

**Prof. WSTE dr hab. inż. Benedykt LITKE**

Wyższa Szkoła Techniczno-Ekonomiczna w Szczecinie, Wydział Transportu Samochodowego  
Higher School of Technology and Economics in Szczecin, Faculty of Motor Transport

## PRZEMIANY GAZÓW DOSKONAŁYCH I PÓLDOSKONAŁYCH

### Streszczenie

**Wstęp i cele:** W pracy opisano przemiany gazów doskonałych i półdoskonałych. Dla przemiany izochorycznej, izobarycznej, izotermicznej, adiabatycznej, izentropowej oraz adiabatycznej nieodwracalnej podano podstawowe równania, zależności i parametry charakterystyczne. Wszystkie przemiany zilustrowano odpowiednimi wykresami.

**Materiał i metody:** Materiał stanowią źródła z literatury z zakresu termodynamiki. W pracy zastosowano metodę analizy teoretycznej.

**Wyniki:** Dla przemiany izochorycznej, izobarycznej, izotermicznej, adiabatycznej, izentropowej oraz adiabatycznej nieodwracalnej opracowano m.in. równania przemian, ciepło przemiany, pracę bezwzględną, pracę techniczną. Ponadto dla przemiany izochorycznej i izotermicznej podano przyrost entropii.

**Wniosek:** Opracowane równania transformacji gazów jak również zależności ich charakteryzujących dla przemian izochorycznej, izobarycznej, izotermicznej, adiabatycznej, izentropowej oraz adiabatycznej nieodwracalnej pozwalają na dokonanie nie tylko wielu porównań lecz również na utrwalanie istniejących różnic.

**Słowa kluczowe:** Gazy doskonałe i półdoskonałe, przemiany gazów, równania przemian, ciepło przemian, praca techniczna i bezwzględna.

(Otrzymano: 26.04.2017; Zrecenzowano: 30.04.2017; Zaakceptowano: 05.05.2017)

## TRANSFORMATIONS OF PERFECT AND SEMI-PERFECT GASES

### Abstract

**Introduction and aim:** The paper describes the transformation of perfect and semi-perfect gases. For isochoric, isobaric, isothermal, adiabatic, isentropic and adiabatic irreversible transformation have been given some basic equations, relationships and characteristic parameters. All transformations are illustrated by appropriate graphs.

**Material and methods:** Material covers some sources based on the literature in the field of thermodynamics. The method of theoretical analysis has been shown in the paper.

**Results:** For isochoric, isobaric, isothermal, adiabatic, isentropic and adiabatic irreversible transformation have been elaborated some transformational equations, heat of change, unreliability, technical work. In addition, for entropy and isothermal transformation some entropy has been given in the considerations.

**Conclusion:** The elaborated gas transformation equations as well as their characteristic dependencies for isochoric, isobaric, isothermal, adiabatic, isentropic and adiabatic irreversible transformations allow not only many comparisons but also the consolidation of existing differences.

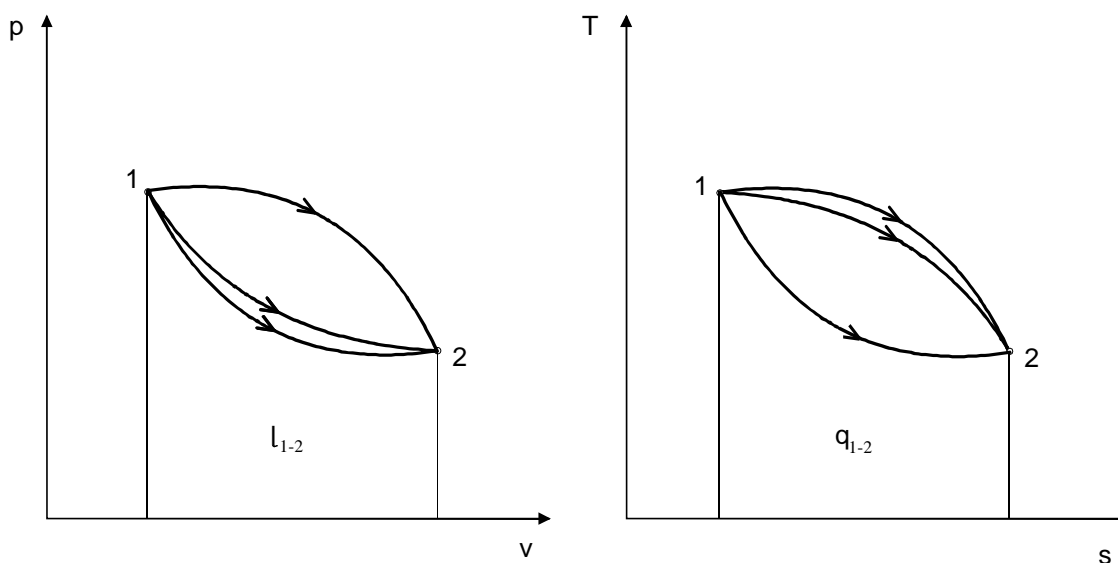
**Keywords:** Perfect and semi-perfect gases, gas transformation, transformation equations, heat transfer, technical and absolute work.

(Received: 26.04.2017; Revised: 30.04.2017; Accepted: 05.05.2017)

## 1. Wstęp

Stan termodynamiczny różnic określają jednoznacznie parametry termodynamiczne. Zmiana parametrów układu jest równoznaczna ze zmianą stanu. Można przyjąć, że każdej wartości jednego z parametrów odpowiada tylko jedna wartość pozostałych. Każdy rodzaj przemiany może być opisany charakterystycznym dla niej równaniem przemiany, w którym występują dowolne dwa parametry np.  $p, v$ ;  $T, p$ ;  $T, v$ ;  $T, s$  lub inne. Przebieg przemiany może być przedstawiony również w postaci wykresu np. w układzie  $p-v$ ,  $T-s$  lub innym.

Przemiany między dwoma stanami (Rys. 1) mogą przebiegać nieskończenie wieloma sposobami. Od przebiegu przemiany między stanami 1 i 2 zależy wartość wykonanej pracy lub wymienionego ciepła (pola pod krzywymi przemian). Należy więc pamiętać, że *praca i ciepło nie są parametrami stanu*, gdyż zależą nie tylko od stanu początkowego i końcowego przemiany, lecz i od drogi tej przemiany. W matematycznym ujęciu zagadnienia, wyrażenia  $dl$  i  $dq$  nie są różniczkami zupełnymi funkcji  $l$  oraz  $q$ .



Rys. 1. Przebiegi różnych rodzajów przemian między stanami 1 i 2

Źródło: Opracowanie Autora

Fig. 1. The graphs of various kinds of transformations between states 1 and 2

Source: Elaboration of the Author

Spośród wielu możliwych rodzajów można wyodrębnić przemiany charakterystyczne przebiegające przy pewnych szczególnych warunkach. W dalszej części będą rozpatrzone najczęściej stosowane charakterystyczne przemiany 1 kg substancji. W każdym przypadku należy określić:

- definicję i warunki przemiany,
- równania wiążące parametry stanu,
- przebieg przemian na wykresach  $p-v$  oraz  $T-s$ ,
- pracę bezwzględną i techniczną oraz ciepło przemiany,
- przyrosty energii wewnętrznej, entalpii i entropii.

Do określenia wymienionych wyżej wielkości zostaną wykorzystane:

- równania pierwszej zasady termodynamiki dla układów zamkniętych i otwartych,
- równania stanu gazów,
- wzory do obliczania energii wewnętrznej i entalpii spoczynkowej,
- zależności służące do określenia przyrostu entropii.

Charakterystyczna przemiana wyróżnia się tym, że przebiega przy jakimś założeniu, np. przemiana przy stałej temperaturze nazwana izotermiczną. W tym przypadku stwierdzenie  $T = \text{const}$  dotyczy rodziny przemian izotermicznych, tj. o różnych wartościach  $T$ .

## 2. Przemiana izochoryczna

Podczas przemiany izochorycznej objętość właściwa (może dotyczyć również skończonej objętości  $V$ ) jest stała:

$$v = \text{const.} \quad (1)$$

więc

$$dv = 0, \quad (2)$$

oraz

$$v_2 = v_1 = v. \quad (3)$$

❖ Równanie stanu gazów doskonałych

$$\frac{p_1 \cdot v_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot v_2}{T_2}, \quad (4)$$

a po uproszczeniu przyjmie postać

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (5)$$

lub

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (6)$$

Równania (5) i (6) wiążą parametry w przemianie izochorycznej.

❖ Ciepło przemiany

Według równania pierwszej zasady termodynamiki

$$dq = du + p \cdot dv = du \quad (7)$$

dla przemiany skończonej

$$q_{1-2} = u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1). \quad (8)$$

Doprowadzone ciepło zwiększa energię wewnętrzną czynnika.

❖ Praca bezwzględna

$$dl = p \cdot dv = 0. \quad (9)$$

❖ Praca techniczna

$$dl_t = -v \cdot dp, \quad (10)$$

a po scałkowaniu otrzymujemy

$$l_{t_{1-2}} = v \cdot (p_1 - p_2). \quad (11)$$

❖ Przyrost entropii

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (12)$$

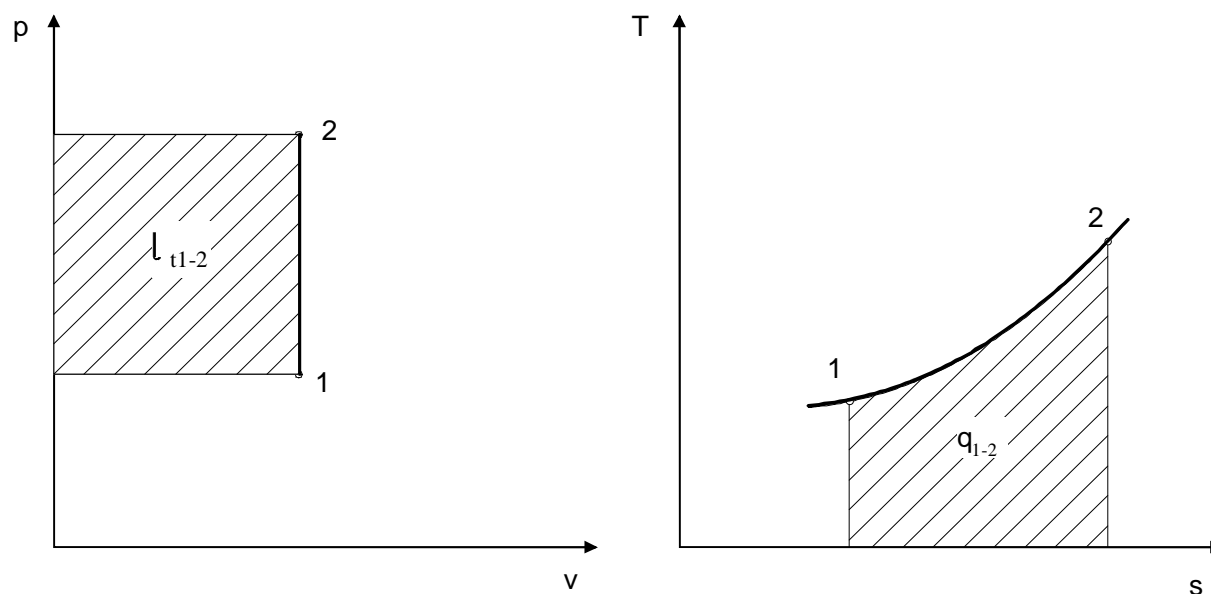
Ponieważ

$$v_2 = v_1, \quad (13)$$

to

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (14)$$

Na wykresie o współrzędnych T-s (Rys. 2), izochora jest krzywą logarymiczną.



Rys. 2. Przemiana izochoryczna na wykresach o współrzędnych p-v oraz T-s

Źródło: Opracowanie Autora

Fig. 2. Isochoric process in the graphs with coordinates p-v and T-s

Source: Elaboration of the Author

### 3. Przemiana izobaryczna

W przemianie izobarycznej ciśnienie jest stałe:

$$p = \text{const.} \quad (15)$$

więc

$$dp = 0, \quad (16)$$

oraz

$$p_2 = p_1 = p. \quad (17)$$

❖ Równanie izobary ma postać:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (18)$$

❖ Ciepło przemiany:

$$dq = di - v \cdot dp = di, \quad (19)$$

$$q_{1-2} = i_2 - i_1 = c_p(T_2 - T_1). \quad (20)$$

Wymienione ciepło zmienia entalpię czynnika. Praca bezwzględna określona jest wzorem:

$$dl = p \cdot dv, \quad (21)$$

$$l_{1-2} = p(v_2 - v_1). \quad (22)$$

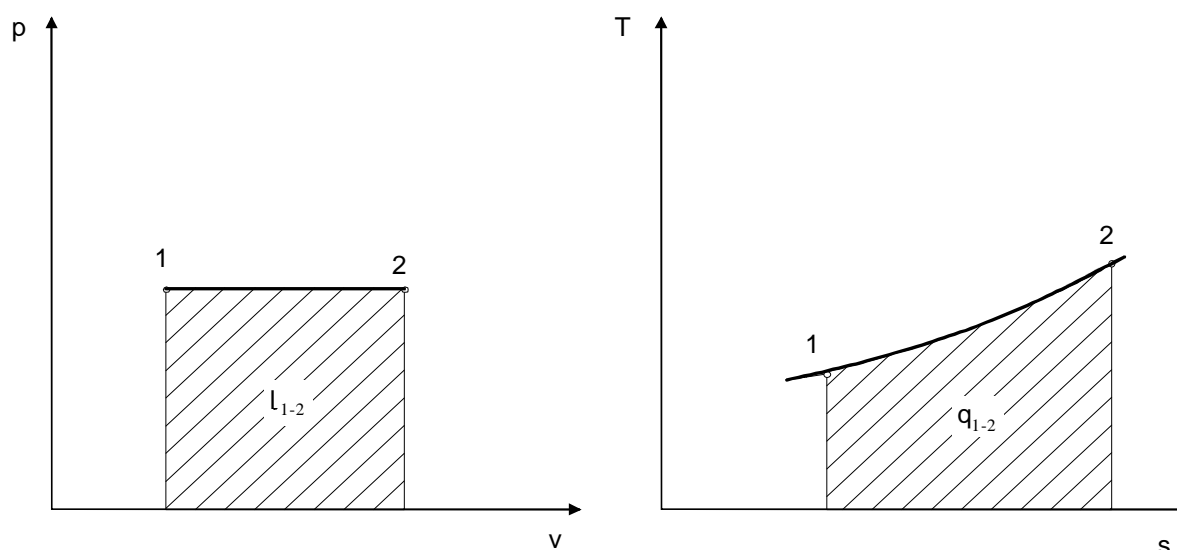
❖ Praca techniczna

$$dl_t = -v \cdot dp = 0. \quad (23)$$

❖ Przyrost entropii

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (24)$$

Izobara na wykresie T-s (Rys. 3) jest krzywą logarytmiczną, przebiegająca mniej stromo niż izochora.



Rys. 3. Przemiana izobaryczna na wykresach o współrzędnych p-v oraz T-s

Źródło: Opracowanie Autora

Fig. 3. Isobaric process in the graphs with coordinates p-v and T-s

Source: Elaboration of the Author

#### 4. Przemiana izotermiczna

Podczas przemiany izotermicznej temperatura gazu jest stała:

$$T = \text{const}. \quad (25)$$

więc

$$dT = 0 \quad (26)$$

oraz

$$T_2 = T_1 = T. \quad (27)$$

❖ Równanie izotermy

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 = R \cdot T. \quad (28)$$

Izoterma jest na wykresie p-v hiperbolą równoosiową.

❖ Ciepło przemiany

$$dq = c_v \cdot dT + dl = dl, \quad (29)$$

$$q_{1-2} = l_{1-2}. \quad (30)$$

❖ Praca bezwzględna

$$l_{1-2} = \int_1^2 p \cdot dv. \quad (31)$$

Z równania izotermi

$$p_1 \cdot v_1 = p_2 \cdot v_2 = p \cdot v \quad (32)$$

wynika, że

$$p = \frac{p_1 \cdot v_1}{v}. \quad (33)$$

Po podstawieniu do całki

$$l_{1-2} = \int_1^2 p_1 v_1 \frac{dv}{v} = p_1 v_1 \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = R \cdot T \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (34)$$

Ponadto według (30) praca bezwzględna jest równa ciepłu przemiany

$$l_{1-2} = q_{1-2}. \quad (35)$$

❖ Praca techniczna

$$l_{t_{1-2}} = - \int_1^2 v \cdot dp. \quad (36)$$

Ponieważ

$$v = \frac{p_1 \cdot v_1}{p}, \quad (37)$$

to

$$l_{t_{1-2}} = - \int_1^2 p_1 \cdot v_1 \frac{dp}{p} = p_1 \cdot v_1 \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} = R \cdot T \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}. \quad (38)$$

Z równania I zasady termodynamiki mamy:

$$dq = c_p \cdot dT + dl_t = dl_t \quad (39)$$

to znaczy, że praca techniczna jest równa wymienionemu ciepłu

$$l_{t_{1-2}} = q_{1-2}. \quad (40)$$

Taki sam wniosek wynika po podstawieniu zależności  $\frac{v_2}{v_1}$  w miejsce  $\frac{p_1}{p_2}$  do wzoru (38).

Z zależności (30), (35) oraz (40) wynika, że

$$l_{1-2} = l_{t_{1-2}} = q_{1-2}. \quad (41)$$

to znaczy praca bezwzględna jest równa pracy technicznej i wymienionemu ciepłu. Na wykresie p-v pola pracy bezwzględnej i technicznej są jednakowe.

❖ Zmiana entropii

Zgodnie z definicją entropii:

$$s_2 - s_1 = \frac{q_{1-2}}{T}, \quad (42)$$

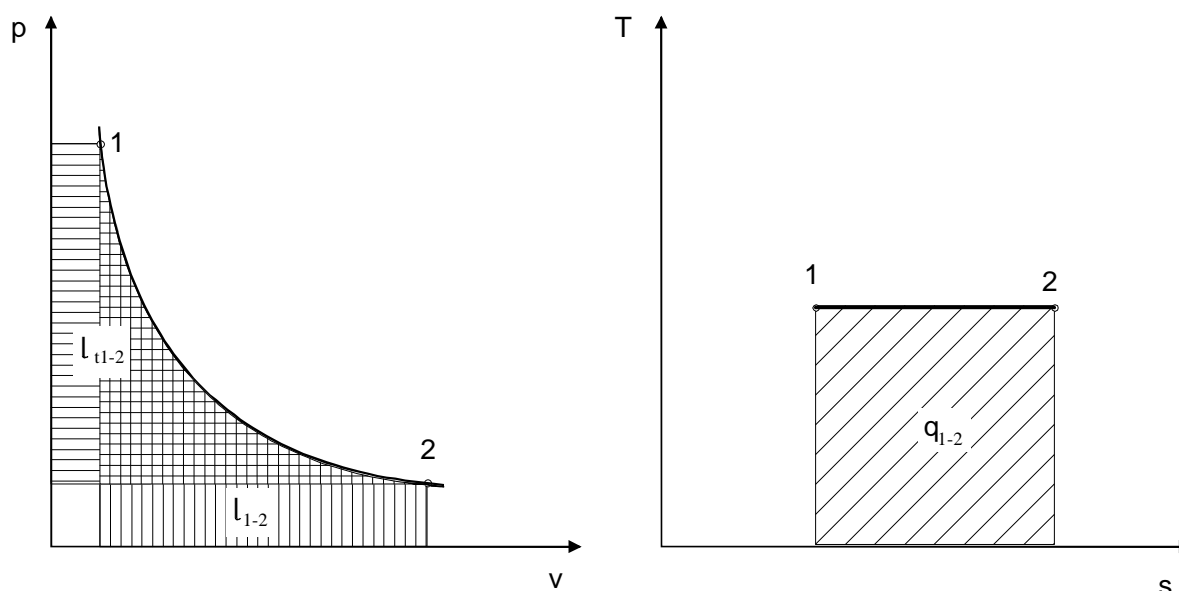
natomiast w przypadku gazów doskonałych, gdy temperatura jest stała

$$s_2 - s_1 = c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}, \quad (43)$$

$$s_2 - s_1 = c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} - R \cdot \ln \frac{p_2}{p_1}, \quad (44)$$

ciepła właściwe są stałe i wówczas

$$s_2 - s_1 = R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = R \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}. \quad (45)$$



Rys. 4. Wykresy przemiany izotermicznej w układzie współrzędnych p-v, T-s

Źródło: Opracowanie Autora

Fig. 4. Graphs of isothermal process in the coordinate system p-v, T-s

Source: Elaboration of the Author

❖ Zmiany energii wewnętrznej i entalpii

W przypadku stałej temperatury przemiany

$$dT = 0, \quad (46)$$

więc

$$du = c_v \cdot dT = 0 \quad (47)$$

oraz

$$di = c_p \cdot dT = 0. \quad (48)$$

Podczas przemiany izotermicznej energia wewnętrzna oraz entalpia są stałe.

## 5. Przemiana adiabatyczna

Przemiana adiabatyczna jest przemianą, podczas której *nie jest wymieniane ciepło z otoczeniem*, tzn. nie jest dostarczane ciepło z zewnątrz, ani odprowadzane z układu do otoczenia, to znaczy

$$dq_z = 0, \quad (49)$$

więc

$$q_{z_{1-2}} = 0. \quad (50)$$

Należy zaznaczyć, że podczas przemiany adiabatycznej w układzie może wydzielać się ciepło w wyniku pracy tarcia w ilości

$$dq_f = dl_f. \quad (51)$$

Taka przemiana jest również adiabatyczną, nazywaną przemianą *adiabatyczną nieodwracalną*. Przemiana adiabatyczna, podczas której nie powstaje ciepło tarcia jest odwracalna i nazwana *przemianą izentropową*, a całkowite ciepło doprowadzone do układu:

$$dq = dq_z + dq_f = 0. \quad (52)$$

Może zaistnieć szczególny przypadek kiedy nie ma wymiany ciepła ze źródeł ciepła, a ciepło tarcia w całości jest odprowadzane do otoczenia, to znaczy

$$q_f = -q_z \quad (53)$$

Wówczas całkowite ciepło wymiany:

$$dq = -dq_f + dq_f = 0. \quad (54)$$

Przemiana taka nie jest przemianą adiabatyczną, gdyż nie jest spełniony warunek, że  $dq_z = 0$ . W przemianie izentropowej zmiana entropii:

$$ds = \frac{dq}{T} = 0, \quad (55)$$

więc entropia jest stała, czyli

$$s_2 = s_1. \quad (56)$$

Natomiast gdy zachodzi przemiana adiabatyczna nieodwracalna zawsze następuje przyrost entropii, gdyż

$$ds = \frac{dq_f}{T} > 0. \quad (57)$$

## 6. Zależności dotyczące przemiany izentropowej

### 6.1. Zależności dla gazów doskonałych

#### ❖ Równanie izentropy

Dla izentropy równanie pierwszej zasady termodynamiki ma postać:

$$dq = du + p \cdot dv = 0. \quad (58)$$

Ponieważ

$$du = c_v \cdot dT, \quad (59)$$



to

$$c_v \cdot dT + p \cdot dv = 0. \quad (60)$$

Z równania stanu w postaci różniczkowej mamy:

$$d(p \cdot v) = R \cdot dT, \quad (61)$$

a przyrost temperatury

$$dT = \frac{d(p \cdot v)}{R}. \quad (62)$$

Różniczka iloczynu  $pv$  ma następującą postać:

$$d(p \cdot v) = p \cdot dv + v \cdot dp. \quad (63)$$

Po podstawieniu ostatnich dwóch wyrażeń do wzoru (60) otrzymano:

$$\frac{c_v}{R} (p \cdot dv + v \cdot dp) + p \cdot dv = 0. \quad (64)$$

Ponieważ

$$R = c_p - c_v \quad (65)$$

oraz

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} \quad (66)$$

uzyskano, że

$$\frac{c_v}{R} = \frac{c_v}{c_p - c_v} = \frac{1}{\kappa - 1}. \quad (67)$$

Po podstawieniu tego wyrażenia do wzoru (64) otrzymano:

$$\frac{1}{\kappa - 1} (p \cdot dv + v \cdot dp) + p \cdot dv = 0. \quad (68)$$

W celu uzyskania ostatecznej postaci równania izentropy wykonano kolejne zabiegi matematyczne. Po przekształceniu wzoru (68) otrzymuje się:

$$\frac{p \cdot dv + v \cdot dp + (\kappa - 1)p \cdot dv}{\kappa - 1} = 0, \quad (69)$$

$$p \cdot dv + v \cdot dp + \kappa \cdot p \cdot dv - p \cdot dv = 0. \quad (70)$$

Po redukcji otrzymujemy:

$$\kappa \cdot p \cdot dv + v \cdot dp = 0, \quad (71)$$

a po podzieleniu obu stron równości (71) przez  $p \cdot v$  powstanie równanie różniczkowe:

$$\kappa \cdot \frac{dv}{v} + \frac{dp}{p} = 0. \quad (72)$$

W wyniku całkowania otrzymujemy:

$$\kappa \ln \frac{v_2}{v_1} + \ln \frac{p_2}{p_1} = 0. \quad (73)$$

Ostatecznie równanie izentropy w postaci wykładniczej ma postać

$$p_1 \cdot v_1^\kappa = p_2 \cdot v_2^\kappa = p \cdot v^\kappa = \text{const.} \quad (74)$$

Po podstawieniu do wzoru (74) zależności:

$$p = \frac{R \cdot T}{v} \quad (75)$$

otrzymuje się drugą postać równania izentropy:

$$T_1 \cdot v_1^{\kappa-1} = T_2 \cdot v_2^{\kappa-1} = p \cdot v^{\kappa-1} = \text{const.} \quad (76)$$

Trzecią postać równania izentropy otrzyma się po podstawieniu do wzoru (74) wyrażenia

$$v = \frac{R \cdot T}{p} \quad (77)$$

otrzymamy

$$T_1 \cdot p_1^{-\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_2 \cdot p_2^{-\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T \cdot p^{-\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \text{const.} \quad (78)$$

#### ❖ Praca bezwzględna

Ze związku

$$dq = du + dl = 0 \quad (79)$$

otrzymujemy

$$dl = -du \quad (80)$$

oraz

$$l_{1-2} = u_1 - u_2. \quad (81)$$

Z powyższego wynika, że praca bezwzględna jest wykonywana kosztem energii wewnętrznej. Ponieważ

$$u = c_v \cdot T, \quad (82)$$

$$l_{1-2} = c_v(T_1 - T_2). \quad (83)$$

Z poprzednich rozważań wiadomo, że

$$c_v = \frac{R}{\kappa - 1}. \quad (84)$$

Po podstawieniu (84) do wzoru (83) uzyskano następane zależności na pracę bezwzględną

$$l_{1-2} = \frac{1}{\kappa - 1} \cdot R \cdot (T_1 - T_2) = \frac{1}{\kappa - 1} \cdot (p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2), \quad (85)$$

a po dalszych przekształceniach

$$l_{1-2} = \frac{p_1 \cdot v_1}{\kappa - 1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] = \frac{R \cdot T_1}{\kappa - 1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] = \frac{R \cdot T_1}{\kappa - 1} \left[ 1 - \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{\kappa-1} \right]. \quad (86)$$

❖ Praca techniczna

Biorąc pod uwagę zależność:

$$dq = di + dl_t = 0 \quad (87)$$

otrzymujemy związek

$$dl_t = -di \quad (88)$$

oraz

$$l_{t_{1-2}} = i_1 - i_2. \quad (89)$$

Jak widać praca techniczna jest wykonywana kosztem spadku entalpii.

W wyniku podzielenia wzorów na pracę techniczną przez pracę bezwzględną uzyskuje się zależność:

$$\frac{l_{t_{1-2}}}{l_{1-2}} = \frac{i_1 - i_2}{u_1 - u_2} = \frac{c_p(T_1 - T_2)}{c_v(T_1 - T_2)} = \frac{c_p}{c_v} = \kappa, \quad (90)$$

więc

$$l_{t_{1-2}} = \kappa \cdot l_{1-2}. \quad (91)$$

Podstawiając wzór na pracę bezwzględną (86) do zależności (91) otrzymuje się:

$$l_{t_{1-2}} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} p_1 \cdot v_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R \cdot T_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R \cdot T_1 \left[ 1 - \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{\kappa-1} \right]. \quad (92)$$

Adiabata odwracalna (izentropa) na wykresie o współrzędnych p-v jest krzywą wykładniczą, a w układzie T-s linią prostą stałej entropii.

## 6.2. Zależności dla gazów półdoskonałych

Równania izentropy dla gazów doskonałych (74), (76) i (78) mają zastosowanie również do gazów półdoskonałych. Należy jednak uwzględnić zmienność wartości wykładnika  $\kappa$ , który oblicza się ze średnich wartości ciepła właściwego  $c_p$  i  $c_v$  dla temperatur stanów skrajnych przemiany:

$$\kappa = \frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_v}. \quad (93)$$

Ciepło i przyrost entropii przemiany izentropowej gazu półdoskonałego są oczywiście równe zeru:

$$q_{1-2} = 0 \quad (94)$$

oraz

$$s_{1-2} = 0 \quad (95)$$

❖ Praca bezwzględna

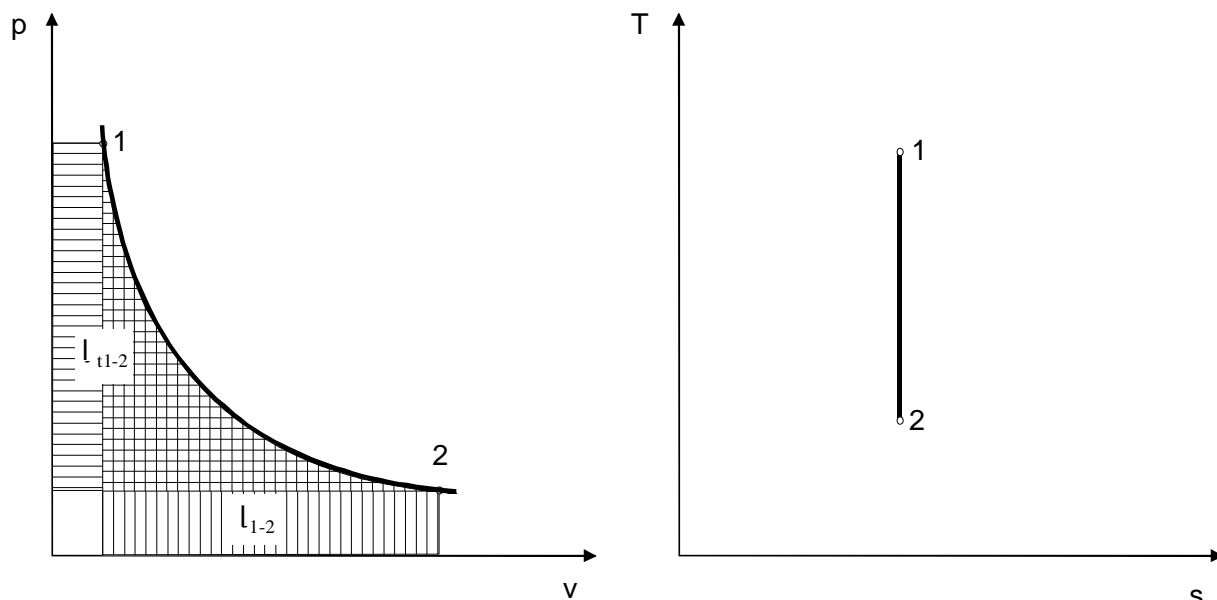
Praca bezwzględna jest określona wzorem:

$$l_{1-2} = u_1 - u_2 = \bar{c}_v \Big|_0^{T_1} \cdot T_1 - \bar{c}_v \Big|_0^{T_2} \cdot T_2. \quad (96)$$

## ❖ Praca techniczna

Praca bezwzględna jest określona wzorem:

$$l_{t1-2} = i_1 - i_2 = \bar{c}_p \Big|_0^{T_1} \cdot T_1 - \bar{c}_p \Big|_0^{T_2} \cdot T_2. \quad (97)$$



Rys. 5. Izentropowe rozprężanie gazu na wykresach w układach współrzędnych p-v oraz T-s  
Źródło: Opracowanie Autora

Fig. 5. Isentropic decompression of a gas in the graphs with coordinate systems p-v and T-s  
Source: Elaboration of the Author

W powyższych wzorach temperatury wyrażone są w skali Celsjusza, gdyż wartości średnich ciepł właściwych podawane w tablicach odniesione są przeważnie do temperatury początkowej 0°C.

## 7. Zależności dotyczące przemiany adiabatycznej nieodwracalnej

Przemianom adiabatycznym nieodwracalnym towarzyszy praca tarcia zamieniana na ciepło. Ciepło tarcia  $dq_f$  powoduje wzrost entropii:

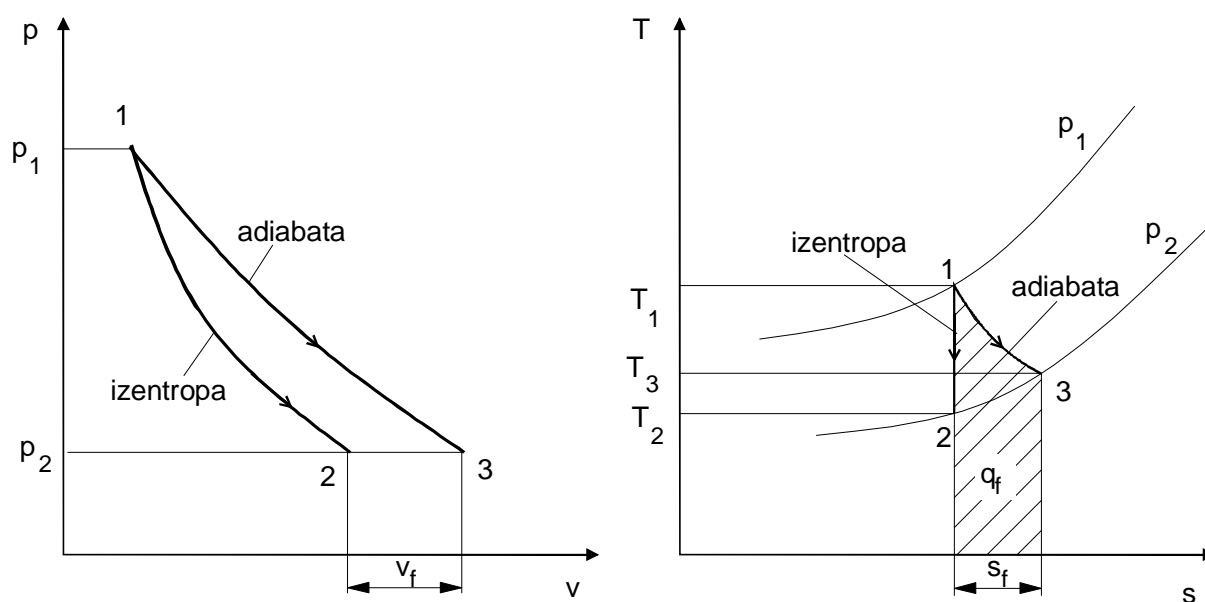
$$ds_f = \frac{dq_f}{T} > 0. \quad (98)$$

Ciepło zewnętrzne:

$$dq_z = 0. \quad (99)$$

Przemiana adiabatyczna odwracalna ( $dq_z = 0$  i  $dq_f = 0$ ) została nazwana izentropową. W celu ułatwienia posługiwania się przemianą nieodwracalną będzie dalej nazywana *adiabatyczną*, a linia przemiany *adiabatą*.

Ciepło tarcia doprowadzone do czynnika podczas przemiany adiabatycznej powoduje wzrost jego objętości właściwej  $v_f$  i entropii  $s_f$ , co pokazano na rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Rozprężanie od ciśnienia  $p_1$  do  $p_2$  według izentropy i adiabaty

Źródło: Opracowanie Autora

Fig. 6. Decompression from the pressure  $p_1$  to  $p_2$  according to isentrope and adiabat

Source: Elaboration of the Author

W wyniku ciepła tarcia temperatura czynnika końca przemiany jest wyższa w porównaniu z przemianą izentropową, zarówno w wyniku sprężania jak i rozprężania.

Przemiana adiabatyczna może być obliczana wg wzorów dla gazu doskonałego lub półdoskonałego. Wybór zależy od wymaganej dokładności wyników.

❖ Całkowite ciepło przemiany jest równe ciepłu rozpraszania pracy

Całkowite ciepło przemiany jest równe ciepłu rozpraszania pracy jest określone wzorem:

$$q_{1-3} = q_f = \int_1^3 T \cdot ds \quad (100)$$

Na rysunkach 6 i 7 zakreskowane pola przedstawiają ciepła tarcia i są równe pracy tarcia  $l_f$ .

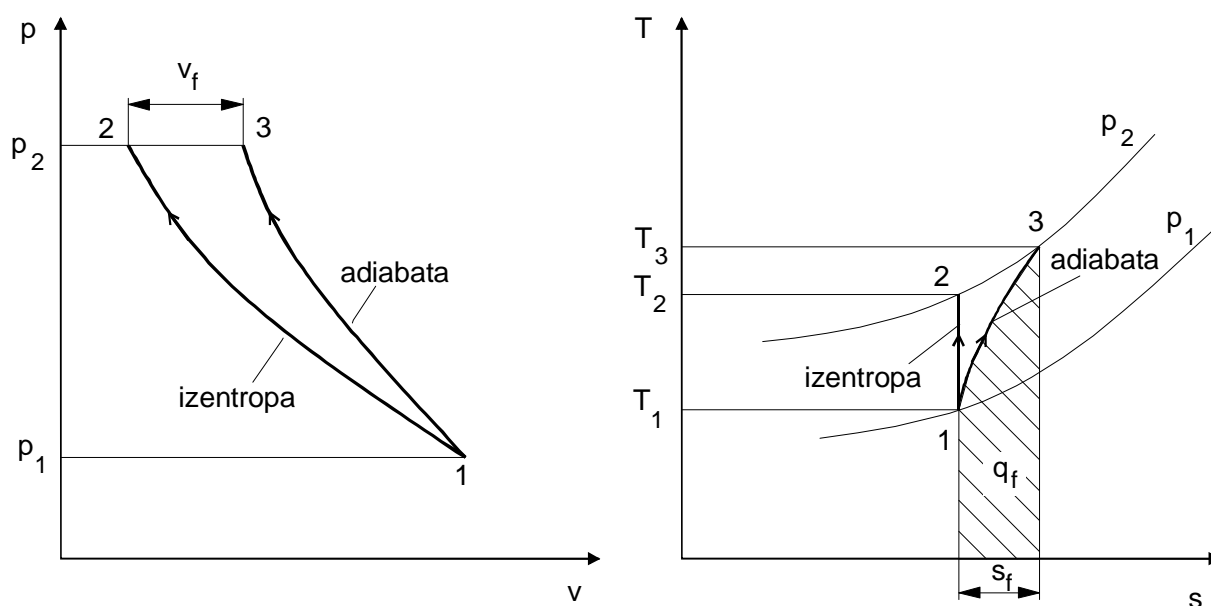
❖ Praca bezwzględna

Praca bezwzględna dla gazu doskonałego zdefiniowana jest wzorem:

$$l_{1-3} = u_1 - u_3 = c_v(T_1 - T_3) = \frac{R}{\kappa - 1}(T_1 - T_3), \quad (101)$$

a dla gazu półdoskonałego określona jest wzorem:

$$l_{1-3} = u_1 - u_3 = \bar{c}_v|_0^{T_1} \cdot T_1 - \bar{c}_v|_0^{T_3} \cdot T_3. \quad (102)$$

Rys. 7. Izentropowe i adiabatyczne sprężanie od ciśnienia  $p_1$  do  $p_2$ 

Źródło: Opracowanie Autora

Fig. 7. Isentropic and adiabatic compression from the pressure  $p_1$  to  $p_2$ 

Source: Elaboration of the Author

## ❖ Praca techniczna

Praca techniczna dla gazu doskonałego zdefiniowana jest wzorem:

$$l_{t1-3} = i_1 - i_3 = c_p (T_1 - T_3) = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R (T_1 - T_3), \quad (103)$$

a dla gazu półdoskonałego określona jest wzorem:

$$l_{t1-3} = i_1 - i_3 = \bar{c}_p \Big|_0^{T_1} \cdot T_1 - \bar{c}_p \Big|_0^{T_3} \cdot T_3. \quad (104)$$

## 9. Wnioski

Opracowane równania transformacji gazów jak również zależności ich charakteryzujących dla przemian izochorycznej, izobarycznej, izotermicznej, adiabatycznej, izentropowej oraz adiabatycznej nieodwracalnej pozwalają na dokonanie nie tylko wielu porównań lecz również na utrwalanie istniejących różnic.

## Literatura

- [1] Nagórski A., Sobociński R.: *Wybrane zagadnienia z termodynamiki technicznej. Zbiór zadań*. Warszawa: Oficyna Wyd. Pol. Warszawskiej, 2008.
- [2] Ochęduszek S.: *Termodynamika stosowana*. Warszawa: WNT, 1974.
- [3] Staniszewski B.: *Termodynamika*. Warszawa: PWN, 1986.
- [4] Szargut J.: *Termodynamika*. Warszawa: PWN, 2000.
- [5] Szargut J.: *Termodynamika techniczna*. Gliwice: Politechnika Śląska, 2013, w. 7.
- [6] Wiśniewski S.: *Termodynamika techniczna*. Warszawa: WNT, 2013.
- [7] Wrzesiński Zb.: *Termodynamika*. Warszawa: Oficyna Wyd. Pol. Warszawskiej, 2008, w. 8 pop. i roz.
- [8] Zagórski J.: *Termodynamika*. Warszawa: Pol. Warszawska, 1974, w. 4.