przypadków i wynosi \dot{m} . Poszukujemy strumienia objętości gazu w warunkach rzeczywistych \dot{V}_r . Stąd:

$$p_0\dot{V}_0 = \dot{m}R_iT_0; p_r\dot{V}_r = \dot{m}R_iT_r \Rightarrow \frac{p_0\dot{V}_0}{p_r\dot{V}_r} = \frac{T_0}{T_r} \Rightarrow \dot{V}_r = \dot{V}_0 \frac{p_0}{p_r} \frac{T_r}{T_0} \quad (3)$$

4 Zerowa zasada termodynamiki

Jeśli spośród trzech układów A , B oraz C znajdujących się w stanie wewnętrznej równowagi termodynamicznej każdy z układów A i B jest w równowadze termodynamicznej z układem C , to układy A i B są ze sobą w równowadze (mają tę samą temperaturę)

4.1 Definicja temperatury

Temperatura - parametr stanu określający zdolność do przekazywania ciepła

5 I zasada termodynamiki, bilans energetyczny

5.1 I zasada termodynamiki

Wyróżnia się układy termodynamiczne:

- otwarte - wymiana energii i masy
- zamknięte - wymienia energię, lecz zachowuje stałość substancji
- adiabatyczne - zachowują stałość ciepła
- odosobnione - zachowujące stałość wszystkich form energii

W układzie odosobnionym całkowita energia w nim zawarta jest wielkością stałą.

5.2 Ogólna postać bilansu energii dla układu otwartego

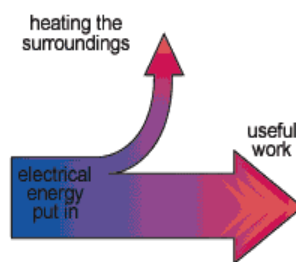
Ogólna postać bilansu energii dla układu otwartego:

$$\dot{E}_D = \Delta \dot{E}_U + \dot{E}_w \quad (4)$$

gdzie:

- \dot{E}_D - energia dostarczona
- $\Delta \dot{E}_U$ - energia układu
- \dot{E}_W - energia wyprowadzona

Graficzną formą bilansu energii jest wykres Sankeya (Rys. 1)



Rysunek 1: Wykres Sankeya

6 Rzeczywiste i średnie ciepło właściwe

Rzeczywiste ciepło właściwe gazów c określa wzór:

$$c = \frac{1}{m} \left(\frac{dQ}{dT} \right) \quad (5)$$

Ciepło właściwe gazów doskonałych nie zależy od temperatury. W przypadku gazów rzeczywistych ciepło właściwe (zarówno c_p jak i c_v) jest zależne od temperatury. Rośnie ono wraz z temperaturą. Zmiana ta komplikuje nieco obliczenia, ponieważ nie możemy zastosować stałej wartości ciepła właściwego do obliczeń. W takim przypadku musimy wykorzystać tzw. **średnie ciepło właściwe** (ciepło przemiany od temperatury t_1 do temperatury t_2), określone zależnościami:

$$c_p|_{t_1}^{t_2} = \frac{c_p|_{0^\circ C}^{t_2} - c_p|_{0^\circ C}^{t_1}}{t_2 - t_1} \quad (6)$$

7 Energia wewnętrzna układu

Energia układu jest funkcją stanu, dlatego jej przyrost wyraża różnica pomiędzy energią układu na końcu bilansowania i na początku.

$$\delta E = E_{u2} - E_{u1} \quad (7)$$

gdzie $E_u = E_k + E_p + U$. U jest **energią wewnętrzną układu**. Składają się na nią:

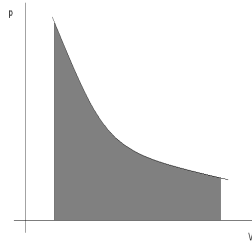
- energia ruchu postępowego i obrotowego drobin
- energia drgań atomów
- energia wzajemnego przyciągania drobin
- energia chemiczna związana z możliwością przebudowy drobin
- energia stanów elektronowych
- energia jądrowa

8 Praca bezwzględna układu

Praca bezwzględna układu jest to praca wykonana przez czynnik termodynamiczny przy zmianie objętości:

$$L_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (8)$$

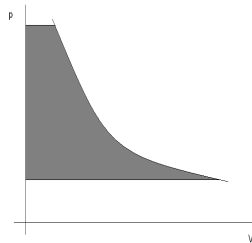
Praca bezwzględna w układzie $p - V$ stanowi pole powierzchni pod krzywą.



Rysunek 2: Praca bezwzględna

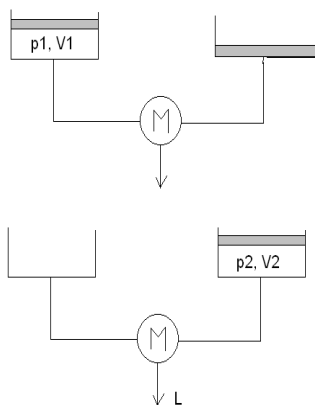
9 Praca techniczna układu

Praca techniczną przedstawia w układzie p – V pole zawarte pomiędzy krzywą przemiany a osią p



Rysunek 3: Praca techniczna

10 Entalpia układu, funkcja Gibbsa



Przykład: przetłaczamy ze zbiornika zamkniętego tłokiem o parametrach p_1, V_1 do zbiornika 2. Po przetłoczeniu w zbiorniku 2 mamy gaz o parametrach p_2, V_2 , a maszyna wirnikowa M wykonała i oddała na zewnątrz pracę L . Praca L wyraża się wzorem:

$$L = (U_1 + p_1 V_1) - (U_2 + p_2 V_2) \quad (9)$$

Sumę energii wewnętrznej U i pracy przetłaczania nazywamy **funkcją Gibbsa** lub **entalpią**.

$$I = U + pV \quad (10)$$

gdzie:

- I - entalpia
- U - energia wewnętrzna
- V - objętość
- p - bezwzględne ciśnienie statyczne

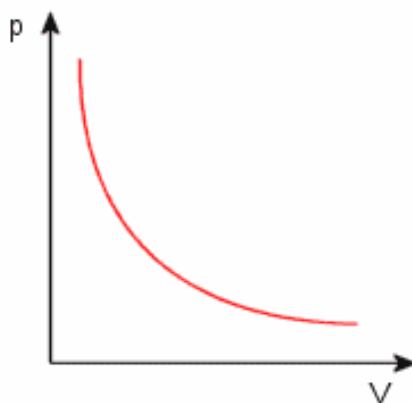
11 Przemiany gazowe

Dla wszystkich przemian prawdziwa jest zależność:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

czyli, innymi słowy stosunek iloczynu ciśnienia i objętości do temperatury gazu jest zawsze taki sam.

12 Przemiana izotermiczna



Przemiana izotermiczna jest nazywana również prawem Boyle'a - Mariotte'a. Jak sama nazwa wskazuje, w przemianie tej temperatura nie ulega zmianie:

$$T = \text{const}$$

w związku z tym również:

$$pV = \text{const}$$

Z pierwszej zasady termodynamiki wynika, że całe ciepło doprowadzone do gazu w procesie izotermicznym jest zużywane na wykonanie pracy przeciwko siłom zewnętrznym.

$$Q = W$$

gdzie:

- W praca wykonana przez gaz
- Q ciepło doprowadzone

Praca jaką wykonuje gaz rozszerzając się od objętości V_A do V_B wyraża wzór:

$$W_{A \rightarrow B} = \int_{V_A}^{V_B} dW = \int_{V_A}^{V_B} PdV$$

w procesie izotermicznym

$$W_{A \rightarrow B} = \int_{V_A}^{V_B} PdV = \int_{V_A}^{V_B} \frac{nRT}{V} dV = nRT \ln \frac{V_B}{V_A} = nRT \ln \frac{P_A}{P_B}$$

13 Przemiana izochoryczna

Przemiana izochoryczna stałej masy gazu charakteryzuje się niezmiennością objętości. Przyrost ciśnienia jest wprost proporcjonalny do przyrostu temperatury.

$$V = \text{const}$$

w związku z tym również

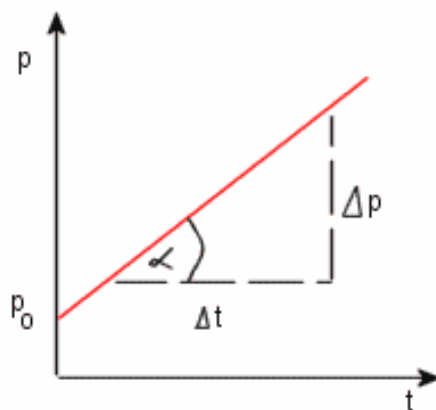
$$\frac{p}{T} = \text{const}$$

Równanie **izochory** (prostej obrazującej proces izochoryczny)

$$p = \left(\frac{\Delta p}{\Delta t} \right) \times t + p_0$$

14 Przemiana izobaryczna

Przemiana izobaryczna to proces termodynamiczny, podczas którego ciśnienie układu nie ulega zmianie. Natomiast pozostałe parametry termodynamiczne czynnika mogą zmieniać się. Procesy izobaryczne mogą zachodzić zarówno w sposób odwracalny, jak i nieodwracalny. Odwracalny proces izobaryczny przedstawia na wykresie krzywa zwana izobarą. Praca wykonana przez układ (lub nad układem) w odwracalnym



procesie izobarycznym jest równa ubytkowi (lub przyrostowi) entalpii układu. W szczególności, gdy jedyny wkład do pracy stanowi praca objętościowa (polegająca na zmianie objętości układu), jest ona wyrażona wzorem

$$W = p\Delta V$$

,

- W - praca
- p - ciśnienie
- ΔV - zmiana objętości

Dla gazu doskonałego przemiana izobaryczna spełnia

$$\frac{V}{T} = const$$

- V - objętość
- T - temperatura

Przemiana izobaryczna często pojawia się w teorii maszyn cieplnych oraz urządzeń energetycznych. Jest jedną z przemian tworzących obiegi porównawcze siłowni parowej (obieg Clausiusa-Rankine'a), turbiny gazowej (obieg Braytona-Joule'a), chłodziarki gazowej (obieg Joule'a) i parowej (obieg Lindego), silnika wysokoprężnego (obieg Seiligera-Sabathé).

Przemiana izobaryczna jest przemianą porównawczą przedstawiającą proces wytwarzania i przegrzewania pary wodnej w kotłach parowych oraz jej skraplania w skraplaczach współczesnych elektrowni parowych. W urządzeniach tych ma miejsce konwersja energii o mocy na poziomie kilkudziesięciu tysięcy megawatów (tylko w Polsce), co świadczy o wysokim znaczeniu przemiany izobarycznej w technice współczesnego świata.

15 Przemiana adiabatyczna

Przemiana adiabatyczna - proces termodynamiczny, podczas którego wyizolowany układ nie nawiązuje wymiany ciepła, lecz całość energii jest dostarczana lub odbierana z niego jako praca. Przemianę tę można zrealizować dzięki użyciu osłon adiabatycznych, lub wówczas, gdy proces zachodzi na tyle szybko, że przepływ ciepła nie zdąży nastąpić.

Adiabatą nazywa się krzywą przedstawiającą na wykresie przemianę adiabatyczną w szczególności zależność ciśnienia gazu od jego objętości przy sprężaniu lub rozprężaniu adiabatycznym.

Równanie przemiany adiabatycznej (**prawo Poissona**)

$$pV^\kappa = \text{const}$$

gdzie:

- p - ciśnienie
- V - objętość
- κ - wykładnik adiłaty, $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ (stosunek ciepła właściwego przy stałym ciśnieniu do ciepła przy stałej objętości)

16 Przemiana politropowa

Przemiana politropowa - proces termodynamiczny w gazie, czyniący zadość równaniu politropy, tzn. taki, podczas którego jest spełniony następujący związek:

$$pV^n = \text{const}$$

gdzie:

- p - ciśnienie
- V - objętość
- n - wykładnik (współczynnik) politropy, stały dla danego procesu politropowego, ale przyjmujący dla różnych procesów politropowych różne wartości, od minus do plus nieskończoności

Wykładnik politropy jest równy:

$$n = \frac{C - C_p}{C - C_v}$$

Gdzie:

- C_p - pojemność cieplna określona w warunkach stałego ciśnienia

- C_v – pojemność cieplna określona w warunkach stałej objętości
- C – pojemność cieplna w danej przemianie

Szczególnymi przypadkami procesu politropowego są odwracalne procesy:

- izobaryczny ($n = 0, C - C_p = 0$)
- izotermiczny ($n = 1, C_p = 0, C_v = 0$)
- adiabatyczny ($n = c_p/c_v$), gdzie c_p i c_v to ciepła właściwe przy stałym ciśnieniu i stałej objętości.

17 Przemiany nieodwracalne

- **Dławienie:** adiabatyczne rozprężanie płynu w układzie przepływowym bez odprowadzania na zewnątrz układu pracy technicznej. Może być spowodowane gwałtownym przewężeniem kanału, jak np. zawór, zwężka pomiarowa (niequasistatyczna) lub porowatą przegrodą (może być quasistatyczna).
- **Mieszanie:** chodzi tu głównie o mieszanie dwóch strumieni gazów wilgotnych w szczególności powietrza (mieszanie izobaryczno-adiabatyczne).
- **Tarcie:** ze zjawiskiem tarcia mamy najczęściej do czynienia przy przepływie rzeczywistego płynu z dużymi prędkościami.
- **Wymiana ciepła:** przewodzenie, przenikanie, przejmowanie, promieniowanie.

18 Obiegi termodynamiczne

Obiegiem (lub cyklem) termodynamicznym nazywamy zespół kolejnych przemian, po wykonaniu których stan rozpatrywanego układu powraca do stanu początkowego. Geometrycznie obieg jest przedstawiony w postaci linii zamkniętej. Obieg jest odwracalny, jeżeli składa się wyłącznie z przemian odwracalnych. Nieodwracalność chociaż jednej przemiany czyni obieg nieodwracalnym.

Praca obiegu jest równa ciepłu obiegu: $L = Q$

Praca i ciepło obiegu są przedstawiane na wykresach p-V i T-S polem ograniczonym przemianami tworzącymi obieg. Dla obiegu silnika zgodnego z ruchem wskazówek zegara na wykresach o współrzędnych p-V i T-S praca obiegu jest dodatnia. Dla obiegu urządzenia chłodniczego lub obiegu pompy ciepła, przeciwnego do ruchu wskazówek zegara praca obiegu jest ujemna.

18.1 Obieg Clausiusa-Rankine'a

Obieg Rankine'a (dokładniej obieg Clausiusa-Rankine'a) jest obiegiem porównawczym dla procesów, w których zachodzi parowanie i skraplanie czynnika roboczego np. dla konwencjonalnych lub jądrowych siłowni parowych, agregatów chłodziarek.

Jest on złożony z następujących przemian:

- 1 - 2 - izentropowego (adiabatycznego) rozprężania pary w turbinie parowej,
- 2 - 3 - izobarycznego skroplenia rozprężonej pary (odprowadzenia ciepła w skraplaczu),
- 3 - 4 - izochorycznego, pompowania kondensatu w pompie,
- 4 - 1 - izobarycznego podgrzewania cieczy (wody), jej odparowania oraz przegrzewania powstałej pary w kotle parowym lub wytwornicy pary.

Sprawność obiegu dla wody może wynosić 0,4-0,6, w praktyce bliższa dolnej granicy, co wynika z odchyłek przemian od założeń teoretycznych obiegu (np. nieizentropowe rozprężanie pary w turbinie, spadki ciśnienia w wymiennikach ciepła w kotle, etc.).

Obieg ten jest znacznie bliższy rzeczywistości dla cyklu, w którym zachodzi przemiana fazowa gaz - ciecz w porównaniu z obiegiem Carnota, który jest cyklem zachodzącym tylko dla gazu.

Czynnikiem roboczym (termodynamicznym) w cyklu Rankine'a jest w zastosowaniach technicznych (energetyce) najczęściej woda. Wynika to z wielu względów, m.in. z jej bardzo łatwej dostępności oraz obojętności dla środowiska. Niekiedy pojawiają się tzw. ORC, Organic Rankine Cycle, obiegi Rankine'a wykorzystujące jako czynnik roboczy węglowodory, co pozwala na pracę przy niższych temperaturach górnego źródła ciepła obiegu. Dzięki temu możliwe jest wykorzystanie np. ciepła geotermalnego do produkcji energii elektrycznej.

18.2 Obieg Lindego

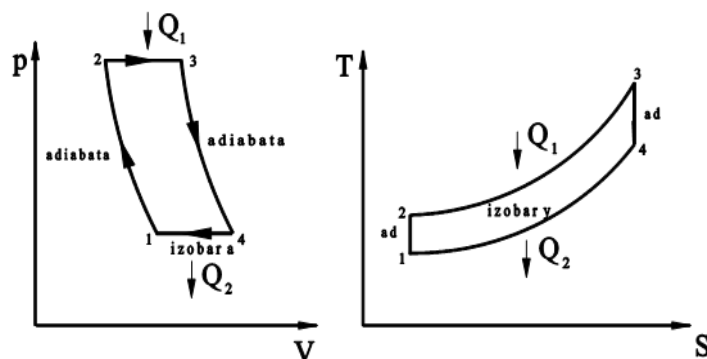
Obieg Lindego to szereg przemian termodynamicznych czynnika roboczego będących odzwierciedleniem idealnej pracy urządzenia chłodniczego.

Jest to schematyczne przedstawienie zasady działania układu chłodniczego, w którym następują zmiany czynnika chłodniczego.

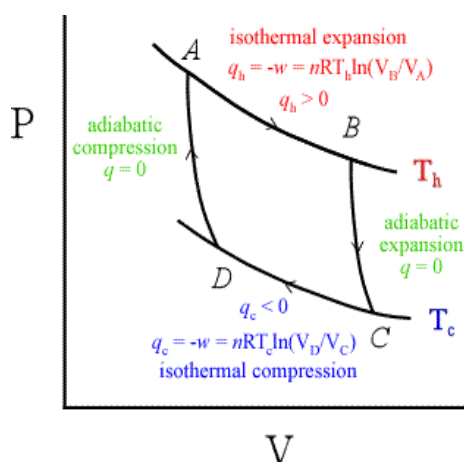
W układzie chłodniczym znajduje się czynnik termodynamiczny, który ulega odparowaniu w parowniku do momentu aż ostatnia jego kropla przejdzie ze stanu cieczy, cieczy nasyconej, aż do stanu gazowego. Czynnik odparowując odbiera ciepło z komory chłodniczej. Na wejściu do sprężarki czynnik jest zasysany i sprężany z ciśnienia niższego do wyższego. Wraz ze sprężeniem, czynnik podwyższa swoją temperaturę, wyższą od temperatury otoczenia. Czynnik musi posiadać temperaturę wyższą od otoczenia, aby zaszło zjawisko oddawania ciepła do otoczenia. Czynnik sprężony oddaje ciepło w skraplaczu, przechodząc ze stanu gazowego w stan ciekły (ciecz), po czym zostaje rozprężony w zaworze rozprężnym, zmieniając swoje ciśnienie i obniżając tym samym temperaturę. Czynnik następnie trafia ponownie do parownika gdzie proces się powtarza.

18.3 Obieg Joule’a

Obieg silnika powietrznego, turbiny gazowej, silnika odrzutowego. Składa się z dwóch adiabat i dwóch izobar.



19 Obieg Carnota



Obieg Carnota składa się z dwóch izoterm i dwóch adiabat.

Praca obiegu: $L = Q_1 - |Q_2|$ Sprawność obiegu: W obiegu Carnota o sprawności decydują temperatury źródeł ciepła. Sprawność silnika Carnota jest tym wyższa im przy wyższej temperaturze ciepło jest doprowadzane, a przy niższej odprowadzane. Sprawność cieplna nieodwracalnego obiegu silnika jest mniejsza od sprawności obiegu silnika Carnota między źródłami ciepła o tych samych temperaturach. Sprawność obiegu Carnota wyraża się wzorem:

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

20 Sprawności obiegów

Sprawność cieplna obiegu silnika jest to stosunek pracy zewnętrznej obiegu do ciepła doprowadzonego do obiegu:

$$\eta = \frac{L_{zob}}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}$$

Sprawność energetyczna obiegu

$$\eta_t = \frac{L_{ob}}{Q_d} = \frac{Q_d - Q_w}{Q_d} = 1 - \frac{Q_w}{Q_d}$$

η_t silnika jest zawsze mniejsze od 1.

Sprawność energetyczną ziębiarki

$$\varepsilon_z = \frac{Q_d}{|L_{ob}|} = \frac{Q_d}{Q_w - Q_d}$$

Sprawność energetyczna pompy grzewczej

$$\varepsilon_g = \frac{Q_d}{|L_{ob}|} = \frac{Q_w}{Q_w - Q_d}$$

21 Silnik Stirlinga i chłodziarka

21.1 Silnik Stirlinga

Silnik Stirlinga to silnik cieplny, który przetwarza energię cieplną w energię mechaniczną, jednak bez procesu wewnętrznego spalania paliwa, a na skutek dostarczania ciepła z zewnątrz, dzięki czemu możliwe jest zasilanie go ciepłem z dowolnego źródła. Źródłem ciepła może być w szczególności proces spalania jakiegoś paliwa, ale nie jest to konieczne.

W cyklu pracy silnika Stirlinga czynnik roboczy (jest nim zazwyczaj gaz np. tlen lub wodór) sprężany jest i oziębiany w zimnej komorze. Następnie przenoszony jest do komory gorącej, gdzie ulega rozprężeniu, a powstająca w ten sposób energia napędza tłok. Ponieważ rozszerzanie gazu w wysokiej temperaturze daje więcej energii, niż wymaga sprężenie gazu w niskiej temperaturze, silnik wykorzystuje różnicę i zamienia energię cieplną na mechaniczną. Niezbędne w pracy silnika ciepło pochodzi ze spalania dowolnej nadającej się do tego celu substancji. Może to być np. benzyna, olej napędowy, gaz ziemny itp.

Silnik Stirlinga produkuje energię nie na zasadzie wybuchu - jak konwencjonalne silniki wewnętrznego spalania - ale w sposób ciągły, więc pojazd napędzany takim silnikiem jeździ bardzo równomiernie. Mankamentem dotychczasowych konstrukcji silnika Stirlinga było to, że wymagały one instalowania bardzo dużej chłodnicy i dlatego uznano je za nieprzydatne do samochodów, a zwłaszcza samochodów osobowych.

Silnik Stirlinga jest wykorzystywany np. do napędzania szwedzkich okrętów podwodnych typu Gotland jako ciche źródło napędu do "pełzania" w zanurzeniu. Rozważa się także stosowanie tego silnika do wytwarzania energii elektrycznej przy wykorzystaniu geotermalnych źródeł ciepła.

21.2 Chłodziarka

Zdecydowana większość obecnych chłodziarek to urządzenia elektryczne, najczęściej sprężarkowe, realizujące lewobieżny obieg Lindego. W przeciwieństwie do obiegów prawobieżnych, realizowanych w silnikach cieplnych (obieg Cykl Otta, Diesla, Seilingera, Braytona), do układu doprowadzamy pracę a odbieramy ciepło.

Najprostszy układ chłodniczy składa się z następujących elementów:

- skraplacza,
- elementu dławiącego (w urządzeniach domowych rolę tę pełni rurka kapilarna),
- parownika.
- sprężarki.

W parowniku, który jest umiejscowiony w środowisku chłodzonym, panuje niskie ciśnienie więc i temperatura. Znajdujący się tam czynnik chłodniczy wrze, intensywnie odbierając ciepło. Następnie jest zasysany i sprężany przez sprężarkę po czym trafia do skraplacza, gdzie pod wysokim ciśnieniem ulega skropleniu. Ciekły czynnik o temperaturze wyższej od temperatury otoczenia trafia do elementu dławiącego, ponieważ jego ciśnienie musi zostać obniżone do ciśnienia panującego w parowniku. Podczas dławienia część czynnika odparowuje powodując spadek temperatury pozostałej cieczy. Zimna mieszanina cieczowo-parowa trafia do parownika i cykl się powtarza.

Oprócz tego wyróżniamy chłodziarki:

- absorpcyjne,
- adsorpcyjne,
- termoelektryczne,
- termoakustyczne,
- magnetyczne

22 Entropia

Entropia jest to termodynamiczna funkcja stanu, określająca kierunek przebiegu procesów spontanicznych (samorzutnych) w odosobnionym układzie termodynamicznym. Jest wielkością ekstensywną. Druga zasada termodynamiki stwierdza, że jeżeli układ termodynamiczny przechodzi od jednego stanu równowagi do drugiego bez udziału czynników zewnętrznych (a więc spontanicznie), to jego entropia zawsze rośnie. Pojęcie entropii wprowadził niemiecki uczony Rudolf Clausius.

W ramach II zasady termodynamiki zmiana entropii jest zdefiniowana przez swoją różniczkę zupełną jako:

$$dS = \frac{1}{T}dQ$$

gdzie:

- $\frac{1}{T}$ - czynnik całkujący (T - temperatura bezwzględna)
- dQ - ciepło elementarne, czyli niewielka ilość ciepła dostarczona do układu (wyrażenie Pfaffa)

23 Wykres T-s

W praktyce wykorzystuje się głównie dwa wykresy przedstawiające właściwości wody i pary - $T - s$ oraz $h - s$. W pierwszym przypadku linie równoległe do osi odciętych (entropia s) są izotermami, zaś linie równoległe do osi rzędnych (temperatura bezwzględna $T[K]$) są izentropami ($s = const$). Stany na lewo od krzywej AB (łącznie z nią) odpowiadają fazie ciekłej wody. Stany powyżej krzywej BC odpowiadają parze przegrzanej (faza gazowa wody). Obszar wewnątrz ABC określa parę mokrą. Ilość fazy gazowej w parze mokrej określamy podając stopień suchości pary x .

$$x = \frac{m''}{m'' + m'}$$

gdzie: m'' - masa fazy gazowej (pary nasyconej suchej), m' - masa fazy ciekłej w parze mokrej.

24 Gaz wilgotny

Gaz wilgotny jest roztworem gazu suchego i wody (pary wodnej). Ciśnienie p jest sumą ciśnienia gazu suchego i pary:

$$p = p_g + p_p$$

25 Wilgotność względna i bezwzględna

Stosunek wilgotności bezwzględnej do bezwzględnej wilgotności maksymalnej nazywamy **wilgotnością względną** φ .

$$\varphi = \frac{\gamma_p}{\gamma_{max}} \times 100\%$$

Wilgotność bezwzględna powietrza - masa pary wodnej zawarta w $1m^3$ powietrza wilgotnego, Wszelkie przemiany zachodzą przy stałym ciśnieniu, zaś zawartość wilgotności bezwzględnej zależy od temperatury. Wielkością charakteryzującą wilgotność niezależną od zmian temperatury jest **wilgotność bezwzględna masowa**.

26 Stopień zawilżenia

Stopień zawilżenia parą:

- gramowy $X = \frac{G_p}{G_g} = \frac{M_p}{M_g} \frac{p_p}{p-p_p}$ (dla powietrza zawierającego parę wodną $\frac{M_p}{M_g} = 0,622$)
- molowy $X = \frac{n_p}{n_g} = \frac{p_p}{p-p_p}$
- G_p, n_p – ilość pary,
- G_g, n_g – ilość gazu

Zawartość wilgoci X lub wilgoć wyznacza się przez pomiar wilgotności względnej oraz temperatury powietrza t .

27 Entalpia gazu wilgotnego

Entalpię wilgotnego powietrza odnosi się do sumy $1kg$ powietrza suchego i xkg wilgoci przypadającej na $1kg$ powietrza suchego.

$$I = i_g + xi_p$$

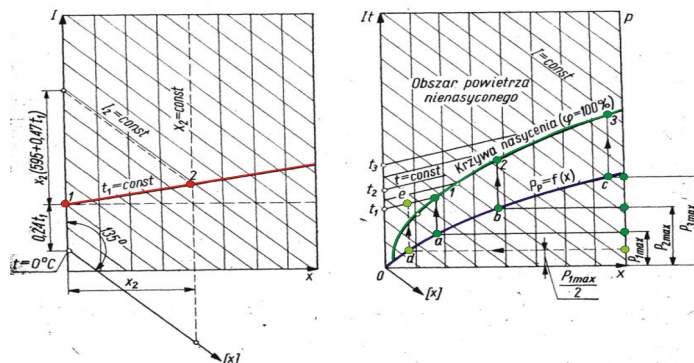
gdzie:

- i_g – entalpia $1kg$ powietrza suchego [kcal/mol],
- i_p – entalpia $1kg$ pary wodnej [kcal/mol],
- x – zawartość wilgoci w [kg/kg]

28 Wykres i-x

Przy znajomości dwu z pięciu wartości można odczytać brakujące dane:

- p_p – ciśnienie cząstkowe pary w wilgotnym powietrzu [mmHg],
- x – zawartość wilgoci w kg na kg suchego powietrza [kg/kg],
- t – temperatura [$^{\circ}C$],
- I – entalpia powietrza suchego [kcal/kg],
- φ – wilgotność względna [%]



28.1 Konstrukcja wykresu i-x

1. pod kątem 135° narysowanie osi: x – wilgoci i y – entalpii,
2. wykreślenie linii pionowych $x = const$ i linii ukośnych $I = const$,
3. wykreślenie linii izoterm $t = const$ zgodnie z równaniem

$$I = 0.24t + 595x + 0.47tx$$

4. wykreślenie zależności $p_p = f(x)$ czyli zależności ciśnienia cząstkowego pary od zawartości wilgoci zgodnie ze wzorem

$$x = 0.622 \frac{p_p}{p_b - p_p}; p_p = \frac{x p_b}{0.622 + x}$$

5. wykreślenie krzywej nasycenia $\varphi = 100\%$, wartość ciśnienia cząstkowego w powietrzu nasyconym p_{1max} dla danej temperatury odcina się na osi ciśnienia i prowadzi się poziomą linię do przecięcia się z krzywą $p_p = f(x)$, otrzymuje się punkt a , z punktu a prowadzi się pionową linię do odpowiedniej izoterm t_1 , otrzymuje się punkt 1. Podobnie dla innych wartości p_{max} .
6. wykreślenie krzywych $\varphi = 50\%$ itp.

Krzywa nasycenia dzieli wykres na dwie części: górna odpowiada stanowi powietrza nienasyconego, dolna stanowi powietrza przesyconego (tzw. **obszar mgły**).

29 Metody wyznaczania wilgotności

Wilgotność powietrza możemy wyznaczyć na dwa zasadnicze sposoby:

- higrometrycznie - metoda higroskopowa polega na pomiarach zmian pewnych własności ciał pod wpływem wilgoci. Obecnie w technice w bardzo szerokim zakresie do pomiaru wilgotności względnej stosuje się tzw. higrometry elektryczne, które ogólnie można podzielić na rezystancyjne i pojemnościowe.
- psychrometrycznie - metoda psychrometryczna polega na pomiarze temperatury wskazanej przez termometr „suchy” i „mokry”. Termometry wstawione są do przepływającej strugi powietrza. Jeden z termometrów, tak zwany suchy, wskazuje temperaturę powietrza. Drugi z termometrów ma zbiornik rtęci owinięty muślinem, zwilżonym wodą destylowaną, zwany mokrym. Po pewnym czasie zauważymy, że termometr mokry wskazuje temperaturę t_m niższą od temperatury wskazywanej przez termometr suchy.

30 Pomiar wilgotności psychrometrem

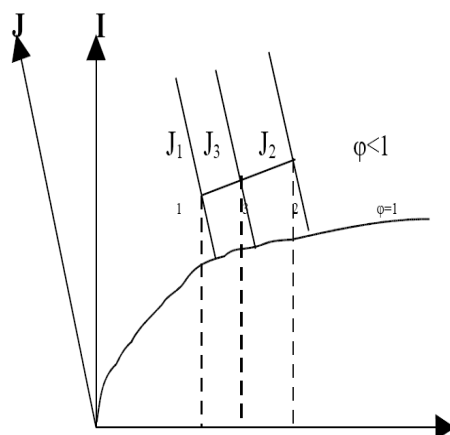
Psychrometr Augusta składa się z dwu jednakowych termometrów cieczowych, najczęściej rtęciowych. Jeden z nich mierzy temperaturę powietrza, drugi, zwany "termometrem wilgotnym" (niekiedy "mokrym") ma zbiorniczek z rtęcią owinięty batystową szmatką, której koniec zanurzony jest w naczynku z wodą. Woda paruje ze szmatki batystowej pobierając utajone ciepło parowania. Ciepło to jest pobierane (drogą przewodnictwa) również z termometru wilgotnego, w związku z czym termometr ten nie znajduje się w stanie równowagi cieplnej z powietrzem - wskazywana przez niego temperatura jest niższa od temperatury powietrza. Szybkość parowania jest zależna od trzech wielkości - niedosytu wilgotności ($d = E - e$), prędkości opływającego szmatkę powietrza (im większa prędkość opływu, tym szybsze parowanie) i ciśnienia atmosferycznego (im niższe ciśnienie, tym szybsze parowanie). Im szybciej zachodzi proces parowania, tym większy jest pobór utajonego ciepła parowania z powietrza, batystu, ale i z termometru; im szybszy proces parowania, tym temperatura wskazywana przez termometr zwilżony jest niższa od temperatury wskazywanej przez termometr suchy. Różnica ta nosi nazwę "różnicy psychrometrycznej". Gdyby wilgotność względna była równa 100%, czyli powietrze było całkowicie nasycone parą wodną ($e = E$), procesy parowania by ustały ($d = 0$), ustałyby również pobór utajonego ciepła parowania i temperatura na termometrze suchym i wilgotnym byłyby jednakowa (różnica psychrometryczna $t - tw = 0$). Wtedy prężność maksymalna byłaby równa prężności maksymalnej w temperaturze termometru zwilżonego. Można więc (i tak jest z pewnych względów wygodniej), zamiast prężności maksymalnej w danej temperaturze powietrza t , przyjąć do obliczeń prężność maksymalną w temperaturze termometru zwilżonego (tw). Znając różnicę psychrometryczną ($t - tw$), prężność maksymalną pary wodnej w temperaturze termometru wilgotnego (E_{tw}), ciśnienie atmosferyczne (p) i szybkość opływu powietrza, można obliczyć prężność aktualną pary wodnej za pomocą równania (wzoru) psychrometrycznego

$$e = E_{tw} - A * p * (t - tw)$$

gdzie:

- e - prężność aktualna pary wodnej,
- E_{tw} - prężność maksymalna pary wodnej w temperaturze termometru zwilżonego,
- A - współczynnik empiryczny, którego wartość uzależniona jest od prędkości przepływu powietrza wokół termometru zwilżonego,
- p - ciśnienie atmosferyczne,
- t - temperatura powietrza (termometru suchego),
- tw - temperatura odczytywana na termometrze zwilżonym.

31 Mieszanie powietrza z parą na wykresie i-x



Prosta 1-2 na rysunku jest prostą mieszania. Punkt 3 reprezentuje końcowy stan mieszania masy m_1 i masy m_2 : $m_1(1 - 3) = m_2(3 - 2)$. Analitycznie można określić entalpię i stopień suchości punktu 3 przy pomocy wzorów:

$$I_3 = \frac{L_1 I_1 + L_2 I_2}{L_1 + L_2}; x_3 = \frac{L_1 x_1 + L_2 x_2}{L_1 + L_2}$$

gdzie:

- L_1, L_2 - masy powietrza suchego (uwaga m oznaczono masy powietrza wilgotnego),
- I_1, I_2, I_3 - entalpie w punktach 1,2,3,
- x_1, x_2, x_3 - zawartości wilgoci.

32 Proces suszenia, model procesu suszenia

Proces cieplny uwalniania materiałów stałych lub roztworów od zawartej w nich wody przez jej odparowanie nazywamy suszeniem. Sztuczne suszenie materiałów przeprowadza się w specjalnych urządzeniach zwanych suszarkami. W urządzeniach tych, czynnik suszący (gorące powietrze) po wchłonięciu wilgoci odprowadza się za pomocą wentylatorów, inżektorów i innych urządzeń z komory suszarniczej na zewnątrz. W procesie suszenia wilgotny materiał styka się z powietrzem nienasyconym, w wyniku czego zmniejsza się wilgotność materiału, zaś powietrze nawilża się. Aby proces suszenia przyspieszyć powietrze przed wprowadzeniem do komory suszarki zostaje podgrzane w wymienniku ciepła.

Materiały suszone można podzielić na dwie grupy mając na uwadze ich zachowanie w czasie procesu:

- ciała koloidalne, w procesie suszenia ciała te zmieniają swoje wymiary,
- ciała kapilarno-porowate, w procesie suszenia nie zmieniają swoich wymiarów liniowych.

Woda może być połączona z materiałem przez:

- wiązanie chemiczne, najtrwalsze wiązanie nie podlegające rozerwaniu podczas zwykłego procesu suszenia,
- wiązanie mechaniczne, przyłączenie wilgoci podczas bezpośredniego kontaktu z powierzchnią ciała,
- wiązanie fizyko-chemiczne, wiązanie typu adsorpcyjnego i osmotycznego.

Podczas procesu suszenia usuwa się z materiału wilgoć związaną mechanicznie i fizykochemicznie.

32.1 Kinetyka procesu suszenia

Pod pojęciem kinetyki procesu suszenia rozumie się zmiany średniej wartości wilgoci i średniej temperatury w czasie. Pozwala to obliczyć ilość odparowanej wody oraz zużycie energii cieplnej. Proces suszenia charakteryzowany jest:

- krzywą suszenia $[X = X(t)]$,
- krzywą szybkości suszenia $[\nu = \nu(x)]$,
- krzywą temperaturową $[T = T(x)]$.

Szybkość suszenia definiuje się jako ilość wilgoci odparowanej z materiału suszonego w jednostce czasu na jednostkę powierzchni suszonej:

$$\nu = \frac{m\Delta x}{A\Delta t}$$

33 Suszenie na wykresie i-x

34 Para wodna

Para wodna - stan gazowy wody. Jako prawie czysty gaz występuje w naturze gejzerach w gorących jaskiniach, jest wyrzucana z podziemi, jest wytwarzana i używana w technice oraz w gospodarstwie domowym. Jest też składnikiem powietrza atmosferycznego, jej zawartość w powietrzu zmienia się.

Para wodna powstaje w wyniku parowania wody lub sublimacji lodu. Podczas tego procesu cząsteczka wody odrywa się od cieczy lub ciała stałego i przechodzi do gazu. Takie przejście wymaga dostarczenia energii. Energia ta jest zwykle pobierana z cieczy w postaci ciepła, przez co następuje oziębianie cieczy. Na granicy ciecz - gaz zachodzi też przechodzenie cząsteczek od gazu do cieczy (skraplanie). Dla danej temperatury ustala się równowaga zależna od ciśnienia wywołanego przez cząstki pary wodnej, tzw. ciśnienie parcjale, a nie zależy ono od ciśnienia wywieranego przez

inne gazy na wodę. Gdy cząstek pary jest mniej, to przeważa parowanie, gdy cząstek jest zbyt dużo przeważa skraplanie.

Przy zadanym ciśnieniu, temperaturę do której należy schłodzić parę wodną, by możliwe było jej skroplenie nazywa się temperaturę punktu rosy.

W technice używana powszechnie jako czynnik termodynamiczny. Otrzymywana najczęściej w kotle parowym i reaktorach jądrowych. Służy przede wszystkim do napędu turbin parowych w elektrowniach ciepłych. Dawniej wykorzystywana była do napędu maszyn parowych na statkach i w parowozach, a w kuźniach napędzała młoty parowe i parowo-powietrzne. W ciepłownictwie wykorzystywana do transportu ciepła. Jako produkt uboczny powstaje w wyniku spalania wodoru i paliw węglowodorowych (w silnikach lotniczych i samochodowych, w palnikach kuchenki gazowej).

- **para mokra** - mieszanina pary nasyconej i cieczy nasyconej. Ma temperaturę równą temperaturze parowania cieczy przy danym ciśnieniu, czyli temperaturze nasycenia. Przykładem pary mokrej jest para wydobywająca się z czajnika.
- **para nasycona** - gaz (np. para wodna) w równowadze z cieczą, z której powstała.
- **para sucha** - para nie zawierająca cząsteczek cieczy, np. para przegrzana.
- **para przegrzana**
- **para przechłodzona** - (para przesycona) to para mająca temperaturę niższą niż temperatura pary nasyconej przy tym samym ciśnieniu. Nie skrapla się z braku centrów kondensacji. Występuje w powietrzu. W laboratorium otrzymywana przez zmniejszenie ciśnienia pary suchej i wykorzystywana w komorze Wilsona.

35 Parowanie na wykresie t-v

36 Stopień suchości pary na wykresie p-v

37 Własności pary

38 Ciepło parowania

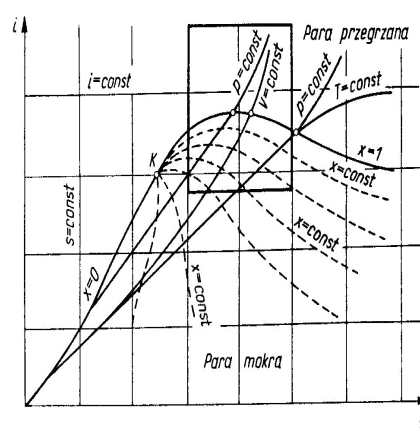
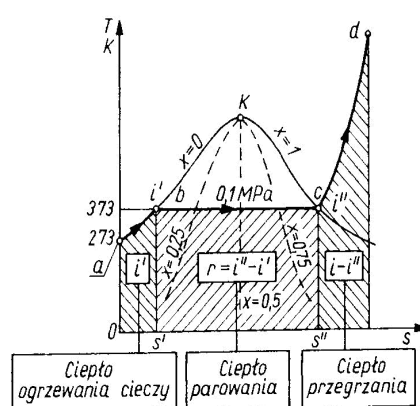
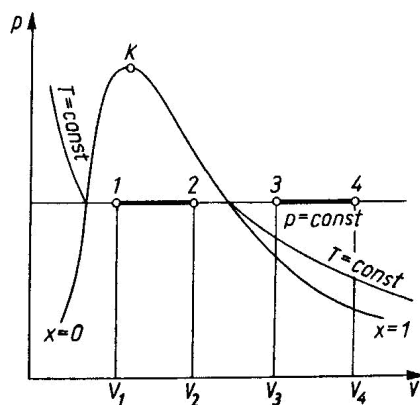
Całkowite ciepło parowania - całkowita ilość ciepła konieczna do zamiany wody na parę

$$q = u'' - u' + p(v'' - v') = r$$

- $u'' - u' = r$ - zmiana energii potrzebna do rozerwania cząstek cieczy (**wewnętrzne ciepło parowania**)
- $p(v'' - v') = \psi$ - zewnętrzne ciepło potrzebne na pokonanie oporów wewnętrznych przy powiększaniu objętości (**zewnętrzne ciepło parowania**)

Dostarczając $q = r$ zamieniamy wodę w parę nienasyconą suchą o entalpii $i'' = i' + r$.

39 Wykres p-v, T-s, i-s pary wodnej



40 Para przegrzana

Doprowadzając ciepło do pary nasyconej suchej podnosi się temperatura oraz zmienia się ciśnienie pary - uzyskuje się tzw. **parę przegrzaną**. Przegrzewanie pary zaczyna się powyżej krzywej granicznej $x = 1$. Równanie Clapeyrona $pV = RT$ nie spełnia warunków dla pary przegrzanej. Stosuje się więc poprawki:

- równanie Van Der Waalsa
- równanie Kocha

Ciepło właściwe pary przegrzanej możemy obliczyć ze wzoru:

$$q_p = c_p(t_p - t'')$$

- c_p - ciepło właściwe pary przegrzanej
- t_p - temperatura pary przegrzanej
- t'' - temperatura pary nasyconej

W technice używa się średniego c_p pary przegrzanej

$$c_{pm} = \frac{dq}{dt} = \frac{1}{t_p - t''} \times c_p \Big|_{t_{p1}}^{t_{p2}} dt$$

Entalpię pary przegrzanej wyznaczamy ze wzoru:

$$i_p = i'' + c_p(t_p - t'')$$

41 Zasada działania kotła parowego

Podstawową częścią każdej siłowni parowej jest urządzenie kotłowe, zwykle nazywane wprost kotłem parowym. Właściwy kocioł jest to naczynie zamknięte, w którym pod działaniem ciepła woda, zmienia się w parę wodną o ciśnieniu wyższym od atmosferycznego, użytą na zewnątrz kotła. Ciepło potrzebne do wytwarzania pary uzyskuje się wskutek spalania paliwa w palenisku. Gorące gazy spalinowe unoszą ciepło z paleniska i płyną wzdłuż, tzw. powierzchni ogrzewalnej kotła, której oddają ciepło, ogrzewając wodę w kotle i powodując jej parowanie. Wytwarzanie pary w kotle jest więc związane z trzema zjawiskami: ze spalaniem paliwa, wymianą energii w postaci ciepła oraz parowaniem wody. Kocioł powinien być stale zasilany wodą, paliwem i powietrzem. Produktem głównym kotła jest para wodna o określonym ciśnieniu, produktami ubocznymi, które należy usuwać, są spaliny, popiół i żużel.

42 Podział i ch-ka paliw

Paliwami nazywamy substancje zawierające określony związek chemiczny lub mieszaniny różnych pierwiastków i związków chemicznych, które mogą wydzielać ciepło (w trakcie spalania), które możemy wykorzystać gospodarczo.

Paliwa dzielimy ze względu na stan skupienia oraz ze względu na pochodzenie:

- naturalne (węgiel kamienny, brunatny, torf, drewno, ropa naftowa, gaz ziemny)
- sztuczne — wytworzone przy przeróbce paliw naturalnych (koks)
- odpadowe — będące produktami ubocznymi różnych procesów.

Podział paliw ze względu na stan skupienia:

- gazowe - gaz ziemny, gaz koksowniczy
- ciekłe - ropa naftowa i produkty jej destylacji
- stałe - węgiel kamienny, węgiel brunatny, torf, antracyt, koks, biomasa, brykiety...

Podstawowymi składnikami paliw są następujące pierwiastki: C , H , S oraz pierwiastki niepalne jak O_2 , N_2 oraz nieznaczne ilości związków mineralnych. Podstawowymi właściwościami paliw określającymi ich przydatność energetyczną są ciepło spalania i wartość opałowa.

43 Spalanie - podstawy, definicja, rodzaje

Spalanie jest to proces utleniania składników palnych paliwa tlenem z powietrza z wydzieleniem ciepła, które możemy wykorzystać gospodarczo. Spalanie paliw jest reakcją egzotermiczną. Produktami spalania są CO_2 , SiO_2 i H_2O w postaci pary. Spalanie dzieli się na:

- **całkowite** - lotne produkty spalania nie zawierają palnych związków gazowych (CO , H_2 , CH_4)
- **zupełne** - stałe produkty spalania (popiół) nie zawierają węgla ani siarki.

44 Spalanie dyfuzyjne i kinetyczne

W zależności od sposobu wymieszania paliwa z powietrzem wyróżnia się:

- **spalanie dyfuzyjne** - występuje przy braku wstępnego wymieszania paliwa z powietrzem, tak spalają się ciała stałe, ciecze swobodnie parujące, czyste gazy na końcu palnika. Spalanie dyfuzyjne jest stosunkowo łatwo przerwać.
- **spalanie kinetyczne** - spalanie homogenicznej mieszaniny paliwa (gazu lub par) z powietrzem, lub w przypadku pseudohomogenicznej mieszaniny np. pyłu ciała stałego lub mgły w powietrzu. Przerwanie spalania kinetycznego jest trudniejsze.

45 Ciepło spalania i wartość opałowa

Ciepło spalania Q_s - ciepło wydzielone podczas spalania całkowitego i zupełnego jednostkowej masy paliwa przy założeniu, że produkty spalania zostały ochłodzone do temperatury początkowej składników biorących udział w spalaniu, a wydzielająca się para wodna uległa w całości skropleniu.

Wartość opałowa Q_i - ciepło wydzielone podczas spalania całkowitego i zupełnego jednostkowej masy paliwa przy założeniu, że produkty spalania zostały ochłodzone do temperatury początkowej składników biorących udział w spalaniu, a wydzielająca się para wodna nie wykropliła się. Zależność pomiędzy ciepłem spalania a wartością opałową przedstawia wzór:

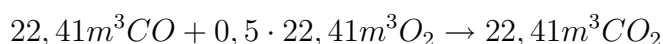
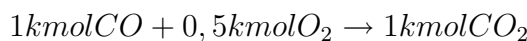
$$Q_s = Q_i + r_0 W$$

gdzie r_0 - ciepło parowania wody (2500 kJ/kg); W - całkowita zawartość pary wodnej w spalinach powstałej ze spalania 1 kg paliwa.

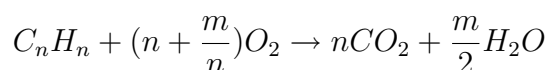
46 Obliczenia stechiometryczne

Obliczenia stechiometryczne oparte są o proste reakcje chemiczne zachodzące podczas procesów utleniania, np. $C + O_2 \rightarrow CO_2$, $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$, $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$. Metoda ta nie uwzględnia wpływu temperatury i ciśnienia na skład spalin.

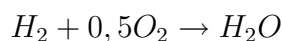
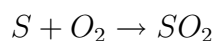
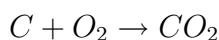
- Dla paliw gazowych :



- dla węglowodorów



- Dla paliw stałych i ciekłych



47 Obliczenia ilości tlenu do spalania

Tlen stechiometryczny jest to minimalna ilość tlenu jakiej należy użyć do całkowitego i zupełnego spalania 1kg paliwa stałego lub ciekłego lub 1m³ paliwa gazowego zgodnie z równaniem stechiometrycznym. Tlen stechiometryczny pomniejsza się o wolny tlen zawarty w paliwie, gdyż bierze on udział w spalaniu i tę różnicę nazywa się **tlaniem teoretycznym**. Dla paliw nie zawierających w swoim składzie wolnego tlenu zawartość tlenu teoretycznego jest równa zawartości tlenu stechiometrycznego.

$$O_t = \frac{1}{2}CO + \frac{1}{2}H_2 + \frac{3}{2}H_2S(n + \frac{m}{4})C_nH_m - O_2, m^3O_2/m^3gazu$$

Powietrze teoretyczne jest to minimalna ilość powietrza jakiej należy użyć do całkowitego i zupełnego spalania 1kg paliwa stałego lub ciekłego lub 1m³ paliwa gazowego. Stosunek ilości powietrza

$$V_o = \frac{100}{21}O_t$$

48 Obliczanie ilości spalin

49 Kontrola procesu spalania

Spalanie powinno przebiegać tak, aby było zupełne i całkowite, a temperatura spalin powinna być ściśle określona. Zależy to od współczynnika nadmiaru powietrza. Z drugiej jednak strony efekt ekonomiczny, który określa sprawność kotła, musi być także wzięty pod uwagę. Do strat zachodzących w kotłach zaliczamy:

- stratę kominową,
- straty niezupełnego i niecałkowitego spalania,
- stratę do otoczenia,
- stratę gorącego żużlu.

Zasadniczymi są straty: kominowa i niezupełnego spalania. Krótko te straty można opisać następująco: jeśli rośnie współczynnik nadmiaru powietrza, to rośnie strata kominowa, czyli ilość ciepła wyniesiona do otoczenia przez komin, natomiast strata niezupełnego spalania maleje wraz ze wzrostem λ . Sumując te dwie straty otrzymujemy ich minimum dla określonego λ . Można powiedzieć, że jest to optymalny współczynnik nadmiaru powietrza.

50 Metody obliczeń stosunku nadmiaru powietrza spalania

Stosunek nadmiaru powietrza - nazywamy stosunek ilości powietrza całkowitego dostarczanego do spalania jednostkowej ilości paliwa do powietrza teoretycznego.

$$\lambda = \frac{V_c}{V_o} = \frac{O_c}{O_t}$$

- Stosunek nadmiaru powietrza gdy znane są składniki spalin

$$\lambda = \frac{21}{79} \frac{100 - \{[CO_2] + [CO] + [O_2]\} - \nu\{[CO_2] + [CO]\}}{\sigma\{[CO_2] + [CO]\}}$$

gdzie $\sigma = \frac{O_t}{O_c}$

51 Temperatura spalania

Temperatura podobnie jak stosunek nadmiaru powietrza jest parametrem procesu spalania. Parametr ten należy traktować jako wskaźnik charakteryzujący:

- rodzaj spalanego paliwa
- warunki procesu spalania
- cechy konstrukcyjne komory spalania

Temperaturę spalania określa się w oparciu o bilans energii komory spalania przy czym w zależności od przyjętych warunków rozróżnia się:

- kalorymetryczną temperaturę spalania
- teoretyczną temperaturę spalania
- rzeczywistą temperaturę spalania

52 Bilans substancji i energii w procesie spalania

53 Metodyka obliczeń zapotrzebowania paliwa

54 Pomiar temperatury z wykorzystaniem czujników termoelektrycznych i rezystancyjnych

W termometrach termoelektrycznych do pomiaru temperatury jest wykorzystywane zjawisko termoelektryczne Seebecka, polegające na powstawaniu zależnej od temperatury siły elektromotorycznej na styku dwóch różnych metali. W prostym obwodzie zawierającym

dwa metale A i B powstaną siły elektromotoryczne. Jeżeli temperatura T_0 jest znana, można określić temperaturę mierząc wypadkową siłę termoelektryczną E ; złącze dwóch metali może być wykorzystane jako czujnik temperatury. Taki czujnik zwany jest termoelementem. Włączenie w obwód termoelementu przyrządu do pomiaru siły termoelektrycznej E oznacza wprowadzenie w ten obwód przynajmniej jeszcze jednego przewodu C , co jednak nie przeszkadza zgodnie z prawem trzeciego metalu.

W termometrach rezystancyjnych (oporowych) wykorzystuje się zależność rezystancji niektórych metali oraz niektórych po.przewodników od temperatury. Zależność taką wykazują prawie wszystkie znane materiały, jednak tylko nieliczne nadają się do wykorzystania w czujnikach temperatury (termometrach). Materiał, z którego ma być wykonany rezystancyjny czujnik temperatury, powinien charakteryzować się stałością charakterystyki rezystancji w funkcji temperatury, dużym współczynnikiem temperaturowym, odpornością na wpływy czynników zewnętrznych. Technologia wytwarzania tego materiału powinna umożliwiać uzyskiwanie czujników o powtarzalnych parametrach. W praktyce pomiarowej najwi.ksze zastosowanie znalazły rezystory metaliczne (drutowe lub cienkowarstwowe - napyłane), platynowe, niklowe i miedziane oraz po.przewodnikowe, wykonane z tlenków żelaza, manganu, litu i tytanu (tzw. termistory).

55 Pomiar temperatury pirometrami

Ogólnie pomiar temperatury pirometrami polega na bezstykowym pomiarze długości fali wysyłanej przez materiał rozgrzany do pewnej temperatury.

55.1 Pirometry radiacyjne

Zwane również **pirometrami całkowitego promieniowania** - promieniowanie jest wysyłane przez ciało, którego temperaturę mierzymy, skupiane za pomocą soczewki, zwierciadła lub światłowodu na detektorze promieniowania. Wskazania są zależne od różnicy temperatury spiny pomiarowej T_p i temperatury odniesienia równej temperaturze obudowy pirometru T_o .

55.2 Pirometry fotoelektryczne

Zasada działania polega na pomiarze sygnału elektrycznego wytwarzanego w fotoelementach, na których skupiane jest promieniowanie temperaturowe wysyłane przez ciało badane. Zakres czułości zależy od ch-ki widmowej fotoelementu. Dzielą się na:

- pirometry monochromatyczne (o wąskiej charakterystyce widmowej fotoelementu)
- pirometry pasmowe (pozostałe)

55.3 Pirometry monochromatyczne z zanikającym włóknem

Zasada działania: kierując pirometr na badany obiekt obserwuje się włókno żarówki, przez które płynie prąd nastawiany za pomocą rezystora regulacyjnego. Prąd żarówki

nastawia się w taki sposób, aby obserwując przez okular filtr czerwony oraz włókno żarówki, obraz włókna zanikł na tle badanego obiektu. Stan taki dowodzi zrównania się **luminancji** obu obiektów. Na wywzorcowanym amperomierzu odczytuje się wartość mierzonej temperatury.

55.4 Pirometry dwubarwowe

Zasada działania pirometru dwubarwowego polega na pomiarze stosunku wartości natężenia promieniowania wysyłanego przez ciało badane w dwóch różnych długościach fal. Pirometry te wzorcowane są dla ciał szarych i dają prawidłowe wskazania temperatury zarówno ciał szarych jak i czarnych. Najprostszy pirometr dwubarwowy składa się z soczewki skupiającej, okularu oraz filtru dwubarwowego.

56 Wyznaczanie Q_s i Q_i węgla kamiennego

57 Wyznaczanie Q_s i Q_i gazu ziemnego

Zasada oznaczenia wartości opałowej w kalorymetrze Junkersa polega na oznaczeniu ciepła, powstającego z kondensacji pary wodnej przy oziębianiu spalin, poprzez pomiar masy wykroplonej wody.

W celu uzyskania poprawnych wyników pomiarów, strumienie gazu i wody dopływające do kalorymetru należy regulować tak, aby różnica temperatur między wypływającą ciepłą wodą i wpływającą zimną wynosiła $10 - 12K$.

Temperaturę wody zimnej wpływającej oraz temperaturę wody ciepłej wypływającej z kalorymetru odczytuje się na termometrach zamontowanych na wlocie i wylocie wody. Spaliny uchodzą wylotem spalin. Temperaturę spalin mierzy się termometrem. Skraplająca się woda przy oziębianiu spalin wypływa z dolnej części kalorymetru.

58 Wyznaczanie λ gazu ziemnego

Jeśli znane są składniki spalin:

$$\lambda = \frac{21}{79} \frac{100 - \{[CO_2] + [CO] + [O_2]\} - \nu \{[CO_2] + [CO]\}}{\sigma \{[CO_2] + [CO]\}}$$