

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

Wyższa Szkoła Techniczno-Ekonomiczna w Szczecinie, Wydział Systemów Automotive (*Prof. em.*)  
Higher School of Technology and Economics in Szczecin, Faculty of Automotive Systems (*Prof. em.*)

## PRZEMIANY POLITROPOWE GAZÓW

### Streszczenie

**Wstęp i cele:** W pracy opisano przemiany politropowe gazu doskonałego i gazu półdoskonałego. Przedstawiono przemiany termodynamiczne na wykresach w odpowiednich układach współrzędnych. Ponadto omówiono dławienie gazu doskonałego podczas przepływu przez rurociąg. Celem pracy jest wyprowadzenie odpowiednich wzorów analitycznych dla przemian politropowych gazów, a także pokazanie przemian na odpowiednich wykresach.

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

**Wyniki:** Rezultatem analizy jest opracowanie i podanie równania politropy w postaci wykładniczej, wzoru na ciepło właściwe, pracę bezwzględną i techniczną, ciepło przemiany, zmianę entropii, przemianę politropową gazu półdoskonałego. Ponadto opracowano dławienie gazu doskonałego podczas przepływu przez rurociąg. Przetawiono też wartości wykładnika  $n$  i ciepła właściwego  $c$  charakterystycznych przemian politropowych

**Wnioski:** Ciepło właściwe w przemianie politropowej gazu doskonałego jest stałe. Ciepło właściwe gazu półdoskonałego w przemianie politropowej jest zależne od temperatury. Ponieważ w przemianie nieodwracalnej przyrost entropii jest zawsze dodatni, więc podczas przepływu ciśnienie gazu maleje, natomiast objętość właściwa czynnika wzrasta.

**Słowa kluczowe:** Gazy, przemiany politropowe, gaz doskonały, gaz półdoskonały, przemiany termodynamiczne, przepływ przez rurociąg, dławienie gazu doskonałego.

(Otrzymano: 10.06.2018; Zrecenzowano: 20.06.2018; Zaakceptowano: 30.06.2018)

## POLYTROPIC TRANSFORMATIONS OF GASES

### Abstract

**Introduction and aim:** The work describes the polytropic transformations of perfect gas and semi-perfect gas. Thermodynamic transformations were carried out on diagrams in appropriate coordinate systems. In addition, the suppression of a perfect gas during flow through the pipeline was discussed. The aim of the work is to derive the adjective analytical formulas for the transformation of poly-gas gases, as well as to show the transformations on the relevant 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:** The result of the analysis is the elaboration and administration of the polytropic equation in exponential form, the formula for specific heat, absolute and technical work, heat of transformation, change of entropy, polytropic transformation of semi-perfect gas. In addition, the suppressing of the perfect gas during the flow through the pipeline was developed. Also the values of exponent  $n$  and specific heat  $c$  of characteristic polytropic transformations have been shown.

**Conclusions:** The specific heat in the transformation of the perfect gas is constant. The specific heat of a semi-ideal gas in polytropic transformation is dependent on temperature. Because in the irreversible transformation, the entropy increase is always positive, so during the flow the gas pressure decreases, while the specific volume of the gas increases.

**Keywords:** Gases, polytropic transformations, perfect gas, semi-perfect gas, thermodynamic transformations, flow through the pipeline, throttling of perfect gas.

(Received: 10.06.2018; Revised: 20.06.2018; Accepted: 30.06.2018)

## 1. Przemiana politropowa gazu doskonałego

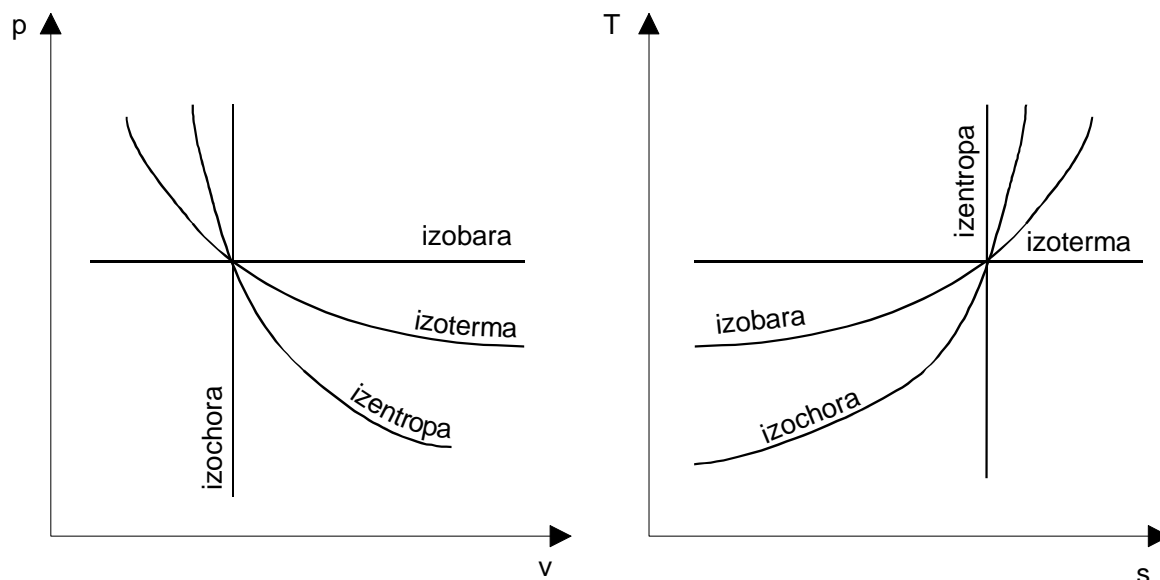
Na początku tego rozdziału rozpatrywano przemiany charakterystyczne gazów doskonałych, przebiegające w określonych szczególnych warunkach. Ale oprócz przemian charakterystycznych mogą zachodzić również inne rodzaje przemian. Ogólnie wszystkie przemiany termodynamiczne nazywane są politropowymi, ale przemiany charakterystyczne mają specjalne, odrębne nazwy, jak np. izotermiczna itd.

Przebiegi charakterystycznych przemian na wykresach w układzie współrzędnych  $p-v$  oraz  $T-s$  przedstawia rysunek 1.

Pomiędzy liniami przemian charakterystycznych mogą przebiegać inne przemiany politropowe. Każda z możliwych przemian politropowych różni się od innych wartością ciepła właściwego  $c$  i wykładnika  $n$  [1]-[8].

Ciepło właściwe w przemianie politropowej gazu doskonałego jest stałe:

$$c = \frac{dq}{dT} = \text{const.} \quad (1)$$



Rys. 1. Przemiany charakterystyczne na wykresach o współrzędnych  $p-v$  oraz  $T-s$

Źródło: Opracowanie własne

Fig. 1. Characteristic transformations on the graphs with co-ordinates  $p-v$  and  $T-s$

Source: Elaboration of the Author

Równanie różniczkowe I zasady termodynamiki przedstawia się następująco:

$$du = dq - p \cdot dv. \quad (2)$$

Po podstawieniu różniczek:

$$du = c \cdot dT, \quad (3)$$

$$dq = c_v \cdot dT, \quad (4)$$

do równania (2) przyjmuje ono postać:

$$c \cdot dT = c_v \cdot dT + p \cdot dv. \quad (5)$$

Stąd

$$c \cdot dT - c_v \cdot dT - p \cdot dv = 0, \quad (6)$$

$$(c - c_v) \cdot dT - p \cdot dv = 0. \quad (7)$$

Z równania stanu można wyznaczyć:

$$dT = \frac{d(p \cdot v)}{R}, \quad (8)$$

gdzie  $R$  to stała gazowa, a następnie podstawić do równania (7), wówczas:

$$(c - c_v) \cdot \frac{d(p \cdot v)}{R} - p \cdot dv = 0. \quad (9)$$

Stałą gazową  $R$  można zastąpić przez:

$$R = c_p - c_v, \quad (10)$$

wtedy otrzymamy

$$\frac{c - c_v}{R} = \frac{c - c_v}{c_p - c_v} = \frac{1}{1 - \frac{c - c_p}{c - c_v}}. \quad (11)$$

Dla określonej przemiany wszystkie rodzaje ciepła właściwego są stałe, więc można je zastąpić inną stałą wielkością  $n$ :

$$n = \frac{c - c_p}{c - c_v} \quad (12)$$

i wówczas równanie (11) ma postać:

$$\frac{c - c_v}{R} = \frac{1}{1 - n}. \quad (13)$$

Po podstawieniu odpowiedniego wyrażenia z równości (13) do równania (9) otrzymujemy:

$$\frac{1}{1 - n} \cdot d(p \cdot v) - p \cdot dv = 0. \quad (14)$$

Następnie

$$d(p \cdot v) - p \cdot (1 - n) \cdot dv = 0, \quad (15)$$

$$p \cdot dv + v \cdot dp - p \cdot dv + n \cdot p \cdot dv = 0. \quad (16)$$

Po redukcji wyrazów i podzieleniu przez  $p \cdot v$ , otrzymujemy równanie różniczkowe politropy:

$$n \cdot \frac{dv}{v} + \frac{dp}{p} = 0, \quad (17)$$

a po scałkowaniu odpowiednio w granicach od  $v_1$  do  $v_2$  oraz od  $p_1$  do  $p_2$ , otrzymujemy:

$$n \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} + \ln \frac{p_2}{p_1} = 0. \quad (18)$$

Równanie politropy w postaci wykładniczej ma postać:

$$p_1 \cdot v_1^n = p_2 \cdot v_2^n. \quad (19)$$

Równanie politropy (19) ma identyczną postać jak adiabata z tą różnicą, że wykładnik  $\kappa$  jest zastąpiony wykładnikiem  $n$ . Podobnie jak w przypadku adiabaty równanie politropy można uzależnić od temperatury:

$$T_1 \cdot v_1^{n-1} = T_2 \cdot v_2^{n-1}, \quad (20)$$

$$T_1 \cdot p_1^{\frac{1-n}{n}} = T_2 \cdot p_2^{\frac{1-n}{n}}. \quad (21)$$

Ciepło właściwe politropy można wyznaczyć z zależności (12). Wykonując kolejne przekształcenia wzoru (12) otrzymamy:

$$n \cdot c - n \cdot c_v = c - c_p, \quad (22)$$

$$n \cdot c - c = n \cdot c_v - c_p, \quad (23)$$

$$c \cdot (n-1) = n \cdot c_v - c_p = c_v \cdot \left( n - \frac{c_p}{c_v} \right) = c_v \cdot (n - \kappa). \quad (24)$$

Ostatecznie wzór na ciepło właściwe ma postać:

$$c = c_v \frac{n - \kappa}{n - 1}. \quad (25)$$

Wykorzystując poznane dotąd zależności dla politropy można wyprowadzić wzory do obliczania innych wielkości. I tak następującymi wzorami zdefiniowane są:

➤ Praca bezwzględna

$$l_{1-2} = \frac{1}{n-1} \cdot (p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2) = \frac{p_1 \cdot v_1}{n-1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]. \quad (26)$$

➤ Praca techniczna

$$l_{t_{1-2}} = \frac{n}{n-1} \cdot p_1 \cdot v_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right], \quad (27)$$

to znaczy

$$l_{t_{1-2}} = n \cdot l_{1-2}. \quad (28)$$

➤ Ciepło przemiany

$$q_{1-2} = c \cdot (T_2 - T_1) = c_v \cdot \frac{n - \kappa}{n - 1} \cdot (T_2 - T_1). \quad (29)$$

➤ Zmiana entropii

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dq}{T} = \int_1^2 \frac{c \cdot dT}{T}. \quad (30)$$

Po wyznaczeniu całek w równaniu (30), otrzymuje się:

$$s_2 - s_1 = c \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \cdot \frac{n - \kappa}{n - 1} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (31)$$

W tabeli 1 zestawiono wartości wykładnika  $n$  oraz ciepła właściwego  $c$  dla charakterystycznych przemian politropowych wyznaczonych wg równań (19), (25) i równania:

$$p \cdot v = R \cdot T. \quad (32)$$

Wartość wykładnika dla izochory określa się z równania politropy (19) podniesionego do potęgi  $1/n$ :

$$p^n v = \text{const.} \quad (33)$$

Tab. 1. Wartości wykładnika  $n$  i ciepła właściwego  $c$  charakterystycznych przemian politropowych  
Tab. 1. The values of exponent  $n$  and specific heat  $c$  of characteristic polytropic transformations

| Rodzaj przemiany | Równanie przemiany                | Warunki przemiany  | Wykładnik politropy $n$ | Ciepło właściwe $c$            |
|------------------|-----------------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|
| Izoterma         | $p \cdot v = R \cdot T$           | $T = \text{const}$ | 1                       | $\infty$                       |
| Izochora         | $\frac{T}{p} = \text{const}$      | $v = \text{const}$ | $\pm \infty$            | $c_v$                          |
| Izobara          | $\frac{T}{v} = \text{const}$      | $p = \text{const}$ | 0                       | $c_p$                          |
| Izentropa        | $p \cdot v^\kappa = \text{const}$ | $dq = 0$           | $\kappa$                | 0                              |
| Politropa        | $p \cdot v^n = \text{const}$      | różne              | $n$                     | $c_v \frac{n - \kappa}{n - 1}$ |

Źródło: Opracowanie własne / Source: Elaboration of the Author

## 2. Przemiana politropowa gazu półdoskonałego

Ciepło właściwe gazu półdoskonałego również w przemianie politropowej jest zależne od temperatury. W obliczeniach wielkości dotyczących przemian politropowych przyjmuje się średnie wartości ciepła właściwego  $\bar{c}$ , które oblicza się z zależności (13) lub (25) podstawiając średnią wartość  $\bar{c}_v$ :

$$\bar{c}|_{T_1}^{T_2} = \bar{c}_v|_{T_1}^{T_2} - \frac{R}{n-1} = \frac{n-\kappa}{n-1} \bar{c}_v|_{T_1}^{T_2}. \quad (34)$$

## 3. Przemiany termodynamiczne na wykresach w układzie o współrzędnych $i$ - $s$

Przemiany termodynamiczne przedstawione na wykresach  $i$ - $s$  umożliwiają bezpośrednie odczytywanie niektórych wielkości eliminując potrzebę przeliczeń.

Entalpię gazu doskonałego określa wzór:

$$di = c_p \cdot dT. \quad (35)$$

Z tej zależności wynika, że wartości entalpii są wielokrotnością temperatury i są wprost proporcjonalne do niej.

Przemiana na wykresie  $i$ - $s$  ma więc taki sam charakter jak na wykresie  $T$ - $s$  z tą różnicą, że wartości entalpii na osi rzędnych będą  $c_p$  razy większe od temperatury  $T$ . Rysunek 2 przedstawia przemiany na wykresie o współrzędnych  $i$ - $s$ .

W przemianie izobarycznej, według zależności:

$$q_{1-2} = i_2 - i_1 = c_p \cdot (T_2 - T_1), \quad (36)$$

ciepło przemiany  $q_{1-2} = i_2 - i_1$ . Wartość tego ciepła można odczytać bezpośrednio z wykresu.

Podobnie można odczytać wartości pracy technicznej przemiany izentropowej lub adiabatycznej na podstawie wzorów:

$$l_{t_{1-2}} = i_1 - i_2, \quad (37)$$

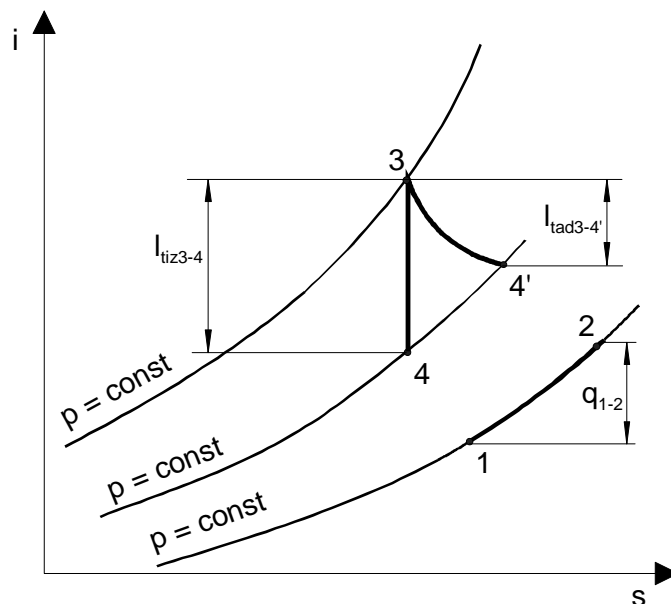
$$l_{t_{ad1-2}} = q_{1-6} = c_v \cdot (T_1 - T_2) = i_1 - i_2, \quad (38)$$

z których wynika, że

$$l_{t_{iz3-4}} = i_3 - i_4, \quad (39)$$

$$l_{t_{ad3-4'}} = i_3 - i_{4'}. \quad (40)$$

Na wykresie o współrzędnych  $i$ – $s$  mogą być ponadto naniesione linie stałej entalpii będące równocześnie izotermami.



Rys. 2. Przemiany na wykresie o współrzędnych  $i$ – $s$ : 1–2 izobaryczna, 3–4 izentropowa, 3–4' adiabatyczna  
Źródło: Opracowanie własne

Fig. 2. Transformations on a graph with coordinates  $i$ – $s$ : 1–2 isobaric, 3–4 isentropic, 3–4' adiabatic  
Source: Elaboration of the Author

#### 4. Dławienie gazu doskonałego podczas przepływu przez rurociąg

Charakterystyczną przemianą gazu doskonałego jest przepływ w rurociągu, któremu towarzyszy tarcie. Straty tarcia powstają wskutek oporów wewnętrznych gazu jak i tarcia o ścianki rurociągu i różnych urządzeń w nim umieszczonych. Skutkiem oporów ruchu gazu jest spadek jego ciśnienia. Zjawisko jest nieodwracalne, gdyż nie można tej straconej energii odzyskać bez doprowadzenia energii z zewnątrz.

Schemat takiego przepływu pokazano na rysunku 3. Przepływający gaz nie wykonuje żadnej pracy, tzn.

$$dL_t = 0 \quad (41)$$

i przy założeniu, że nie następuje wymiana ciepła przez ścianki również

$$dQ = 0. \quad (42)$$

Przy powyższych założeniach oraz ustalonym przepływie czynnika, to jest, gdy parametry w przekroju 1–1 nie zmieniają się w czasie, energia układu między ściankami kontrolnymi 1–1, 2–2 ma stałą wartość, to znaczy:

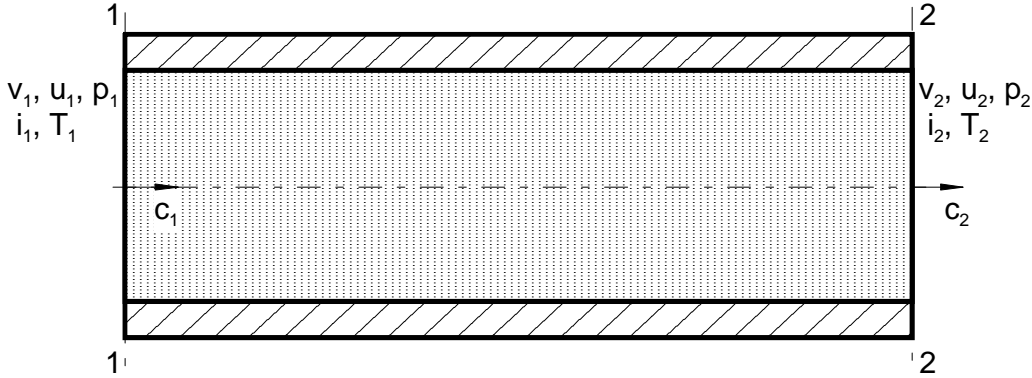
$$dU = 0. \quad (43)$$

Korzystając z równania

$$I_{c_2} - I_{c_1} = Q_{1-2} - L_{t_{1-2}} \quad (44)$$

i pierwszej zasady termodynamiki dla układu otwartego w warunkach ustalonych mamy:

$$I_{c_1} - I_{c_2} + Q_{1-2} - L_{t_{1-2}} = 0. \quad (45)$$



Rys. 3. Schemat przepływu czynnika w rurociągu  
Źródło: Opracowanie własne

Fig. 3. Scheme of fluid flow in the pipeline  
Source: Elaboration of the Author

Przy powyższych założeniach otrzymuje się zależności:

$$I_{c_2} = I_{c_1}, \quad (46)$$

$$i_{c_2} = i_{c_1}. \quad (47)$$

Ostatnie dwie zależności wykazują, że podczas przepływu entalpia całkowita gazu jest stała. Zależność (47) można napisać w postaci:

$$i_1 + \frac{c_1^2}{2} = i_2 + \frac{c_2^2}{2}. \quad (48)$$

Prędkości przepływu gazów przesyłanych w rurociągach nie są zbyt duże z powodu potrzeby ograniczania strat przepływu i na ogół nie przekraczają 30 m/s. Przy małych prędkościach gazów zmiany prędkości spowodowane spadkiem ciśnienia są bardzo małe. Na tej podstawie można przyjąć, że różnice energii kinetycznej między stanem początkowym 1, a końcowym 2 są pomijalnie małe i wówczas otrzyma się

$$i_1 = i_2, \quad (49)$$

co oznacza, że podczas przepływu entalpia spoczynkowa nie ulega zmianie.

Zależności (48) i (49) są słuszne dla gazów doskonałych i rzeczywistych, gdyż przy ich wyprowadzaniu nie było zastrzeżeń dotyczących rodzaju gazu. W przypadku gazu doskonałego ( $c_p = \text{const}$ ):

$$c_p \cdot T_1 = c_p \cdot T_2. \quad (50)$$

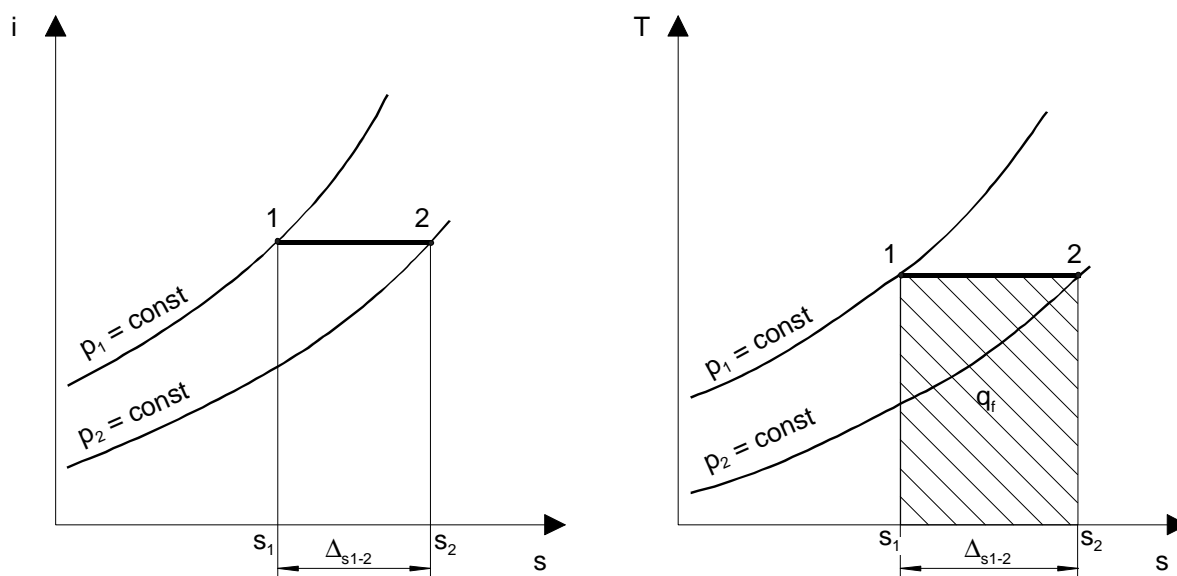
Ponieważ ciepło właściwe jest jednakowe w obu stanach, więc

$$T_1 = T_2. \quad (51)$$

Wykazano, że podczas dławienia gazu doskonałego jego temperatura jest stała. Przemianę dławienia gazu na wykresach w układach o współrzędnych  $i$ - $s$  oraz  $T$ - $s$  pokazuje rysunek 4.

W instalacjach przesyłowych gazu znajdują się różne urządzenia, jak zawory, przyrządy pomiarowe i inne, które powodują duże miejscowe straty ciśnienia, jednak entalpia mierzona na końcu odcinka pomiarowego jest taka sama jak na początku. Nieodwracalny przyrost entropii można określić na podstawie zależności:

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}. \quad (52)$$



Rys. 4. Przemiana dławienia podczas przepływu od przekroju początkowego 1 do końcowego 2  
Źródło: Opracowanie własne

Fig. 4. Transformation of throttling during flow from the initial section 1 to the final section 2  
Source: Elaboration of the Author

W przemianie izotermicznej  $T_2 = T_1$ , zatem

$$\Delta s_{1-2} = R \ln \frac{p_1}{p_2} = R \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (53)$$

## 5. Wnioski

- Ciepło właściwe w przemianie politropowej gazu doskonałego jest stałe.
- Ciepło właściwe gazu półdoskonałego w przemianie politropowej jest zależne od temperatury.
- Ponieważ w przemianie nieodwracalnej przyrost entropii jest zawsze dodatni, więc podczas przepływu ciśnienie gazu maleje, natomiast objętość właściwa czynnika wzrasta.
- Przemiany termodynamiczne przedstawione na wykresach  $i-s$  umożliwiają bezpośrednio odczytywanie niektórych wielkości eliminując potrzebę przeliczeń.

## Wykaz oznaczeń

| Symbol | Opis   | Jednostka |
|--------|--|-----------|
| $c$    | Ciepło właściwe w przemianie politropowej gazu | J/kg·K    |
| $c_p$  | Ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu gazu     | J/kg·K    |
| $c_v$  | Ciepło właściwe przy stałej objętości gazu     | J/kg·K    |



|                       |   |                       |
|-----------------------|---|-----------------------|
| $c_1$                 | Ciepło właściwe początkowe  | J/kg·K                |
| $c_2$                 | Ciepło właściwe końcowe   | J/kg·K                |
| $\bar{c}$             | Średnia wartość ciepła właściwego gazu                              | J/kg·K                |
| $\bar{c}_v$           | Średnia wartość ciepła właściwego przy stałej objętości gazu        | J/kg·K                |
| $i$                   | Entalpia spoczynkowa właściwa                                       | J/kg                  |
| $i_{c1}$              | Entalpia całkowita spoczynkowa właściwa początkowa                  | J/kg                  |
| $i_{c2}$              | Entalpia całkowita spoczynkowa właściwa końcowa                     | J/kg                  |
| $i_1$                 | Entalpia spoczynkowa właściwa początkowa 1                          | J/kg                  |
| $i_2$                 | Entalpia spoczynkowa właściwa końcowa 2                             | J/kg                  |
| $i_3$                 | Entalpia spoczynkowa właściwa początkowa 3                          | J/kg                  |
| $i_4$                 | Entalpia spoczynkowa właściwa końcowa 4                             | J/kg                  |
| $l$                   | Praca bezwzględna właściwa  | J/kg                  |
| $l_{1-2}$             | Praca bezwzględna właściwa w przemianie 1-2                         | J/kg                  |
| $l_{t1-2}$            | Praca techniczna właściwa w przemianie 1-2                          | J/kg                  |
| $l_{tad1-2}$          | Praca techniczna właściwa w przemianie adiabatycznej na drodze 1-2  | J/kg                  |
| $l_{tiz3-4}$          | Praca techniczna właściwa w przemianie izentropowej na drodze 3-4   | J/kg                  |
| $l_{tad3-4'}$         | Praca techniczna właściwa w przemianie adiabatycznej na drodze 3-4' | J/kg                  |
| $n$                   | Liczba kilomoli   | kmol                  |
| $p$                   | Ciśnienie   | N/m <sup>2</sup> ≡ Pa |
| $p_1$                 | Ciśnienie początkowe  | N/m <sup>2</sup> ≡ Pa |
| $p_2$                 | Ciśnienie końcowe   | N/m <sup>2</sup> ≡ Pa |
| $p_1^{\frac{1-n}{n}}$ | Ciśnienie początkowe w równaniu politropy z temperaturą             | N/m <sup>2</sup> ≡ Pa |
| $p_2^{\frac{1-n}{n}}$ | Ciśnienie końcowe w równaniu politropy z temperaturą                | N/m <sup>2</sup> ≡ Pa |
| $q$                   | Ciepło odniesione do 1 kg masy                                      | J/kg                  |
| $q_f$                 | Ciepło w przemianie dławienia od przekroju 1 do przekroju 2         | J/kg                  |
| $q_{1-2}$             | Ciepło przemiany w transformacji 1-2                                | J/kg                  |
| $q_{1-6}$             | Ciepło przemiany w transformacji 1-6                                | J/kg                  |
| $s$                   | Entropia właściwa   | J/kg·K                |
| $s_1$                 | Entropia właściwa początkowa  | J/kg·K                |
| $s_2$                 | Entropia właściwa końcowa   | J/kg·K                |
| $u$                   | Energia wewnętrzna właściwa   | J/kg                  |
| $u_1$                 | Energia wewnętrzna właściwa początkowa                              | J/kg                  |
| $u_2$                 | Energia wewnętrzna właściwa końcowa                                 | J/kg                  |
| $v$                   | Objętość właściwa   | m <sup>3</sup> /kg    |

|                 |   |          |
|-----------------|---|----------|
| $v^n$           | Objętość właściwa w równaniu politropy                            | $m^3/kg$ |
| $v^k$           | Objętość właściwa w równaniu izentropy                            | $m^3/kg$ |
| $v_1$           | Objętość właściwa początkowa                                      | $m^3/kg$ |
| $v_2$           | Objętość właściwa końcowa   | $m^3/kg$ |
| $v_1^n$         | Objętość początkowa w równaniu politropy w postaci wykładniczej   | $m^3/kg$ |
| $v_2^n$         | Objętość końcowa w równaniu politropy w postaci wykładniczej      | $m^3/kg$ |
| $v_1^{n-1}$     | Objętość początkowa w równaniu politropy z temperaturą            | $m^3/kg$ |
| $v_2^{n-1}$     | Objętość końcowa w równaniu politropy z temperaturą               | $m^3/kg$ |
| I               | Entalpia spoczynkowa  | J        |
| $I_{c1}$        | Entalpia całkowita początkowa                                     | J        |
| $I_{c2}$        | Entalpia całkowita końcowa  | J        |
| L               | Praca bezwzględna   | J        |
| $L_t$           | Praca techniczna  | J        |
| $L_{t1-2}$      | Praca techniczna na w przemianie 1-2                              | J        |
| Q               | Ciepło  | J        |
| $Q_{1-2}$       | Ciepło w przemianie 1-2   | J        |
| R               | Stała gazowa indywidualna   | J/kg·K   |
| T               | Temperatura bezwzględna (w stopniach Kelvina)                     | K        |
| $T_1$           | Temperatura bezwzględna początkowa (w stopniach Kelvina)          | K        |
| $T_2$           | Temperatura bezwzględna końcowa (w stopniach Kelvina)             | K        |
| U               | Energia wewnętrzna  | J        |
| $\Delta_{s1-2}$ | Przyrost w przemianie dławienia podczas przepływu w przekroju 1-2 | J/kg·K   |
| $\kappa$        | Wykładnik adiabaty  | –        |

## Literatura

- [1] Nagórski A., Sobociński R.: *Wybrane zagadnienia z termodynamiki technicznej. Zbiór zadań*. Warszawa: Oficyna Wyd. Politechniki 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] Wrzeński Zb.: *Termodynamika*. Warszawa: Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, 2008, w. 8 pop. i roz.
- [8] Zagórski J.: *Termodynamika*. Warszawa: Politechnika Warszawska, 1974, w. 4.