

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.*)

PARY

Streszczenie

Wstęp i cele: W pracy opisano proces wytwarzania pary, parametry pary mokrej, parę przegrzaną, oraz wykresy graniczne pary. Celem pracy jest opis graficznego przebiegu temperatury substancji przy izobarycznym podgrzewaniu, podanie charakterystyk pary mokrej i pary przegrzanej oraz opis graficzny pary wodnej.

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

Wyniki: Rezultatem analizy jest opracowanie analityczne procesu wytwarzania pary, parametrów pary mokrej (wilgotnej) oraz przedstawienie graficzne wykresów granicznych pary.

Wnioski: W czasie podgrzewania cieczy przy wyższym ciśnieniu, temperatura nasycenia jest wyższa. Czas parowania cieczy zmniejsza się ze wzrostem ciśnienia. Przy wyższym ciśnieniu do odparowania cieczy wymagana jest mniejsza ilość ciepła. Proces izobarycznego parowania jest również procesem izotermicznym. Wartości parametrów termodynamicznych pary mokrej zależą więc od stopnia suchości.

Słowa kluczowe: Pary, proces wytwarzania, para przegrzana, para mokra (wilgotna), parametry pary przegrzanej i mokrej, wykres graniczny pary.

(Otrzymano: 01.09.2018; Zrecenzowano: 10.09.2018; Zaakceptowano: 20.09.2018)

STEAMS

Abstract

Introduction and aim: The work describes the steam generation process, wet steam parameters, superheated steam, and steam limit graphs. The aim of the work is to describe the graphic temperature course of the substance during isobaric heating, to provide the characteristics of wet steam and superheated steam and a graphic description of the water vapor.

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 analytical development of the steam generation process, the parameters of the wet (damp) steam and the graphic representation of the steam boundary graphs.

Conclusion: When the fluid is heated at a higher pressure, the saturation temperature is higher. The evaporation time of the fluid decreases with increasing pressure. At higher pressure, less heat is needed to evaporate the fluid. The process of isobaric evaporation is also an isothermal process. The values of thermodynamic parameters of wet steam depend on the degree of dryness.

Keywords: Steam, production process, superheated steam, wet steam (wet), parameters of superheated and wet steam, steam limit graph.

(Received: 01.09.2018; Revised: 10.09.2018; Accepted: 20.09.2018)

1. Wstęp

W warunkach otoczenia każde ciało występuje przeważnie w jednym stanie skupienia. Natomiast woda, w zależności od aktualnych warunków atmosferycznych, może być w stanie skupienia stałym, ciekłym lub gazowym. Aby zmienić stan skupienia ciała należy obniżyć albo podwyższyć odpowiednio jego temperaturę lub ciśnienie.

W maszynach termodynamicznych czynnikiem roboczym są różnego rodzaju gazy jak powietrze, spaliny lub pary. Gazy spalinowe uzyskuje się wskutek spalania paliw, np. w silnikach spalinowych tłokowych lub turbinowych. Pary substancji wykorzystuje się do realizacji różnych obiegów termodynamicznych takich jak silników parowych, turbin parowych, chłodziarek i innych. W silnikach cieplnych parowych stosowana jest oczywiście para wodna. Parę uzyskuje się przez podgrzanie substancji będącej w stanie ciekłym, przy czym temperatury powstawania pary różnych substancji termodynamicznych nie są jednakowe. Temperatura parowania zależy ponadto od ciśnienia - im wyższe ciśnienie, tym wyższa temperatura wrzenia cieczy. Zależność ta jest też odwrotna.

2. Proces wytwarzania pary

Rysunek 1 przedstawia zmiany temperatury t cieczy od 0°C w czasie τ , przy stałym strumieniu doprowadzanego ciepła \dot{q} i stałym ciśnieniu p . Naczynie z pewną ilością cieczy, na przykład 1 kg wody, jest zamknięte szczelnym ruchomym tłokiem, którego ciężar wywołuje stałe ciśnienie w naczyniu. Dostarczane ciepło powoduje wzrost temperatury cieczy, ale tylko do chwili pojawienia się pęcherzyków pary. W tym okresie objętość właściwa cieczy nieznacznie wzrasta. Zjawisko wydzielania się w cieczy pęcherzyków pary nazywa się wrzeniem, a taka ciecz nosi nazwę cieczy wrzącej. Ciśnienie i temperatura, przy których trwa wrzenie cieczy nazwano temperaturą i ciśnieniem nasylenia.

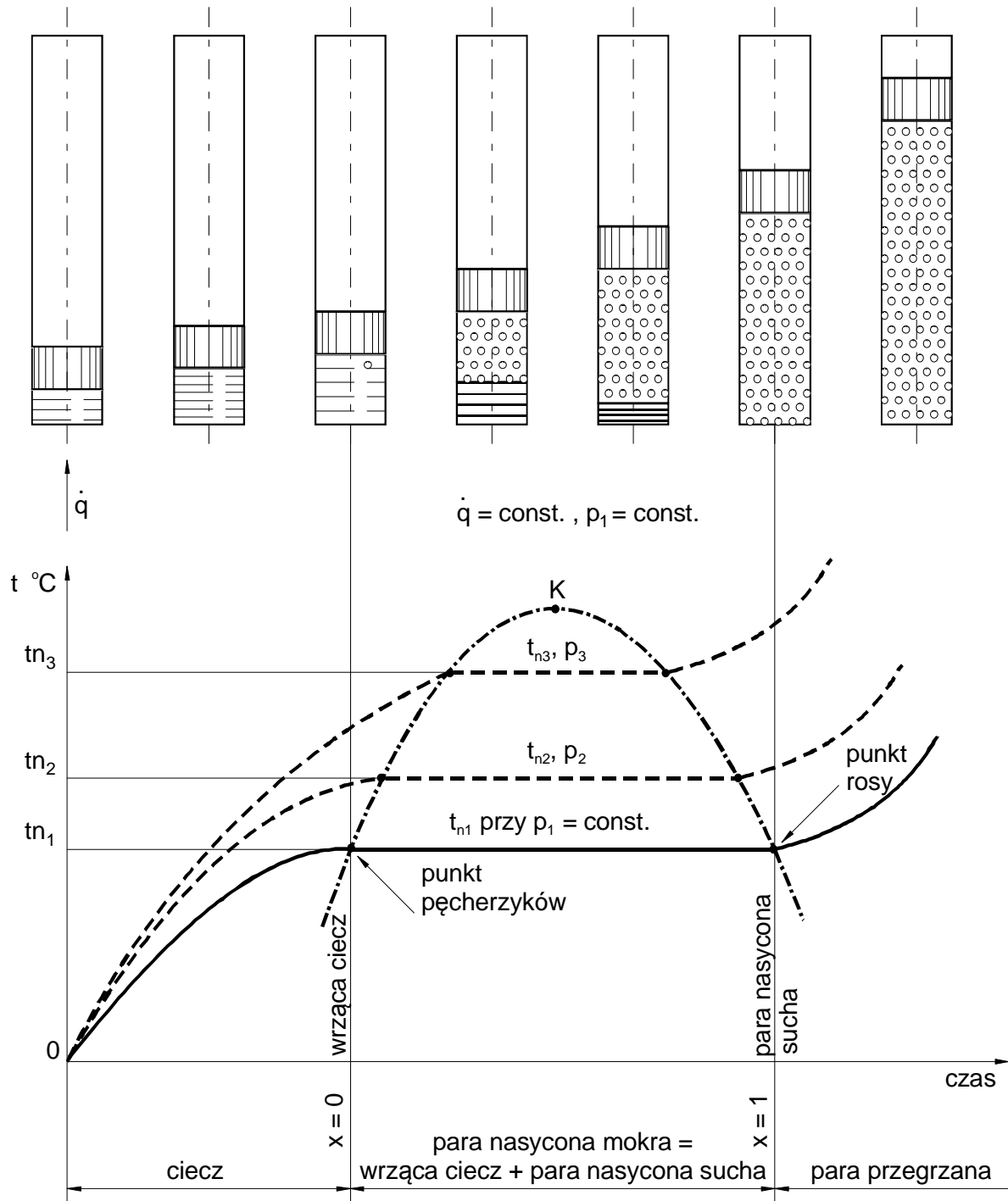
Wielkości termodynamiczne dotyczące wrzącej cieczy, której parametry oznacza się indeksem $'$, np. m' , v' , u' , i' , s' . Para wydzielająca się z wrzącej cieczy nazywa się parą nasyconą i jeżeli nie jest zmieszana z cieczą jest parą nasyconą suchą. Wielkości odnoszące się do pary nasyconej suchej oznacza się indeksem $''$, np. v'' . W czasie kiedy ciecz wrze, mimo pochłaniania doprowadzanego ciepła, temperatura jest stała nazwana temperaturą nasylenia t_n . Mieszanina wrzącej cieczy i pary nasyconej suchej, występująca w okresie wydzielania się pary nazywa się parą nasyconą mokrą lub wilgotną. Nazywana też jest często wprost parą mokrą. Masa pary mokrej $m = m' + m''$. W okresie wrzenia skład pary mokrej w sposób ciągły ulega zmianie. Zwiększa się udział pary nasyconej suchej kosztem cieczy. Udział masowy pary nasyconej suchej w parze mokrej określany jest stopniem suchości x . Stopień suchości lub w uproszczeniu suchość pary jest to masa pary nasyconej suchej zawartej w 1 kg pary mokrej, albo ogólniej jest to stosunek ilości pary nasyconej suchej do masy pary mokrej:

$$x = \frac{m''}{m} = \frac{m''}{m' + m''} \quad (1)$$

Przebieg powstawania pary pokazuje rysunek 1. Na początku wrzenia masa pary nasyconej suchej $m'' = 0$, więc suchość $x = 0$. W momencie zakończenia wrzenia masa cieczy wrzącej $m' = 0$ - naczynie wypełnia tylko para nasycona sucha m'' . Stopień suchości wynosi wówczas $x = 1$.

Po całkowitym odparowaniu cieczy dalsze doprowadzanie ciepła powoduje wzrastanie temperatury pary (powyżej temperatury nasylenia), a para nasycona sucha staje się parą przegrzaną.

W przypadku podgrzewania cieczy przy wyższym ciśnieniu, temperatura nasycenia jest wyższa. Przebiegi temperatur przy ciśnieniach p_2 i p_3 wyższych od p_1 , przedstawiono na rysunku 1 liniami przerywanymi. Widoczne jest, że czas parowania cieczy zmniejsza się ze wzrostem ciśnienia. Oznacza to, że przy wyższym ciśnieniu do odparowania cieczy wymagana jest mniejsza ilość ciepła. Przy odpowiednio dużym ciśnieniu ciepło parowania jest równe zero, więc zmiana stanu ciekłego w parowy zachodzi bezpośrednio, tzn. bez okresu przejściowego w postaci pary mokrej.



Rys. 1. Przebieg zmian temperatury substancji przy izobarycznym podgrzewaniu

Źródło: Opracowanie własne

Fig. 1. The course of temperature changes of substances in isobaric heating

Source: Elaboration of the Author

Ciśnienie oraz temperatura odpowiadające takiej przemianie nazywają się krytycznymi i są oznaczane p_K , T_K . Na rysunku 1, punkt przemiany krytycznej oznaczono literą K. Dla wody parametry krytyczne mają następujące wartości: $p_K = 22,1287$ MPa i $t_K = 374,15^\circ\text{C}$.

Pochłanianie ciepła przez substancję w poszczególnych fazach podgrzewania przebiega według innej zależności.

Ciepło pochłonięte przez ciecz do chwili wrzenia wyraża się zależnością:

$$q = c \cdot (t_n - t_0), \quad (2)$$

gdzie c to ciepło właściwe cieczy, t_0 - temperatura początku podgrzewania, t_n - temperatura nasycenia.

Ciepło pochłonięte w okresie wrzenia cieczy określa się z równania pierwszej zasady termodynamiki:

$$dq = di - vdp. \quad (3)$$

Przy stałym ciśnieniu wrzenia $dp = 0$ więc $dq = di$. W wyniku całkowania i oznaczeniu wrzącej cieczy oraz pary nasyconej suchej wcześniejszymi znakami:

$$q'' - q' = i'' - i' = r. \quad (4)$$

Ilość ciepła ($q'' - q'$) zużytego na odparowanie 1 kg wrzącej cieczy (przy stałym ciśnieniu) nazwano ciepłem parowania r .

Po podstawieniu za entalpię i wyrażenia $u + p \cdot v$ otrzymuje się:

$$r = i'' - i' = (u'' + p \cdot v'') - (u' + p \cdot v') = (u'' - u') + p \cdot (v'' - v'). \quad (5)$$

Występujące wyrażenia nazwano:

$u'' - u' = \zeta$ - wewnętrznym ciepłem parowania,

$p \cdot (v'' - v') = \psi$ - zewnętrznym ciepłem parowania, które stanowi przyrost energii związanej ze zmianą objętości właściwej pary w procesie parowania.

Ostatecznie:

$$r = \zeta - \psi. \quad (6)$$

Proces izobarycznego parowania jest również izotermicznym.

W zależności (4) ciepła mogą być zastąpione wyrażeniem $s \cdot T$, więc:

$$r = T \cdot (s'' - s'), \quad (7)$$

a z powyższego

$$s'' - s' = \frac{r}{T}. \quad (8)$$

3. Parametry pary mokrej (wilgotnej)

Podczas wrzenia cieczy w sposób ciągły zmienia się skład i przez to właściwości pary mokrej. Wartości parametrów termodynamicznych pary mokrej zależą więc od stopnia suchości x .

Objętość właściwą pary mokrej o określonej suchości można wyznaczyć korzystając z definicji suchości.

Jeden kilogram pary mokrej zawiera x kg pary nasyconej suchej zajmującej objętość V'' m³. Wrząca ciecz w ilości $(1-x)$ kg ma objętość V' m³.

Po podzieleniu tych objętości przez ich masy otrzyma się objętości właściwe:

$$v'' = \frac{V''}{x} \quad (9)$$

oraz

$$v' = \frac{V'}{1-x}. \quad (10)$$

Z powyższego otrzymuje się:

$$V'' = x \cdot v'', \quad (11)$$

$$V' = (1-x) \cdot v'. \quad (12)$$

Objętość V zajmowana przez 1 kg pary mokrej jest sumą objętości pary nasyconej suchej i wrzącej cieczy:

$$V = V'' + V', \quad (13)$$

ale objętość V jednego kilograma substancji jest jej objętością właściwą $v \left(\frac{V}{m = 1\text{kg}} \right)$, więc:

$$V = v = V'' + V' = x \cdot v'' + (1-x) \cdot v'. \quad (14)$$

Po przekształceniu wzór (13) ma postać:

$$v = v' + x \cdot (v'' - v') = v' + x \cdot \frac{\Psi}{p}. \quad (15)$$

W analogiczny sposób można wyprowadzić wzory do obliczania innych parametrów termodynamicznych pary mokrej o suchości x :

$$u = u' + x \cdot (u'' - u') = u' + x \cdot \zeta, \quad (16)$$

$$i = i' + x \cdot (i'' - i') = i' + x \cdot r, \quad (17)$$

$$s = s' + x \cdot (s'' - s') = s' + x \cdot \frac{r}{T}. \quad (18)$$

Z zależności (15) wynika drugi wzór do obliczania stopnia suchości:

$$x = \frac{v - v'}{v'' - v'} \quad (19)$$

Wartości parametrów v , i oraz s dla wrzącej wody i pary wodnej nasyconej suchej, jak również dla innych często stosowanych substancji termodynamicznych, np. dla amoniaku, freonów są podane w tablicach, będących też załącznikami w książkach, w których występują zagadnienia termodynamiczne.

Zawarte są też wartości temperatury nasycenia i ciepła parowania r .

Energię wewnętrzną właściwą wrzącej cieczy oblicza się z zależności:

$$u' = i' - p \cdot v' \quad (20)$$

i tak samo energię wewnętrzną właściwą pary nasyconej suchej

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

4. Para przegrzana

Para nasycona sucha podgrzana powyżej temperatury nasycenia nazywa się parą przegrzaną. Wartości parametrów par przegrzanych różnych czynników mianowicie: objętości właściwej, entalpii i entropii, przy różnych wartościach temperatur i ciśnień zawarte są w tablicach lub na wykresach stanowiących załączniki w książkach jak też jako oddzielne wydania.

W publikacjach dotyczących konkretnych urządzeń cieplnych, na ogół podawane są też inne parametry jak np. ciepło właściwe, lepkość, przewodność cieplna w funkcji ciśnienia i temperatury.

Para przegrzana przy temperaturze i ciśnieniu przekraczających w stopniu umiarkowanym parametry nasycenia, może być traktowana, jeżeli nie jest wymagana zbyt duża dokładność obliczeń, jak gaz doskonały albo półdoskonały.

Przy wyższych wartościach tych parametrów, przemiany pary przegrzanej można obliczać, z zadowalającą dokładnością, według równań dla gazów rzeczywistych.

Parametry pary przegrzanej v , i , s i inne zawarte są w tablicach, które są umieszczane w podręcznikach.

5. Wykresy graniczne pary

Na podstawie danych zawartych w tablicach dotyczących pary nasyconej, gdzie podawane są parametry dla wrzącej cieczy oraz pary nasyconej suchej, tj. w chwili zakończenia parowania, można sporządzić wykresy tzw. graniczne w układach o współrzędnych p - v , T - s oraz i - s .

Wykresy w układzie p - v oraz T - s są podobne do linii zarysu początku i końca wrzenia na rysunku 1 (linia - · -).

Wykres o współrzędnych i - s w znacznym stopniu jest zniekształcony w porównaniu z poprzednimi, gdyż inna jest skala entalpii w porównaniu z temperaturą.

Dokładność odczytywanych z wykresów wartości jest mniejsza w porównaniu z tabelarycznymi, ale w zastosowaniach praktycznych wystarczająca. Zaletą korzystania z wykresów jest możliwość przedstawiania przemian w formie graficznej, co ułatwia ich śledzenie i analizowanie.

Wykres graniczny pary sporządza się przez naniesienie punktów wyrażających wartości parametrów przy różnych wartościach ciśnienia, temperatury lub entalpii wrzącej cieczy i pary nasyconej suchej.

Po poprowadzeniu przez te punkty linii otrzyma się dwie krzywe, lewą i prawą, schodzące się w punkcie krytycznym K .

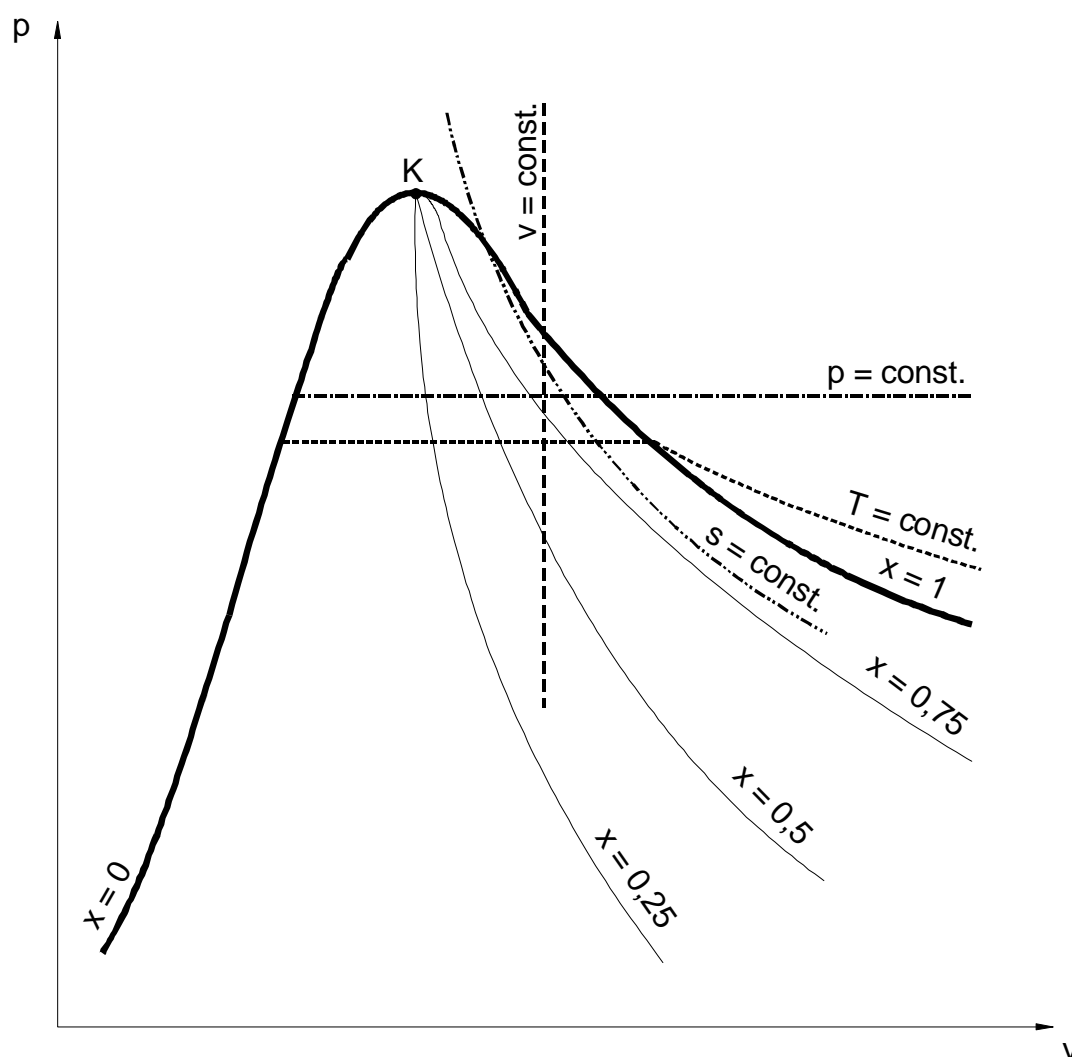
Linia lewa określa parametry wrzącej cieczy i równocześnie pary mokrej o stopniu suchości $x = 0$. Lewa krzywa nazywana też jest dolną krzywą graniczną a prawa górną krzywą graniczną. Górna krzywa graniczna jest miejscem geometrycznym punktów pary nasyconej suchej (koniec parowania cieczy), której stopień suchości $x = 1$.

Na rysunku 2 przedstawiono poglądowy wykres graniczny pary wodnej w układzie p - v .

Na wykresach granicznych mogą być naniesione linie stałej suchości o wartościach $x > 0$ i $x < 1$.

Linie stałej suchości w układzie o współrzędnych p - v sporządza się w oparciu o wzór (15).

Linie stałej suchości dla np. $x = 0,75$ sporządza się następująco: oblicza się wartości objętości właściwej v , podstawiając wartości v' i v'' do wzoru (15) dla różnych ciśnień nasycenia.



Rys. 2. Obszar pary wodnej na wykresie granicznym o współrzędnych p-v

Źródło: Opracowanie własne

Fig. 2. The area of water vapor on the boundary diagram with p-v coordinates

Source: Elaboration of the Author

Poprowadzona na wykresie linia przez punkty odpowiadające obliczonym wartościom v jest miejscem geometrycznym pary mokrej o stałej suchości x .

W identyczny sposób sporządza się linie stałej suchości dla innych wartości x .

W analogiczny sposób nanosi się krzywe stałej suchości na wykresach o współrzędnych T-s oraz i-s przy wykorzystaniu wzorów (17) i (18).

6. Wnioski

- W przypadku podgrzewania cieczy przy wyższym ciśnieniu, temperatura nasycenia jest wyższa.
- Czas parowania cieczy zmniejsza się ze wzrostem ciśnienia.
- Przy wyższym ciśnieniu do odparowania cieczy wymagana jest mniejsza ilość ciepła.
- Proces izobarycznego parowania jest również izotermicznym.
- Wartości parametrów termodynamicznych pary mokrej zależą więc od stopnia suchości.

Wykaz oznaczeń

Symbol	Opis	Jednostka
c	Ciepło właściwe cieczy	J
i	Entalpia spoczynkowa właściwa	J/kg
i'	Entalpia spoczynkowa właściwa dla wrzącej wody	J/kg
i''	Entalpia spoczynkowa właściwa dla pary nasyconej suchej	J/kg
m	Masa – ilość substancji określona masą	kg
m'	Masa – ilość substancji określona masą wrzącej wody	kg
m''	Masa – ilość substancji określona masą pary nasyconej suchej	kg
p	Ciśnienie	$\text{N/m}^2 \equiv \text{Pa}$
p ₁	Ciśnienie przy temperaturze t ₁	$\text{N/m}^2 \equiv \text{Pa}$
p ₂	Ciśnienie przy temperaturze t ₂	$\text{N/m}^2 \equiv \text{Pa}$
p ₃	Ciśnienie przy temperaturze t ₃	$\text{N/m}^2 \equiv \text{Pa}$
p _k	Ciśnienie krytyczne	$\text{MN/m}^2 \equiv \text{MPa}$
q	Ciepło pochłonięte przez ciecz	J
q'	Ciepło pochłonięte przez wrzącą wodę	J
q''	Ciepło pochłonięte przez parę nasyconą suchą	J
r	Ciepło parowania (odparowania)	J/kg
s	Entropia właściwa	J/kg·K
s'	Entropia wrzącej wody	J/kg·K
s''	Entropia pary nasyconej suchej	J/kg·K
t	Temperatura w stopniach Celsjusza	°C
t _{n₁}	Temperatura przy ciśnieniu p ₁	°C
t _{n₂}	Temperatura przy ciśnieniu p ₂	°C
t _{n₃}	Temperatura przy ciśnieniu p ₃	°C
t _k	Temperatura krytyczna	°C
t ₀	Temperatura początku podgrzewania	°C
t _n	Temperatura nasycenia	°C
u	Energia wewnętrzna właściwa	J/kg
u'	Energia wewnętrzna właściwa wrzącej wody	J/kg
u''	Energia wewnętrzna właściwa pary nasyconej suchej	J/kg
v	Objętość właściwa	m^3/kg
v'	Objętość wrzącej wody	m^3/kg
v''	Objętość pary nasyconej suchej	
x	Stopień suchości pary	–
K	Punkt krytyczny schodzenia się krzywych	–
T	Temperatura bezwzględna w stopniach Kelwina	°K
T _k	Temperatura bezwzględna krytyczna w stopniach Kelwina	°K
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
ζ	Wewnętrzne ciepło parowania	J
Ψ	Zewnętrzne ciepło parowania, które stanowi przyrost energii związanej ze zmianą objętości właściwej pary w procesie parowania	J

Literatura

- [1] Ochęduszek S.: *Termodynamika stosowana*. Warszawa: WNT, 1974.
 [2] Staniszewski B.: *Termodynamika*. Warszawa: PWN, 1986.
 [3] Szargut J.: *Termodynamika*. Warszawa: PWN, 2000.