

**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 PAR

### Streszczenie

**Wstęp i cele:** W pracy opisano przemiany par, a w szczególności przemianę izochoryczną, izobaryczną, izotermiczną oraz izentropową. Głównym celem pracy jest opisanie wzorów analitycznych przedstawiających przemiany gazów.

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

**Wyniki:** Rezultatem pracy jest przedstawienie wzorów analitycznych przedstawiających przemianę izochoryczną, izobaryczną, izotermiczną oraz izentropową. Ponadto w pracy opracowano graficznie obszar pary wodnej na wykresie granicznym o współrzędnych temperatura - entropia oraz entalpia spoczynkowa - entropia.

**Wnioski:** Kiedy przemiana rozpoczyna się w obszarze par przegrzanej a kończy w obszarze pary nasyconej mokrej, jej właściwości w tej części przemiany zależą od stopnia suchości. W przemianach izochorycznych objętość lub objętość właściwa jest stała. W przemianie izobarycznej ciśnienie jest stałe. Temperatura w przemianie izotermicznej jest stała i w obszarze pary mokrej jest równocześnie temperaturą nasycenia.

**Słowa kluczowe:** Pary, przemiana izochoryczna, przemiana izobaryczna, przemiany izotermiczna, przemiana izentropowa, opis analityczny.

(Otrzymano: 05.08.2018; Zrecenzowano: 15.08.2018; Zaakceptowano: 20.08.2018)

## TRANSFORMATION OF STEAMS

### Abstract

**Introduction and aim:** The paper describes the transformation of steams, in particular case isochoric, isobaric, isothermal and isentropic transformation. The main aim of the paper is to describe analytical formulas showing steams conversions.

**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 work is to present analytical models representing isochoric, isobaric, isothermal and isentropic transformation. In addition, in the paper a graphically developed area of water vapor on the boundary graph with the coordinates temperature - entropy and rest enthalpy - entropy.

**Conclusions:** When the transformation begins in the area of superheated steam and ends in the area of wet saturated steam, its properties in this part of the transformation depend on the degree of dryness. In isochoric changes, the volume or specific volume is constant. In the isobaric transformation, the pressure is constant. The temperature in the isothermal transformation is constant and in the area of the wet steam is simultaneously the saturation temperature.

**Keywords:** Steams, isochoric transformation, isobaric transformation, isothermal transformation, isentropic transformation, analytic description.

(Received: 05.08.2018; Revised: 15.08.2018; Accepted: 20.08.2018)

## 1. Przemiany par

Pary podobnie jak gazy poddawane są w różnych celach przemianom termodynamicznym. W maszynach i urządzeniach cieplnych w wyniku przemian termodynamicznych para może przemieniać się z przegrzanej na parę nasyconą mokrą lub odwrotnie.

Na przykład w turbinach do przyrządów ekspansyjnych (łopatek) doprowadzana jest para wodna przegrzana, która w wyniku wielokrotnego rozprężania, na wylocie z turbiny przeważnie jest parą nasyconą mokrą.

Przemiany w zakresie pary przegrzanej zachodzą według zasad obowiązujących dla gazów. Kiedy przemiana rozpoczyna się w obszarze pary przegrzanej a kończy w obszarze pary nasyconej mokrej, jej właściwości w tej części przemiany zależą od stopnia suchości.

Do określenia stanu pary nasyconej mokrej konieczne jest wówczas obliczenie wymaganych parametrów tj.  $v$ ,  $i$ ,  $s$  lub  $u$ , dla określonego stopnia suchości  $x$ . Wzory do obliczania innych parametrów termodynamicznych pary mokrej o suchości  $x$  mają postać:

$$u = u' + x \cdot (u'' - u') = u' + x \cdot \zeta, \quad (1)$$

$$i = i' + x \cdot (i'' - i') = i' + x \cdot r, \quad (2)$$

$$s = s' + x \cdot (s'' - s') = s' + x \cdot \frac{r}{T}. \quad (3)$$

Z zależności:

$$v = v' + x(v'' - v') = v' + x \frac{\psi}{p} \quad (4)$$

wynika wzór do obliczania stopnia suchości

$$x = \frac{v - v'}{v'' - v'} \quad (5)$$

Energię wewnętrzną właściwą wrzącej cieczy oblicza się z zależności:

$$u' = i' - p \cdot v' \quad (6)$$

i tak samo energię wewnętrzną właściwą pary nasyconej suchej:

$$u'' = i'' - p \cdot v'' \quad (7)$$

Do obliczania przemian w obszarze pary nasyconej mokrej można stosować równania podane wcześniej dla gazów, przy czym w tym przypadku należy podstawiać wartości parametrów obliczone dla danego stopnia suchości lub wprowadzać do wzorów zależności, z których te parametry są obliczane.

Jeżeli zastosuje się ostatni sposób to poniższe wzory dla gazów i pary przegrzanej będą miały inne postacie.

Wzory podane wcześniej dla gazów, mające zastosowanie również w przemianach par, są następujące:

➤ równania pierwszej zasady termodynamiki dla układów zamkniętych i otwartych

$$q_{1-2} = u_2 - u_1 + l_{1-2} = i_2 - i_1 + l_{1-2}. \quad (8)$$

➤ ciepło przemiany zależne od entropii

$$q_{1-2} = \int_1^2 T ds. \quad (9)$$

➤ praca bezwzględna przemiany

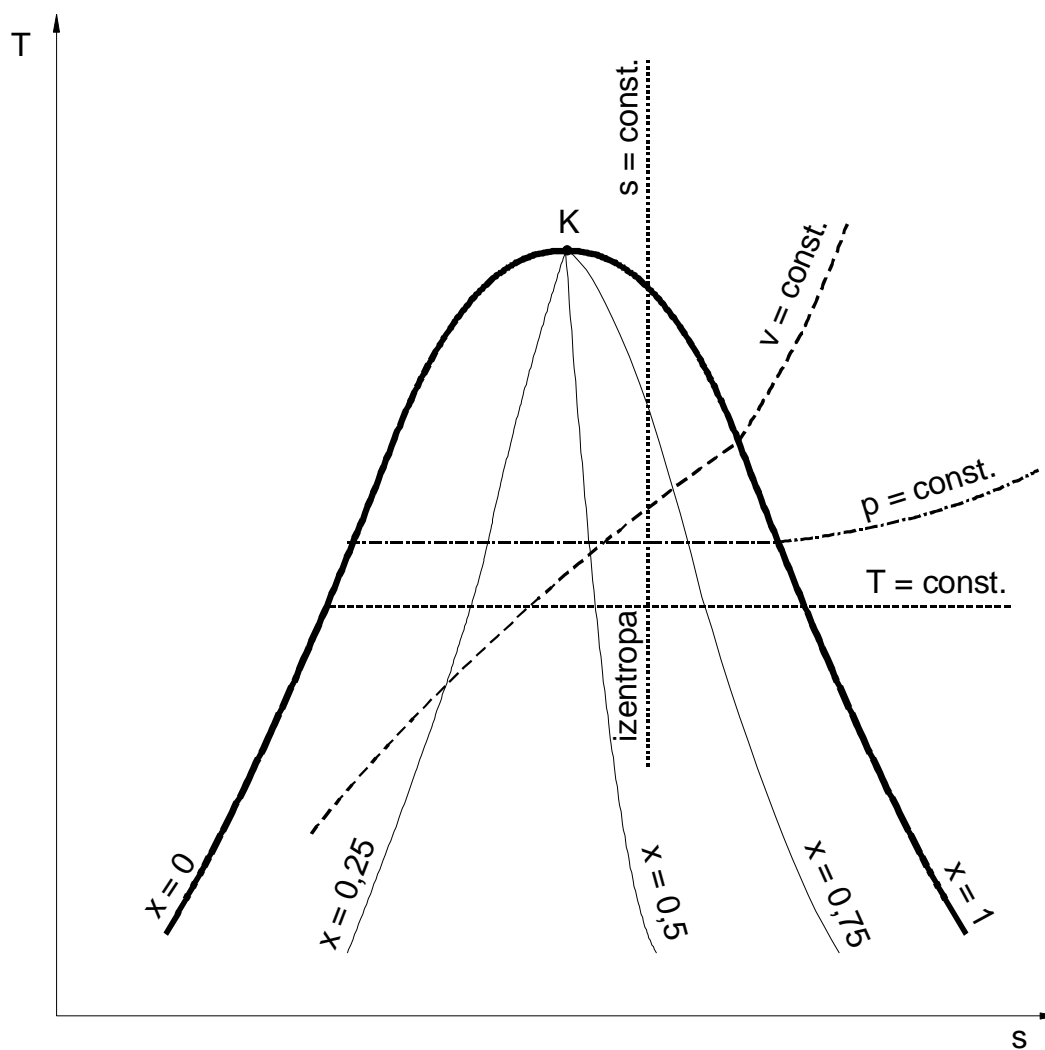
$$l_{1-2} = \int_1^2 p dv. \quad (10)$$

➤ praca techniczna

$$l_{t1-2} = - \int_1^2 v dp = l_{1-2} - (p_2 \cdot v_2 - p_1 \cdot v_1). \quad (11)$$

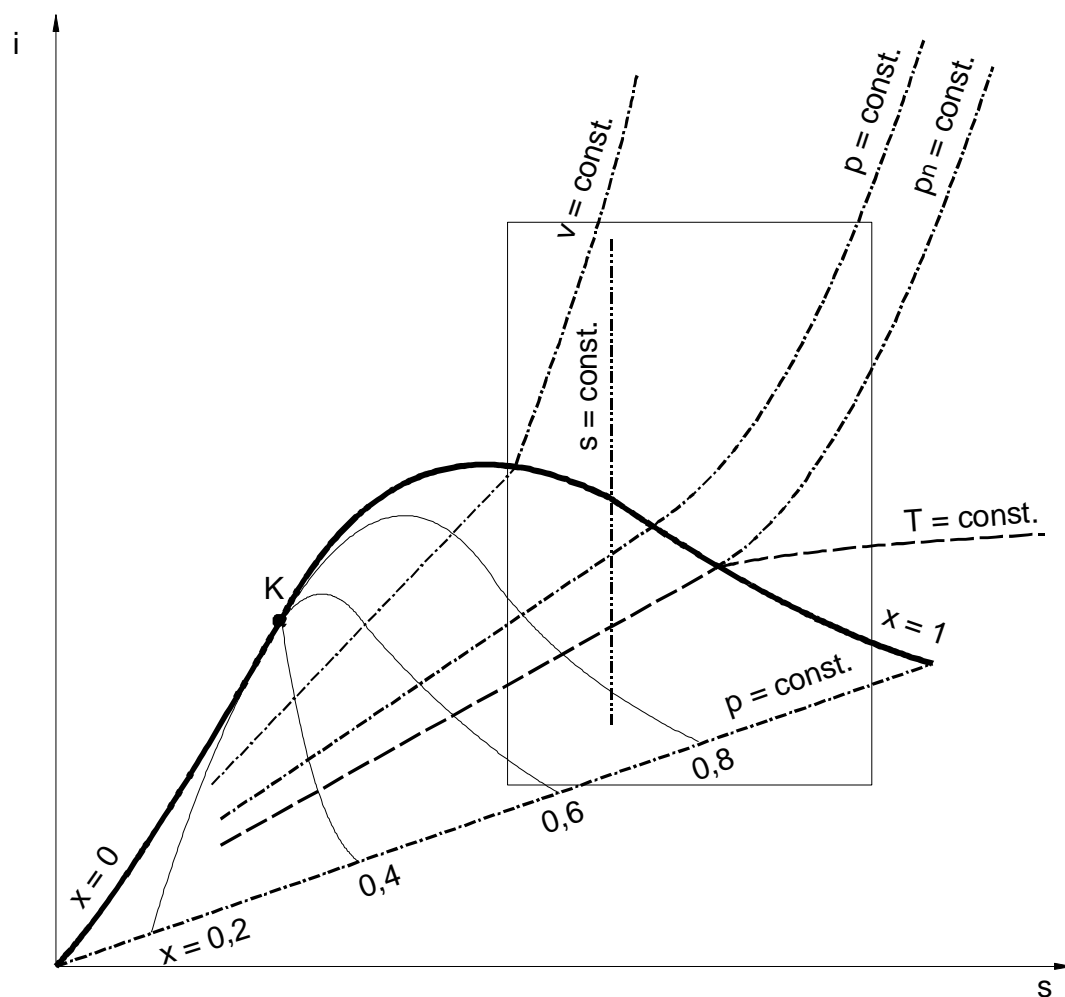
➤ przyrost energii wewnętrznej

$$u_2 - u_1 = i_2 - i_1 - (p_2 \cdot v_2 - p_1 \cdot v_1). \quad (12)$$



Rys. 1. Obszar pary wodnej na wykresie granicznym o współrzędnych T-s  
 Źródło: Opracowanie własne

Fig. 1. The area of water steam on the boundary diagram with T-s coordinates  
 Source: Elaboration of the Author



Rys. 2. Obszar pary wodnej na wykresie granicznym o współrzędnych i-s

Źródło: Opracowanie własne

Fig. 2. The area of water steam on the boundary diagram with i-s coordinates

Source: Elaboration of the Author

## 2. Przemiana izochoryczna

W przemianach izochorycznych objętość lub objętość właściwa jest stała:

$$V_2 = V_1, \quad (13)$$

$$v_2 = v_1, \quad (14)$$

a praca bezwzględna przemiany

$$l_{1-2} = 0. \quad (15)$$

Ciepło przemiany w obszarze pary przegrzanej

$$q_{1-2} = u_2 - u_1 = i_2 - i_1 - v \cdot (p_2 - p_1). \quad (16)$$

Praca techniczna przemiany pary przegrzanej

$$l_{t1-2} = v \cdot (p_1 - p_2). \quad (17)$$

Wartości energii wewnętrznej odczytuje się z tablic lub oblicza według zależności

$$u = i - p \cdot v \quad (18)$$

przy czym wartości entalpii podawane są w tablicach dla par przegrzanych.

Jeżeli przemiana przebiega w obszarze pary nasyconej mokrej zachodzi konieczność określenia wartości parametrów występujących we wzorach (16) i (17) dla stopni suchości na początku i końcu przemiany:

$$u_1 = u'_1 + x_1 \cdot (u''_1 - u'_1) = u'_1 + x_1 \cdot \zeta_1, \quad (19)$$

$$u_2 = u'_2 + x_2 \cdot (u''_2 - u'_2) = u'_2 + x_2 \cdot \zeta_2 \quad (20)$$

Wartości energii wewnętrznej wrzącej cieczy  $u'$  oraz pary nasyconej suchej  $u''$  dla stanu początkowego i końcowego przemiany odczytuje się z tablic lub oblicza ze wzoru

$$u = i - p \cdot v, \quad (21)$$

podstawiając odczytane wartości  $i'$ ,  $i''$ ,  $v'$  i  $v''$  dla ciśnień stanu początkowego i końcowego przemiany.

Zależności na energię wewnętrzną można podstawić do wzoru (16) na ciepło przemiany izochorycznej, wówczas:

$$q_{1-2} = [u'_2 + x_2 \cdot (u''_2 - u'_2)] - [u'_1 + x_1 \cdot (u''_1 - u'_1)] = (u'_2 - u'_1) + x_2 \cdot \zeta_2 - x_1 \cdot \zeta_1. \quad (22)$$

Objętość właściwa w przemianach izochorycznych w tym również w obszarze pary nasyconej mokrej jest stała i wynosi:

$$v_1 = v'_1 + x_1 \cdot (v''_1 - v'_1) = v'_2 + x_2 \cdot (v''_2 - v'_2) = v_2. \quad (23)$$

Izochory na wykresach o współrzędnych  $p$ - $v$ ,  $T$ - $s$  oraz  $i$ - $s$  przedstawiono na rysunkach 1 i 2. Na wykresie o współrzędnych  $p$ - $v$  izochora jest linią prostą pionową.

W układzie  $T$ - $s$  izochora jest linią krzywą o różnym pochyleniu w obszarze pary mokrej i przegrzanej.

W obszarze pary mokrej izochora wychodząca z punktu położonego na linii  $x = 1$  zbliża się do linii  $x = 0$ , lecz jej nie przecina.

W obszarze pary przegrzanej od linii  $x = 1$  przebiega bardziej stromo i stopniowo zbliża się do izochory gazu doskonałego, tj. krzywej logarytmicznej.

Na wykresie o współrzędnych  $i$ - $s$  izochora składa się również z dwóch rodzajów krzywych przebiegających bardziej stromo, w porównaniu z wykresem  $T$ - $s$ .

### 3. Przemiana izobaryczna

Wyprowadzenie wzorów dla przemiany izobarycznej w obszarze pary mokrej, jak również dla innych rodzajów przemian, następuje analogicznie jak dla przemiany izochorycznej.

W przemianie izobarycznej ciśnienie jest stałe. W obszarze pary mokrej jest ono ciśnieniem nasycenia. Praca techniczna jest równa zeru:

$$l_{1-2} = 0 \quad (24)$$

Praca bezwzględna:

$$l_{1-2} = p \cdot (v_2 - v_1), \quad (25)$$

$$v_2 = v'_2 + x_2 \cdot (v''_2 - v'_2), \quad (26)$$

$$v_1 = v'_1 + x_1 \cdot (v''_1 - v'_1). \quad (27)$$

W przemianie przy stałym ciśnieniu nasycenia wartość  $v'$  oraz  $v''$ , jak również  $i'$  oraz  $i''$  są jednakowe dla początku i końca przemiany, więc nie ma potrzeby ich oznaczania 1 i 2.

Ostatecznie:

$$l_{1-2} = p \cdot (x_2 - x_1) \cdot (v'' - v'). \quad (28)$$

Ciepło przemiany izobarycznej zmienia entalpię pary

$$q_{1-2} = i_2 - i_1, \quad (29)$$

$$i_2 = i' + x_2 \cdot r, \quad (30)$$

$$i_1 = i' + x_1 \cdot r, \quad (31)$$

po podstawieniu

$$q_{1-2} = r \cdot (x_2 - x_1) = (i'' - i') \cdot (x_2 - x_1) = T \cdot (s'' - s') \cdot (x_2 - x_1). \quad (32)$$

Na wykresie o współrzędnych p-v izobara jest linią prostą poziomą. Na wykresie w układzie T-s izobara w obszarze pary mokrej jest również linią prostą poziomą. Od punktu leżącego na linii  $x = 1$  izobara w obszarze pary przegrzanej odchyła się bez załamania do góry, przyjmując stopniowo kształt krzywej logarytmicznej gazu doskonałego. Na wykresach o współrzędnych T-s oraz i-s izobara jest mniej stroma od izochory.

#### 4. Przemiana izotermiczna

Temperatura w przemianie izotermicznej jest stała i w obszarze pary mokrej jest równocześnie temperaturą nasycenia. W przemianie izotermicznej, tak jak w izobarycznej, wartości parametrów wrzącej cieczy i pary nasyconej suchej mają jednakowe wartości dla stanu początkowego i końcowego.

Entropia ma postać:

$$s_2 = s' + x_2 \cdot \frac{r}{T}, \quad (33)$$

$$s_1 = s' + x_1 \cdot \frac{r}{T}. \quad (34)$$

Ciepło przemiany przedstawia wzór:

$$q_{1-2} = T \cdot (s_2 - s_1) = T \cdot \left( s' + x_2 \cdot \frac{r}{T} - s' - x_1 \cdot \frac{r}{T} \right) = (x_2 - x_1) \cdot r. \quad (35)$$

Praca bezwzględna przemiany na podstawie wzoru (10.15):

$$l_{1-2} = u_1 - u_2 + q_{1-2} = u_1 - u_2 - T \cdot (s_2 - s_1) = u_1 - u_2 - (x_2 - x_1) \cdot r. \quad (36)$$

Praca techniczna przemiany z (35):

$$l_{tl-2} = i_1 - i_2 + q_{1-2} = i_1 - i_2 - T \cdot (s_2 - s_1) = i_1 - i_2 - (x_2 - x_1) \cdot r. \quad (37)$$

Wartości entalpii, entropii i energii wewnętrznej pary mokrej dla stanu początkowego i końcowego określa się w sposób podany w poprzednich przemianach.

Na wykresie p-v oraz T-s izoterma jest w obszarze pary mokrej linią prostą poziomą tak jak izobara, natomiast na wykresie i-s pochyloną linią prostą równoległą do izobary nasycenia  $p_n$  przy tej temperaturze (Rys. 2).

W obszarze pary przegrzanej, na wykresie o współrzędnych p-v izoterma załamuje się na linii  $x = 1$  i odchyła w dół zbliżając się swoim kształtem do hiperboli w miarę wzrostu objętości właściwej. Na wykresie i-s również załamuje się i pochyla łukowato w kierunku poziomemu.

## 5. Przemiana izentropowa

W przemianie adiabatycznej odwracalnej (izentropowej) entropia jest stała ( $s = \text{const}$ ), gdyż ciepło przemiany jest równe zeru:

$$q = 0. \quad (38)$$

Praca bezwzględna przemiany:

$$l_{1-2} = u_1 - u_2 = i_1 - i_2 - (p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2), \quad (39)$$

a dla pary mokrej po podstawieniu wzorów na u:

$$l_{1-2} = u'_1 + x_1 \cdot \zeta_1 - u'_2 - x_2 \cdot \zeta_2. \quad (40)$$

Praca techniczna przemiany

$$l_{t1-2} = i_1 - i_2, \quad (41)$$

a dla pary mokrej

$$l_{t1-2} = i'_1 + x_1 \cdot r_1 - i'_2 - x_2 \cdot r_2. \quad (42)$$

Stopień suchości pary można obliczyć z przyrównania entropii początku i końca przemiany, to jest:

$$s_1 = s_2 = \text{const}. \quad (43)$$

Zatem

$$s'_1 + x_1 \cdot \frac{r_1}{T_1} = s'_2 + x_2 \cdot \frac{r_2}{T_2}, \quad (44)$$

a z powyższego

$$x_2 = \frac{s'_1 - s'_2 + x_1 \cdot \frac{r_1}{T_1}}{\frac{r_2}{T_2}}. \quad (45)$$

Jeżeli przemiana izentropowa rozpoczyna się w obszarze pary przegrzanej, a kończy w obszarze pary mokrej i odwrotnie, lub gdy przebiega tylko w obszarze pary mokrej, to jej entropię  $s$  można obliczyć z wzoru:

$$s = s' + x \cdot (s'' - s') = s' + x \cdot \frac{r}{T} \quad (46)$$

oraz warunku stałej entropii, to jest:

$$s_1 = s_2 = s = \text{const.} \quad (47)$$

$$s = s'_2 + x_2 \cdot (s''_2 - s'_1). \quad (48)$$

Do obliczeń nie wymagających zbyt dużej dokładności dla przemian izentropowych można stosować równanie:

$$p \cdot v^\kappa = \text{const.} \quad (49)$$

Wykładnik  $\kappa$  izentropy zależy od rodzaju pary. Przyjmuje się wartości

- = 1,3 - dla pary wodnej przegrzanej
- = 1,135 - dla pary nasyconej suchej
- = 1,035 + 0,1x - dla przemian pary wodnej mokrej w zakresie stopnia suchości  $x \geq 0,7$ .

Dokładne wartości wykładników izentropy pary wodnej przegrzanej podawane są w postaci wykresów w funkcji temperatury i ciśnienia.

Pracę przemiany izentropowej pary mokrej o stopniu suchości  $x \geq 0,7$  można obliczyć w sposób przybliżony z wzorów dla gazu doskonałego, podstawiając obliczony wykładnik  $\kappa$ , na przykład:

$$l_{1-2} = \frac{1}{\kappa - 1} \cdot p_1 \cdot v_1 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]. \quad (50)$$

Izentropy na wykresach granicznych T-s oraz i-s są liniami prostymi pionowymi. Na wykresie p-v mają przebieg podobny jak dla gazu doskonałego z załamaniem na linii granicznej  $x = 1$  i odchyleniem w prawo w obszarze pary przegrzanej.

## 6. Przemiana adiabatyczna nieodwracalna

W czasie przemiany adiabatycznej nieodwracalnej praca tarcia zamienia się na ciepło tarcia  $q_f$ , które powoduje wzrost entropii. Dlatego, tak jak w przypadku gazów doskonałych, linia tej przemiany na wykresach granicznych T-s oraz i-s zawsze odchyła się w kierunku zwiększenia entropii, a na wykresie p-v w stronę zwiększającą objętość właściwą.

## 7. Wnioski

- Kiedy przemiana rozpoczyna się w obszarze pary przegrzanej a kończy w obszarze pary nasyconej mokrej, jej właściwości w tej części przemiany zależą od stopnia suchości.
- W przemianach izochorycznych objętość lub objętość właściwa jest stała.
- Objętość właściwa w przemianach izochorycznych w tym również w obszarze pary nasyconej mokrej jest stała.
- W przemianie izobarycznej ciśnienie jest stałe.
- Temperatura w przemianie izotermicznej jest stała i w obszarze pary mokrej jest równocześnie temperaturą nasycenia. W przemianie izotermicznej, tak jak w izobarycznej, wartości parametrów wrzącej cieczy i pary nasyconej suchej mają jednakowe wartości dla stanu początkowego i końcowego.



## Wykaz oznaczeń

<i>Symbol</i>	<i>Opis</i>	<i>Jednostka</i>
$i$	Entalpia spoczynkowa właściwa	J/kg
$i_1$	Entalpia spoczynkowa na początku przemiany	J/kg
$i_2$	Entalpia spoczynkowa na końcu przemiany	J/kg
$i'$	Entalpia spoczynkowa wrzącej cieczy	J/kg
$i''$	Entalpia spoczynkowa pary nasyconej suchej	J/kg
$i'_1$	Entalpia spoczynkowa wrzącej cieczy na początku przemiany	J/kg
$i'_2$	Entalpia spoczynkowa pary nasyconej suchej na końcu przemiany	J/kg
$l$	Praca bezwzględna właściwa	J/kg
$l_{1-2}$	Praca bezwzględna przemiany	J/kg
$l_{t1-2}$	Praca techniczna	J/kg
$p$	Ciśnienie	$N/m^2 \equiv Pa$
$p_1$	Ciśnienie przy temperaturze na początku przemiany	$N/m^2 \equiv Pa$
$p_2$	Ciśnienie przy temperaturze na końcu przemiany	$N/m^2 \equiv Pa$
$q$	Ciepło pochłonięte przez ciecz	J
$q_f$	Ciepło tarcia	J
$q_{1-2}$	Ciepło przemiany	J
$r$	Ciepło parowania (odparowania)	J/kg
$r_1$	Ciepło parowania na początku przemiany	J/kg
$r_2$	Ciepło parowania na końcu przemiany	J/kg
$s$	Entropia właściwa	J/kg·K
$s_1$	Entropia właściwa na początku przemiany	J/kg·K
$s_2$	Entropia właściwa na końcu przemiany	J/kg·K
$s'$	Entropia wrzącej cieczy	J/kg·K
$s''$	Entropia pary nasyconej suchej	J/kg·K
$s'_1$	Entropia wrzącej cieczy na początku przemiany	J/kg·K
$s'_2$	Entropia wrzącej cieczy na końcu przemiany	J/kg·K
$s''_1$	Entropia pary nasyconej na początku przemiany	J/kg·K
$s''_2$	Entropia pary nasyconej na końcu przemiany	J/kg·K
$u$	Energia wewnętrzna właściwa	J/kg
$u_1$	Energia wewnętrzna właściwa na początku przemiany	J/kg
$u_2$	Energia wewnętrzna właściwa na końcu przemiany	J/kg
$u'$	Energia wewnętrzna dla wrzącej cieczy	J/kg
$u''$	Energia wewnętrzna dla pary nasyconej suchej	J/kg
$u'_1$	Energia wewnętrzna dla wrzącej cieczy na początku przemiany	J/kg
$u'_2$	Energia wewnętrzna dla wrzącej cieczy na końcu przemiany	J/kg
$u''_1$	Energia wewnętrzna dla pary nasyconej suchej na początku przemiany	J/kg
$u''_2$	Energia wewnętrzna dla pary nasyconej suchej na końcu przemiany	J/kg
$v$	Objętość właściwa	$m^3/kg$
$v_1$	Objętość na początku przemiany	$m^3/kg$
$v_2$	Objętość na końcu przemiany	$m^3/kg$

$v'$	Objętość pary nasyconej na początku przemiany	$m^3/kg$
$v''$	Objętość pary nasyconej na końcu przemiany	$m^3/kg$
$v'_1$	Objętość pary nasyconej mokrej na początku przemiany	$m^3/kg$
$v''_1$	Objętość pary nasyconej mokrej na końcu przemiany	$m^3/kg$
$v'_2$	Objętość pary nasyconej mokrej na początku przemiany	$m^3/kg$
$v''_2$	Objętość pary nasyconej mokrej na końcu przemiany	$m^3/kg$
$x$	Stopień suchości pary	–
$x_1$	Stopień suchości pary na początku przemiany	–
$x_2$	Stopień suchości pary na końcu przemiany	–
$K$	Punkt krytyczny schodzenia się krzywych	–
$T$	Temperatura bezwzględna w stopniach Kelwina	$^{\circ}K$
$T_1$	Temperatura bezwzględna na początku przemiany	$^{\circ}K$
$T_2$	Temperatura bezwzględna na końcu przemiany	$^{\circ}K$
$V$	Objętość	$m^3$
$V'$	Objętość wrzącej cieczy w ilości $(1-x)$ kg	$m^3$
$V''$	Objętość 1 kg pary mokrej zawierającej $x$ kg pary nasyconej suchej	$m^3$
$\zeta$	Wewnętrzne ciepło parowania	J
$\zeta_1$	Wewnętrzne ciepło parowania na początku przemiany	J
$\zeta_2$	Wewnętrzne ciepło parowania na końcu przemiany	J
$\Psi$	Zewnętrzne ciepło parowania, które stanowi przyrost energii związanej ze zmianą objętości właściwej pary w procesie parowania	J

## Literatura

- [1] Litke B.: *Interpretacja pierwszej zasady termodynamiki dla układów zamkniętych i otwartych*. Problemy Nauk Stosowanych, Tom 3, Szczecin: WSTE, 2015, s. 133-134.
- [2] Litke B.: *Właściwości gazów doskonałych i półdoskonałych*. Problemy Nauk Stosowanych, Tom 4, Szczecin: WSTE, 2016, s. 95-106.
- [3] Litke B.: *Stan równowagi trwałej układu termodynamicznego. Entropia*. Problemy Nauk Stosowanych, Tom 5, Szczecin: WSTE, 2016, s. 73-84.
- [4] Litke B.: *Przemiany gazów doskonałych i półdoskonałych*. Problemy Nauk Stosowanych, Tom 6, Szczecin: WSTE, 2017, s. 83-96.
- [5] Litke B.: *Pola pracy przemian izentropowych i adiabatycznych na wykresie Belpaire'a*. Problemy Nauk Stosowanych, Tom 7, Szczecin: WSTE, 2017, s. 101-106.
- [6] Litke B.: *Znaczenie liczb podobieństwa w badaniach modelowych procesów termodynamicznych silników cieplnych*. Problemy Nauk Stosowanych, Tom 7, Szczecin: WSTE, 2017, s. 107-114.
- [7] Nagórski A., Sobociński R.: *Wybrane zagadnienia z termodynamiki technicznej. Zbiór zadań*. Warszawa: Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, 2008.
- [8] Ochęduszko S.: *Termodynamika stosowana*. Warszawa: WNT, 1974.
- [9] Staniszewski B.: *Termodynamika*. Warszawa: PWN, 1986.
- [10] Szargut J.: *Termodynamika*. Warszawa: PWN, 2000.
- [11] Szargut J.: *Termodynamika techniczna*. Gliwice: Politechnika Śląska, 2013, w. 7.
- [12] Wiśniewski S.: *Termodynamika techniczna*. Warszawa: WNT, 2013.
- [13] Wrzeński Zb.: *Termodynamika*. Warszawa: Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, 2008, w. 8 pop. i roz.
- [14] Zagórski J.: *Termodynamika*. Warszawa: Politechnika Warszawska, 1974, w. 4.