

Charakterystyczne przemiany gazu doskonałego

1. Przemiana politropowa

Przemianą *politropową* nazywamy przemianę o równaniu

$$pv^z = idem \quad (1.1)$$

lub

$$pV^z = idem \quad (1.2)$$

gdzie $v = V/m$.

W równaniach (1.1) i (1.2) z jest wykładnikiem politropy. Podstawowe przemiany gazu doskonałego można rozpatrywać jako szczególne przypadki politropy. W zależności od wartości z politropa może być przemianą przy stałym ciśnieniu, przemianą przy stałej objętości, przemianą przy stałej temperaturze, czy przemianą przy stałej entropii.

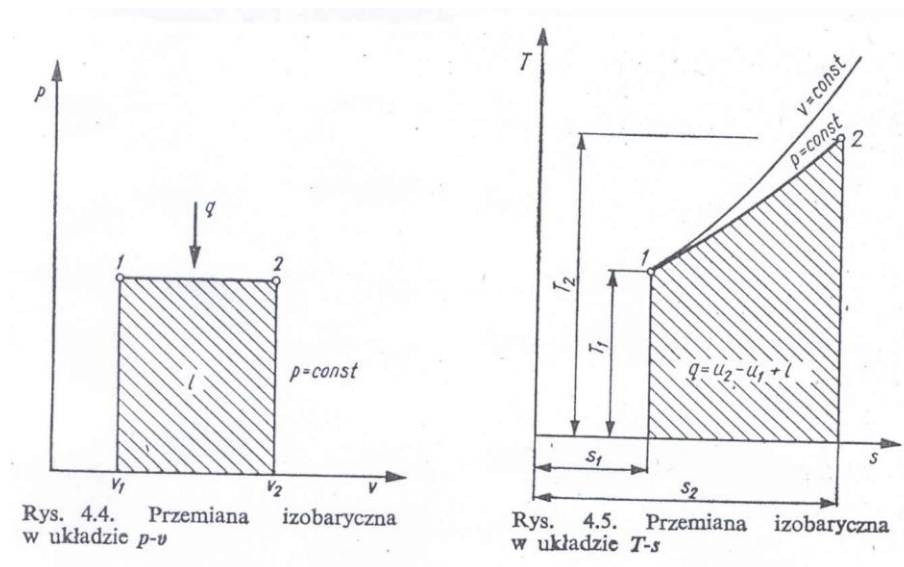
2. Izobara

Dla wykładnika politropy $z = 0$ jest

$$pv^0 = p \cdot 1 = p = idem$$

czyli politropa jest w tym przypadku przemianą przy stałym ciśnieniu nazywaną *izobarą*. Równanie przemiany izobarycznej ma postać

$$p = idem \quad (2.1)$$



Na rys. 4.4 i 4.5 przedstawiono ekspansję izobaryczną. Podczas ekspansji izobarycznej zwiększa się objętość gazu oraz wzrasta temperatura. Ciepło jest doprowadzane do gazu a praca wyprowadzana. Na rys. 4.5 dla porównania narysowano też przemianę izochoryczną, która jest linią bardziej stromą. Funkcja $T(s)$ dla $v = idem$ lub $p = idem$ jest funkcją wykładniczą.

Przemianę izobaryczną można zrealizować w cylindrze zamkniętym przesuwным tłokiem, na który działa stała siła, doprowadzając (ekspansja) lub odprowadzając (kompresja) ciepło.

Termiczne równanie stanu dla początku 1 przemiany izobarycznej 1-2

$$pv_1 = RT_1 \quad (2.2)$$

Termiczne równanie stanu dla końca 2 przemiany izobarycznej 1-2

$$pv_2 = RT_2 \quad (2.3)$$

Po podzieleniu równania (2.3) przez równanie (2.2) dostajemy

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (2.4)$$

Równanie (2.4) można przekształcić do postaci

$$\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2} \quad (2.5)$$

Z równania (2.5) wynika, że objętość gazu podgrzewanego izobarycznie wzrasta proporcjonalnie do temperatury. Jeżeli temperatura gazu wzrośnie dwukrotnie, to również jego objętość wzrośnie dwukrotnie.

Jednostkową pracę bezwzględną przemiany wyznaczymy z ogólnej zależności

$$l_{1-2} = \int_{v_1}^{v_2} p(v)dv \quad [\text{J/kg}] \quad (2.6)$$

gdzie dla przemiany izobarycznej funkcja $p(v)$ ma postać

$$p = \text{idem} \quad (2.7)$$

Po podstawieniu (2.7) do równania (2.6) i scałkowaniu otrzymujemy

$$l_{1-2} = p(v_2 - v_1) \quad (2.8)$$

Równanie (2.8) jest słuszne dla dowolnego czynnika termodynamicznego, czyli także dla gazów rzeczywistych, cieczy i ciał stałych.

Jednostkowa praca techniczna przemiany

$$l_{1-2} = - \int_{p_1}^{p_2} v(p) dp = - \int_p^p v(p) dp = 0 \quad [\text{J/kg}] \quad (2.9)$$

Ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu, c_p , ma dla określonego gazu doskonałego wartość stałą. Stąd jednostkowe ciepło przemiany izobarycznej jest równe

$$q_{1-2} = c_p(T_2 - T_1) \quad [\text{J/kg}] \quad (2.10)$$

Przyrost właściwej energii wewnętrznej

$$\Delta u_{1-2} = c_v(T_2 - T_1) \quad [\text{J/kg}] \quad (2.11)$$

Zależność (2.11) jest słuszna dla dowolnej przemiany gazu doskonałego, ponieważ energia wewnętrzna jest parametrem stanu, czyli jej przyrost nie zależy od rodzaju przemiany.

Przyrost entalpii właściwej

$$\Delta i_{1-2} = c_p(T_2 - T_1) \quad [\text{J/kg}] \quad (2.12)$$

Zależność (2.12) jest słuszna dla dowolnej przemiany gazu doskonałego, ponieważ entalpia jest parametrem stanu, czyli jej przyrost nie zależy od rodzaju przemiany.

Pierwsza postać pierwszej zasady termodynamiki (I ZT)

$$q_{1-2} = \Delta u_{1-2} + l_{1-2} \quad (2.13)$$

Druga postać pierwszej zasady termodynamiki

$$q_{1-2} = \Delta i_{1-2} + l_{1-2} = \Delta i_{1-2} \quad (2.14)$$

Przyrost entropii właściwej można obliczyć z zależności

$$\Delta s_{1-2} = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \quad (2.15)$$

lub

$$\Delta s_{1-2} = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} \quad [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \quad (2.16)$$

Zależności (2.15) i (2.16) są słuszne dla dowolnej przemiany gazu doskonałego, ponieważ entropia jest parametrem stanu, czyli jej przyrost nie zależy od rodzaju przemiany. Dla przemiany izobarycznej równanie (2.16) upraszcza się do postaci

$$\Delta s_{1-2} = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p}{p} = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (2.17)$$

Ponieważ równanie (2.17) wykorzystuje zależność $p_1 = p_2 = p$, jego stosowalność została ograniczona do przemiany izobarycznej gazu doskonałego.

Dla całkowitej ilości substancji w układzie

$$\begin{aligned} L_{1-2}[J] &= m[\text{kg}] \cdot l_{1-2}[J/\text{kg}] \\ &= n[\text{kmol}] \cdot l_{1-2}[J/\text{kmol}] \\ &= V_u[\text{um}^3] \cdot l_{1-2}[J/\text{um}^3] \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$L_{t1-2} = ml_{t1-2} \quad (2.19)$$

$$Q_{1-2} = mq_{1-2} \quad (2.20)$$

$$\Delta U_{1-2} = m\Delta u_{1-2} \quad (2.21)$$

$$\Delta I_{1-2} = m\Delta i_{1-2} \quad (2.22)$$

$$\Delta S_{1-2} = m\Delta s_{1-2} \quad (2.23)$$

3. Izochora

$$pv^z = idem \quad (3.1)$$

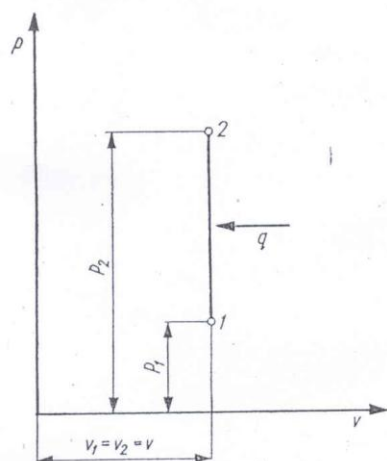
$$\frac{1}{p^z v} = idem \quad (3.2)$$

Wykładnik politropy

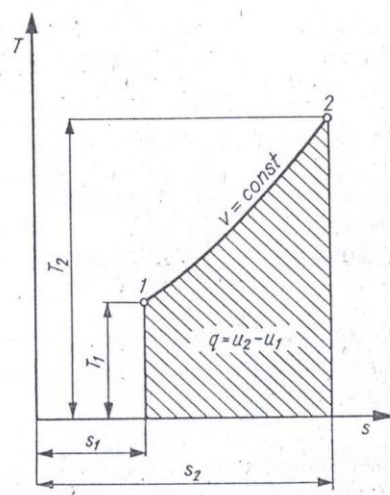
$$z = \infty \quad (3.3)$$

Równanie przemiany

$$v = idem \quad (3.4)$$



Rys. 4.2. Przemiana izochoryczna w układzie $p-v$



Rys. 4.3. Przemiana izochoryczna w układzie $T-s$

Przemiana przedstawiona na rys. 4.2 oraz 4.3 jest sprężaniem izochorycznym, ponieważ podczas przemiany wzrasta ciśnienie. Przemianę izochoro-

ryczną można zrealizować w zbiorniku o stałej objętości doprowadzając do czynnika (sprężanie) lub wyprowadzając (rozprężanie) ciepło.

Termiczne równanie stanu dla stanu początkowego 1

$$p_1 v = RT_1 \quad (3.5)$$

Termiczne równanie stanu dla stanu końcowego 2

$$p_2 v = RT_2 \quad (3.6)$$

Po podzieleniu stronami równania (3.6) przez równanie (3.5) dostajemy

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (3.7)$$

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (3.8)$$

Z równania (3.8) wynika, że ciśnienie gazu podgrzewanego izochorycznie wzrasta proporcjonalnie do temperatury. Jeżeli temperatura gazu wzrośnie dwukrotnie, to również jego ciśnienie wzrośnie dwukrotnie.

Jednostkowa praca bezwzględna przemiany

$$l_{1-2} = \int_{v_1}^{v_2} p(v) dv = \int_v^v p(v) dv = 0 \quad [\text{J/kg}] \quad (3.9)$$

Jednostkowa praca techniczna przemiany

$$l_{t1-2} = - \int_{p_1}^{p_2} v(p) dp = v(p_1 - p_2) \quad [\text{J/kg}] \quad (3.10)$$

Praca techniczna dana równaniem (3.10) nie ma sensu fizycznego dla pojedynczej przemiany. Pracę taką należałoby doprowadzić (w przypadku sprężania) do maszyny przepływowej, aby przetłoczyć czynnik ze zbiornika, w którym panuje ciśnienie p_1 , do zbiornika, w którym panuje ciśnienie p_2 . W przypadku przemiany izochorycznej wzrost ciśnienia wynika nie ze zmiany objętości, lecz ze zmiany temperatury (podgrzanie gazu od temperatury T_1 do temperatury T_2).

Jednostkowe ciepło przemiany

$$q_{1-2} = c_v(T_2 - T_1) \quad [\text{J/kg}] \quad (3.11)$$

Przyrost właściwej energii wewnętrznej

$$\Delta u_{1-2} = c_v(T_2 - T_1) \quad [\text{J/kg}] \quad (3.12)$$

Przyrost entalpii właściwej

$$\Delta i_{1-2} = c_p(T_2 - T_1) \quad [\text{J/kg}] \quad (3.13)$$

Pierwsza zasada termodynamiki (I ZT)

$$q_{1-2} = \Delta u_{1-2} + l_{1-2} = \Delta u_{1-2} \quad (3.14)$$

$$q_{1-2} = \Delta i_{1-2} + l_{1-2} \quad (3.15)$$

Przyrost entropii właściwej

$$\begin{aligned} \Delta s_{1-2} &= c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \\ &= c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v}{v} = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} \end{aligned} \quad [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \quad (3.16)$$

$$\Delta s_{1-2} = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} \quad [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \quad (3.17)$$

4. Izoterma

$$pv^z = idem \quad (4.1)$$

Niech wykładnik politropy będzie równy

$$z = 1 \quad (4.2)$$

Wówczas równanie przemiany politropowej (4.1) ma postać

$$pv = idem \quad (4.3)$$

Termiczne równanie stanu dla początku 1 i końca 2 rozważanej przemiany

$$p_1 v_1 = RT_1 \quad (4.4)$$

$$p_2 v_2 = RT_2 \quad (4.5)$$

Z równania (4.3) wynika, że lewe strony równań (4.4) i (4.5) są sobie równe

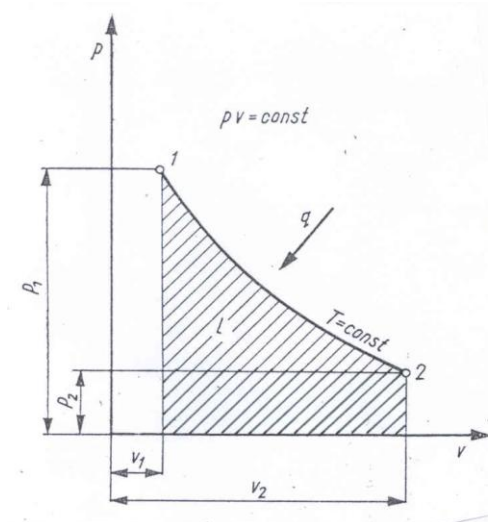
$$p_1 v_1 = p_2 v_2 \quad (4.6)$$

stąd również prawe strony tych równań są sobie równe

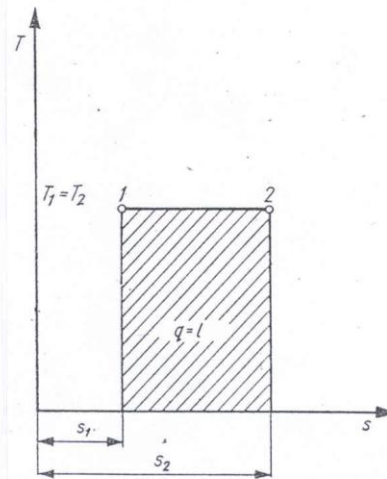
$$T_1 = T_2 = T \quad (4.7)$$

czyli przemiana politropowa z wykładnikiem politropy jest równy jedności jest przemianą, podczas której nie zmienia się temperatura gazu. Przemiana taka nazywana jest *izotermą*.

$$T = idem \quad (4.8)$$



Rys. 4.6. Przemiana izotermiczna w układzie $p-v$



Rys. 4.7. Przemiana izotermiczna w układzie $T-s$

Jednostkowa praca bezwzględna przemiany

$$l_{1-2} = \int_{v_1}^{v_2} p(v) dv \quad (4.9)$$

Z równania (4.6) wyznaczamy funkcję $p(v)$

$$p(v) = \frac{p_1 v_1}{v} \quad (4.10)$$

Prawą stronę równania (4.10) podstawiamy do równania (4.9) i całkujemy

$$l_{1-2} = \int_{v_1}^{v_2} \frac{p_1 v_1}{v} dv = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (4.11)$$

Jednostkowa praca techniczna przemiany

$$l_{1-2} = - \int_{p_1}^{p_2} v(p) dp \quad (4.12)$$

Z równania (4.6) wyznaczamy funkcję $v(p)$

$$v(p) = \frac{p_1 v_1}{p} \quad (4.13)$$

Prawą stronę równania (4.13) podstawiamy do równania (4.12) i całkujemy

$$l_{1-2} = - \int_{p_1}^{p_2} \frac{p_1 v_1}{p} dp = p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (4.14)$$

Z równania (4.6) wynika, że

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1} \quad (4.15)$$

Podstawiamy prawą stronę równania (4.15) do prawej strony równania (4.14)

$$l_{1-2} = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (4.16)$$

Z porównania (4.16) z (4.11) wynika, że

$$l_{1-2} = l_{1-2} \quad (4.17)$$

Ciepło właściwe przemiany izotermicznej

$$c_T = \frac{q_{1-2}}{T_2 - T_1} = \frac{q_{1-2}}{T - T} = \infty \quad (4.18)$$

Przyrost właściwej energii wewnętrznej

$$\Delta u_{1-2} = c_v (T_2 - T_1) = c_v (T - T) = 0 \quad (4.19)$$

Przyrost entalpii właściwej

$$\Delta i_{1-2} = c_p (T_2 - T_1) = c_p (T - T) = 0 \quad (4.20)$$

Pierwsza zasada termodynamiki (I ZT)

$$q_{1-2} = \Delta u_{1-2} + l_{1-2} = l_{1-2} \quad (4.21)$$

$$q_{1-2} = \Delta i_{1-2} + l_{1-2} = l_{1-2} \quad (4.22)$$

Przyrost entropii właściwej

$$\begin{aligned} \Delta s_{1-2} &= c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \\ &= c_v \ln \frac{T}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1} = R \ln \frac{v_2}{v_1} \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} \Delta s_{1-2} &= c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} \\ &= c_p \ln \frac{T}{T} - R \ln \frac{p_2}{p_1} = R \ln \frac{p_1}{p_2} \end{aligned} \quad (4.24)$$

5. Adiaterma odwracalna - izentropa

$$pv^z = idem \quad (5.1)$$

Wykładnik politropy

$$z = \frac{c_p}{c_v} = \kappa \quad (5.2)$$

Równanie przemiany

$$pv^\kappa = \text{idem} \quad (5.3)$$

Z (5.3) dla dwóch dowolnych stanów

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^\kappa \quad (5.4)$$

Termiczne równanie stanu

$$p_1 v_1 = RT_1 \quad (5.5)$$

$$p_2 v_2 = RT_2 \quad (5.6)$$

(5.6)/(5.5)

$$\frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (5.7)$$

(5.4) do (5.7)

$$\left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\kappa-1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (5.8)$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \quad (5.9)$$

(5.9) do (5.7)

$$\frac{p_2}{p_1} \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{-\frac{1}{\kappa-1}} = \frac{T_2}{T_1} \quad (5.10)$$

$$(5.10) // \frac{\kappa-1}{\kappa}$$

$$\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \frac{T_2}{T_1} \quad (5.11)$$

Jednostkowa praca bezwzględna przemiany

$$l_{1-2} = \int_{v_1}^{v_2} p(v) dv \quad (5.12)$$

Z (5.4)

$$p(v) = \frac{p_1 v_1^\kappa}{v^\kappa} \quad (5.13)$$

Prawą stronę równania (5.13) podstawiamy do prawej strony równania (5.12) za funkcję $p(v)$

$$l_{1-2} = \int_{v_1}^{v_2} \frac{p_1 v_1^\kappa}{v^\kappa} dv = \frac{p_1 v_1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\kappa-1} \right] \quad (5.14)$$

Jednostkowa praca techniczna przemiany

$$l_{1-2} = - \int_{p_1}^{p_2} v(p) dp \quad (5.15)$$

Z (5.4)

$$v(p) = \frac{p_1^\kappa v_1}{p^\kappa} \quad (5.16)$$

(5.16) do (5.15)

$$\begin{aligned} l_{1-2} &= - \int_{p_1}^{p_2} \frac{p_1^\kappa v_1}{p^\kappa} dp = \frac{\kappa p_1 v_1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] \\ &= \frac{\kappa p_1 v_1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\kappa-1} \right] \end{aligned} \quad (5.17)$$

Porównanie (5.14) z (5.17) prowadzi do zależności

$$l_{1-2} = \kappa l_{1-2} \quad (5.18)$$

Dla gazów doskonałych jest

$$\begin{cases} c_p - c_v = R \\ \frac{c_p}{c_v} = \kappa \end{cases} \quad (5.19)$$

Po rozwiązaniu układu (5.19) ze względu na c_p i c_v otrzymujemy

$$c_v = \frac{R}{\kappa - 1} \quad (5.20)$$

$$c_p = \frac{\kappa R}{\kappa - 1} \quad (5.21)$$

Przyrost entropii właściwej

$$\Delta s_{1-2} = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (5.22)$$

(5.8) do (5.22)

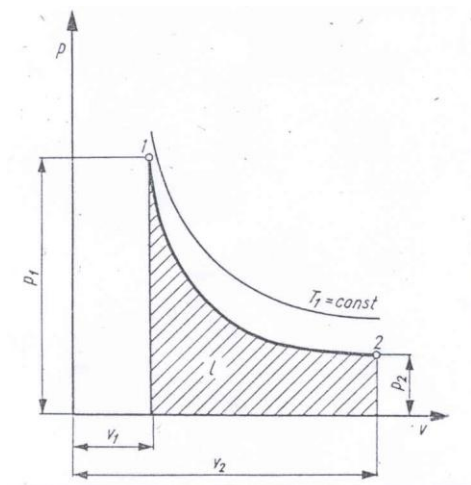
$$\begin{aligned}\Delta s_{1-2} &= c_v \ln \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\kappa-1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \\ &= -c_v (\kappa - 1) \ln \frac{v_2}{v_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}\end{aligned}\quad (5.23)$$

Po uwzględnieniu (5.20) dostajemy

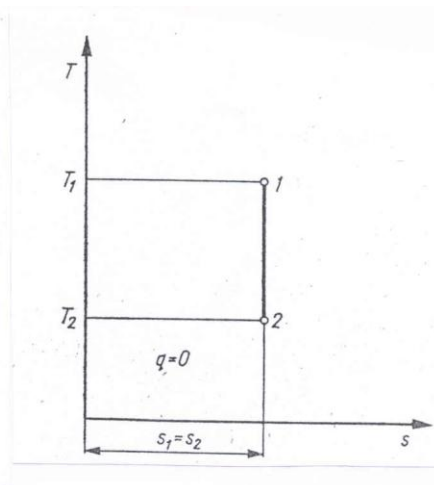
$$\Delta s_{1-2} = -R \ln \frac{v_2}{v_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} = 0 \quad (5.24)$$

czyli

$$s_2 = s_1 = s = \text{idem} \quad (5.25)$$



Przemiana adiatermiczna odwracalna (izentropowa) w układzie p - v .



Przemiana adiatermiczna odwracalna (izentropowa) w układzie T - s .

Ciepło przemiany izentropowej

$$q_{1-2} = \int_{s_1}^{s_2} T(s) ds = \int_s^s T(s) ds = 0 \quad (5.26)$$

Ciepło właściwe przemiany izentropowej

$$c_s = \frac{q_{1-2}}{T_2 - T_1} = \frac{0}{T_2 - T_1} = 0 \quad (5.27)$$

Przyrost właściwej energii wewnętrznej

$$\Delta u_{1-2} = c_v (T_2 - T_1) \quad (5.28)$$

Przyrost entalpii właściwej

$$\Delta i_{1-2} = c_p (T_2 - T_1) \quad (5.29)$$

Pierwsza zasada termodynamiki (I ZT)

$$q_{1-2} = \Delta u_{1-2} + l_{1-2} \quad (5.30)$$

$$q_{1-2} = \Delta i_{1-2} + l_{1-2} \quad (5.31)$$

Po uwzględnieniu (5.26)

$$l_{1-2} = -\Delta u_{1-2} = u_1 - u_2 \quad (5.32)$$

Z (5.32)

$$l_{1-2} = c_v(T_1 - T_2) = \frac{RT_1}{\kappa - 1} \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \quad (5.33)$$

(5.11) do (5.33)

$$l_{1-2} = \frac{RT_1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right] = \frac{p_1 v_1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right] \quad (5.34)$$

6. Politropa - ogólnie

$$pv^z = idem \quad (6.1)$$

Z (6.1) dla dwóch dowolnych stanów

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^z \quad (6.2)$$

Termiczne równanie stanu

$$p_1 v_1 = RT_1 \quad (6.3)$$

$$p_2 v_2 = RT_2 \quad (6.4)$$

(6.4)/(6.3)

$$\frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (6.5)$$

(6.2) do (6.5)

$$\left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{z-1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (6.6)$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{z-1}} \quad (6.7)$$

(6.7) do (6.5)

$$\frac{p_2}{p_1} \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{-\frac{1}{z-1}} = \frac{T_2}{T_1} \quad (6.8)$$

$$(6.8) // \frac{z-1}{z}$$

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{z-1}{z}} = \frac{T_2}{T_1} \quad (6.9)$$

Jednostkowa praca bezwzględna przemiany

$$l_{1-2} = \int_{v_1}^{v_2} p(v) dv \quad (6.10)$$

Z (6.2)

$$p(v) = \frac{p_1 v_1^z}{v^z} \quad (6.11)$$

(6.11) do (6.10)

$$l_{1-2} = \int_{v_1}^{v_2} \frac{p_1 v_1^z}{v^z} dv = \frac{p_1 v_1}{z-1} \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{z-1} \right] \quad (6.12)$$

(6.6) i (6.3) do (6.12)

$$l_{1-2} = \frac{RT_1}{z-1} \left[1 - \frac{T_2}{T_1} \right] = \frac{R}{z-1} (T_1 - T_2) \quad (6.13)$$

Jednostkowa praca techniczna przemiany

$$l_{t1-2} = - \int_{p_1}^{p_2} v(p) dp \quad (6.14)$$

Z (6.2)

$$v(p) = \frac{p_1^{\frac{1}{z}} v_1}{p^{\frac{1}{z}}} \quad (6.15)$$

(6.15) do (6.14)

$$l_{t1-2} = - \int_{p_1}^{p_2} \frac{p_1^{\frac{1}{z}} v_1}{p^{\frac{1}{z}}} dp = \frac{z p_1 v_1}{z-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{z-1}{z}} \right] \quad (6.16)$$

Porównanie (6.12) z (6.16) przy uwzględnieniu (6.2) daje

$$l_{t1-2} = z l_{1-2} \quad (6.17)$$

Przyrost właściwej energii wewnętrznej

$$\Delta u_{1-2} = c_v (T_2 - T_1) \quad (6.18)$$

Przyrost entalpii właściwej

$$\Delta i_{1-2} = c_p(T_2 - T_1) \quad (6.19)$$

Ciepło przemiany

$$q_{1-2} = c(T_2 - T_1) \quad (6.20)$$

gdzie c jest ciepłem właściwym przemiany politropowej.

Pierwsza zasada termodynamiki (I ZT)

$$q_{1-2} = \Delta u_{1-2} + l_{1-2} \quad (6.21)$$

$$q_{1-2} = \Delta i_{1-2} + l_{1-2} \quad (6.22)$$

(6.20) i prawa strona (6.13) do (6.21)

$$c(T_2 - T_1) = c_v(T_2 - T_1) + \frac{R}{z-1}(T_1 - T_2) \quad (6.23)$$

(6.23)/($T_2 - T_1$)

$$c = c_v - \frac{R}{z-1} \quad (6.24)$$

Wniosek: ciepło właściwe politropy jest wielkością stałą.

$$R = c_v(\kappa - 1) \text{ do (6.24)}$$

$$c = c_v \frac{z - \kappa}{z - 1} \quad (6.25)$$

7. Ciepło właściwe politropy gazu doskonałego

$$c = c_v \frac{z - \kappa}{z - 1} \quad (7.1)$$

2. $z = 0$ ($p = idem$, izobara)

$$c = c_v \frac{0 - \kappa}{0 - 1} = c_v \kappa = c_p \quad (7.2)$$

2. $z = \infty$ ($v = idem$, izochora)

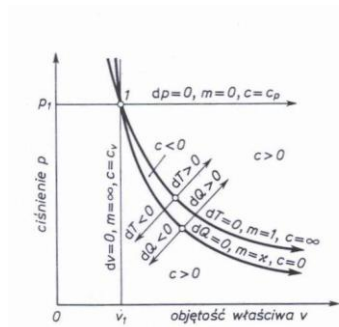
$$c = c_v \frac{1 - \frac{\kappa}{z}}{1 - \frac{1}{z}} = c_v \quad (7.3)$$

3. $z = 1$ ($T = idem$, izoterma)

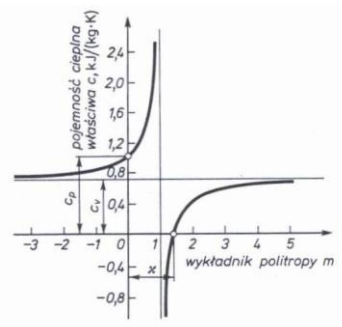
$$c = c_v \frac{z - \kappa}{z - 1} = c_v \frac{\kappa - z}{1 - z} = c_v \frac{\kappa - 1}{1 - 1} = \infty \quad (7.4)$$

4. $z = \kappa$ ($s = idem$, izentropa)

$$c = c_v \frac{z - \kappa}{z - 1} = c_v \frac{\kappa - \kappa}{\kappa - 1} = 0 \quad (7.5)$$

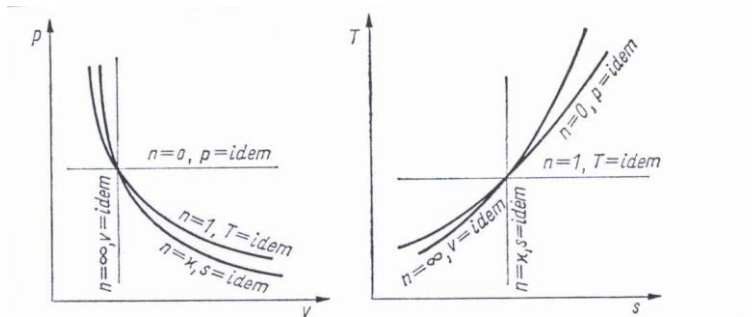


Rys. 5.14. Znak pojemności cieplnej właściwej w przemianach politropowych



Rys. 5.15. Pojemność cieplna właściwa powietrza w przemianach politropowych

Na rys. 5.14 oraz 5.15 wykładnik politropy jest oznaczony jako m .



Rys. 4.9. Politropy o różnych wykładnikach gazów doskonałych o stałym ciepłe właściwym na wykresach o współrzędnych $p-v$ oraz $T-s$

Na rys. 4.9 wykładnik politropy jest oznaczony jako n .