

Janusz Lewandowski

Instytut Techniki Ciepłej  
Politechniki Warszawskiej

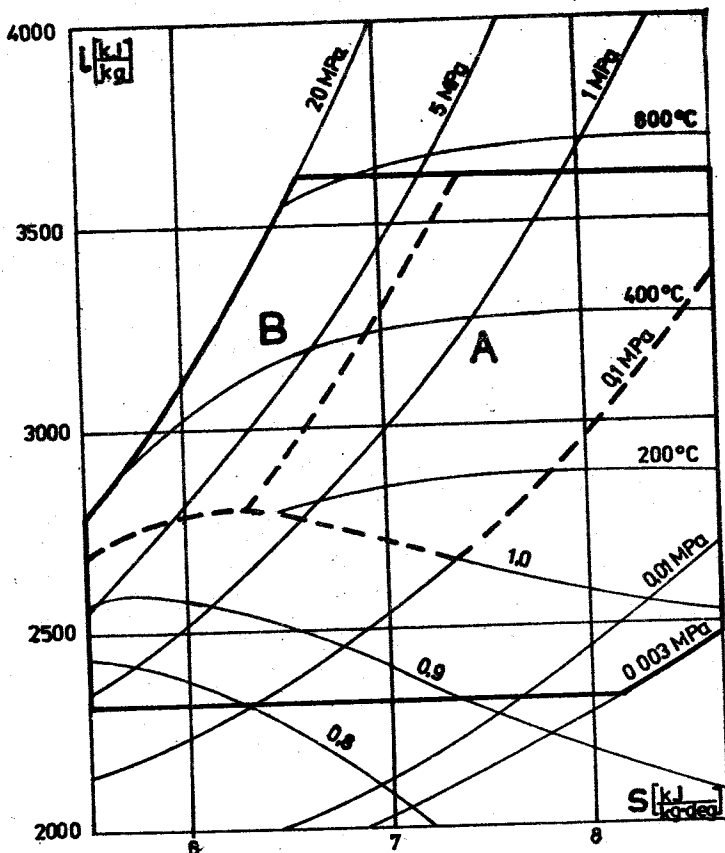
## ZADANIENIA OPISU WŁASNOŚCI TERMODYNAMICZNYCH PARY WODNEJ PRZY MODELOWANIU MATEMATYCZNYM DYNAMIKI TURBIN

W artykule omówiono zagadnienia związane z opisem własności termodynamicznych pary wodnej, ze szczególnym uwzględnieniem metody wyznaczania pochodnych termodynamicznych. Rozpatrzono zależności, których znajomość jest konieczna przy modelowaniu matematycznym dynamiki turbin. Przedstawiono metodę wyznaczania wartości pochodnych oraz zasady budowy procedur obliczeniowych pozwalających na obliczanie pochodnych w trakcie obliczeń modelu turbiny. Podano analityczne zależności między wybranymi pochodnymi termodynamicznymi a ciśnieniem i entalpią pary wodnej przegrzanej.

### 1. WSTĘP

Jednym z podstawowych zagadnień przy modelowaniu matematycznym turbin parowych jest problem opisu własności termodynamicznych pary wodnej i wody znajdującej się w jej układzie przepływowym. Przegląd stosowanych obecnie konstrukcji turbin wskazuje, że poszukiwany opis własności czynnika roboczego powinien dotyczyć pary wodnej w zakresie ciśnień  $p = 20 \div 0,0030$  MPa oraz entalpii  $i = 3600 \div 2300$  kJ/kg (rys.1). W układzie przepływowym turbiny występować może także woda, praktycznie o parametrach z linii nasycenia w zakresie ciśnień  $p = 7,5 \div 0,003$  MPa. Górny zakres ciśnień dla wody dotyczy turbin na parę nasyconą dla elektrowni jądrowych.

Dla celów modelowania procesów nieustalonych w turbinach założyć można, że para wodna znajduje się w stanie równowagi



Rys.1. Rozpatrywany obszar wykresu  $h - s$ , z zaznaczeniem pola pokrywanego w zakresie pochodnych termodynamicznych przez tablice [5] z dokładnością zbyt małą (A) i wystarczającą (B)

termodynamicznej [1], stąd opis jej własności termodynamicznych ogranicza się do szeregu związków między jej parametrami termodynamicznymi oraz zależności określających wartości wybranych pochodnych termodynamicznych w funkcji parametrów. W artykule omówiono zagadnienia związane z formułowaniem 14 poniższych głównych zależności. Szczególną uwagę poświęcono równaniom określającym wartości pochodnych termodynamicznych (11) ÷ (14):

$$T = f(p, i) , \quad (1)$$

$$v = f(p, i) , \quad (2)$$

$$s = f(p, i) , \quad (3)$$

$$i = f(p, s) , \quad (4)$$

$$i = f(p, T) , \quad (5)$$

$$y = f(p, i) , \quad (6)$$

$$i = f(p, y) , \quad (7)$$

$$v' = f(p) , \quad (8)$$

$$i' = f(p) , \quad (9)$$

$$i'' = f(p) , \quad (10)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_i = f(p, i) , \quad (11)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial i}\right)_p = f(p, i) , \quad (12)$$

$$\frac{\partial v'}{\partial p} = f(p) , \quad (13)$$

$$\frac{\partial i'}{\partial p} = f(p) , \quad (14)$$

Przyjęto następujące oznaczenia:

$p$  - ciśnienie,

$i$  - entalpia,

$T$  - temperatura,

$s$  - entropia,

$v$  - objętość właściwa,

$y$  - stopień suchości,

$i''$  - entalpia pary na linii nasycenia,

$i', v'$  - odpowiednio entalpia i objętość właściwa wody na linii nasycenia.

Rozpatrzono możliwości rozwiązania przedstawionego zadania przy wykorzystaniu modelu pary idealnej w sensie Eichelberga [2] [3], tablic parowych [4] [5], oraz analitycz-

nych zależności opisujących własności rzeczywistej pary wodnej i wody [6], [7], [8].

## 2. ZALEŻNOŚCI DLA PARY WODNEJ IDEALNEJ

W przypadku pary wodnej przegrzanej, o parametrach oddalonych od stanu nasycenia, dobrą zgodność z wynikami doświadczeń daje model pary idealnej w sensie Eichelberga. Może on być zatem wykorzystany głównie w przypadku rozpatrywania turbin przeciwprężnych.

Podstawową zależnością tego modelu jest równanie określające entalpię pary wodnej [2]

$$i = i_c + \frac{k}{k-1} p v, \quad (15)$$

gdzie  $i_c$  jest stałą dobraną do rozpatrywanego zakresu parametrów wraz z wykładnikiem izentropy  $k$ . Równanie to może być wykorzystane jako zależność (2).

Zależności (3) i (4) są w przypadku modelowania matematycznego turbin wykorzystywane do obliczania izentropowego spadku entalpii. Posługując się modelem pary idealnej można je zastąpić zależnością [2]

$$H = \frac{k}{k-1} p_\alpha v_\alpha \left[ 1 - \left( \frac{p_\omega}{p_\alpha} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (16)$$

gdzie:

$H$  jest spadkiem izentropowym,

indeks " $\alpha$ " odpowiada parametrom na początku procesu rozprężenia,

indeks " $\omega$ " parametrom na końcu tego procesu.

W modelu pary idealnej nie występuje temperatura, stąd nie można określić zależności (1) i (5), a tym samym rozpatrywać zagadnień, w których uwzględniane są procesy wymiany ciepła.

Model pary idealnej nie obejmuje także obszaru pary wilgotnej i wody, toteż nie mogą być w tym przypadku określone zależności (6), (7), (8), (9), (10), (13) i (14).

Wartość pozostałych dwóch pochodnych termodynamicznych (11) i (12) określić można przez bezpośrednie różniczkowanie odpowiednio przekształconej zależności (15), w wyniku czego otrzymuje się:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_i = \frac{(i - i_c)(k - 1)}{k} \frac{1}{p^2}, \quad (17)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial i}\right)_p = \frac{k-1}{k} \frac{1}{p}. \quad (18)$$

Zależności modelu pary idealnej, dzięki swej bardzo prostej budowie, są niezwykle wygodne dla celów modelowania matematycznego turbin. Jednak, wobec braku możliwości wyznaczenia temperatury pary wodnej i wyłączenia z rozważań obszaru pary wilgotnej, możliwość wykorzystania przedstawionych równań jest bardzo ograniczona.

### 3. ZALEŻNOŚCI WYKORZYSTUJĄCE TABLICE PAROWE LUB ANALITYCZNE ZWIĄZKI MIĘDZY PARAMETRAMI

Model matematyczny rzeczywistej pary wodnej zawierający wymagane zależności (1) ÷ (10) oprzeć można na wykorzystaniu tablic parowych [4] lub analitycznych zależności opisujących termodynamiczne własności pary wodnej.

Wykorzystanie tablic parowych [4], pozwalających prawie bezpośrednio obliczać zależności (1) ÷ (10), wymaga wprowadzenia tych tablic do pamięci maszyny cyfrowej i opracowania odpowiedniego algorytmu interpolacyjnego. Sposób ten jest zatem bardzo pracochłonny i niewygodny, a przy potrzebnym zakresie zmian parametrów niezwykle obciąża pamięć maszyny, toteż w zagadnieniach modelowania matematycznego turbin jest on praktycznie niemożliwy do wykorzystania.

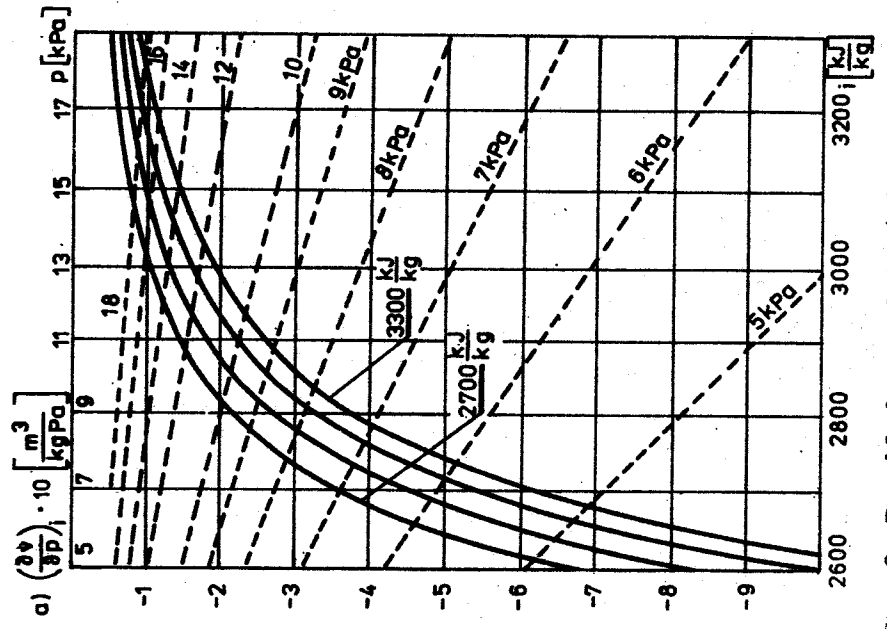
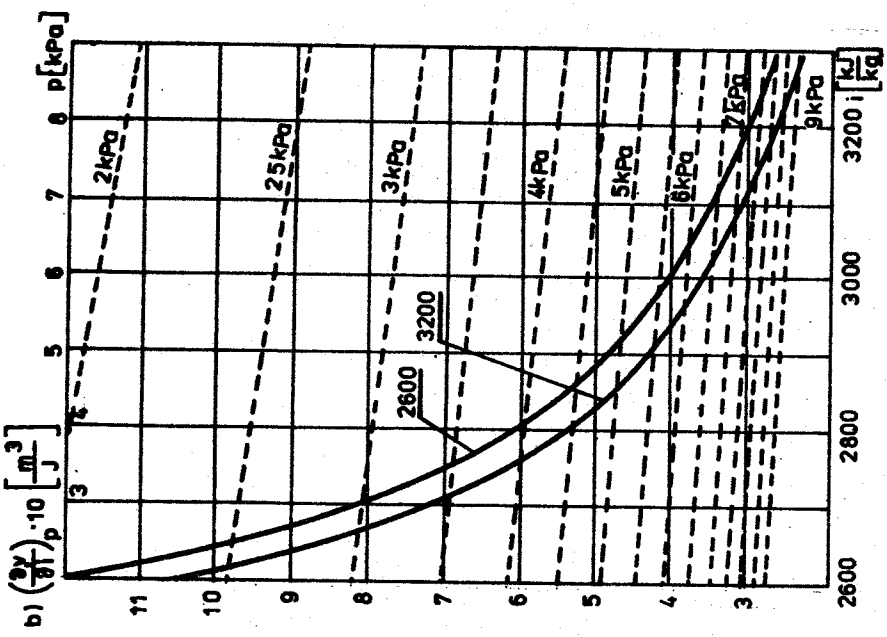
W rozważanym przypadku do opisu poszukiwanych zależności (1) ÷ (10) wygodniej jest wykorzystać opracowane przez wielu autorów zależności analityczne pomiędzy parametrami. Zależności takie można spotkać w literaturze w formie gotowych procedur obliczeniowych, np. krajowe prace [7]; [8] oraz wykorzystywane w Instytucie Techniki Ciepłej PW podprogramy PARAM [6].

Dużo większą trudność sprawia określenie zależności (11) - (14) do obliczania pochodnych termodynamicznych pary wodnej i wody. Opublikowane tablice pochodnych termodynamicznych [5] obejmują tylko zakres pary przegrzanej przy ciśnieniach  $p \geq 0,1$  MPa. Praktyczna możliwość wykorzystania tych tablic ograniczona jest jednak do  $p \geq 4$  MPa, gdyż dopiero przy takich ciśnieniach wartości pochodnych, liczone metodą interpolacji liniowej w obszarach pomiędzy punktami podanymi w tablicach, obarczone są błędem mniejszym, niż dopuszczalny dla rozpatrywanych zastosowań (kilka procent) [1]. Wymienione tablice pokrywają zatem tylko niewielki obszar parametrów pary wodnej występującej w turbinach parowych (rys.1), toteż praktycznie nie ma możliwości ich wykorzystania w zagadnieniach modelowania matematycznego dynamiki turbin.

Brak w literaturze informacji odnośnie postaci zależności (11) ÷ (14) spowodował konieczność wyznaczenia wartości pochodnych termodynamicznych w wymaganym zakresie zmian parametrów, a następnie opracowania odpowiednich procedur obliczeniowych pozwalających na wykonywanie obliczeń przy wykorzystaniu elektronicznej maszyny cyfrowej (emc), w trakcie rozwiązywania modelu matematycznego turbiny.

Wartości pochodnych termodynamicznych wyznaczyć można poprzez różniczkowanie tablic parowych albo funkcji analitycznych opisujących związki między parametrami termodynamicznymi. Ponieważ, jak to wcześniej wskazano, do opisu związku między parametrami wygodniej jest wykorzystywać zależności analityczne, te same zależności wykorzystano do wyznaczenia wartości pochodnych.

Część uzyskanych wyników obliczeń przedstawiono na rys.



Kys.2. Przykładowe zależności pochodnych termodynamicznych od ciśnienia (linie ciągłe) i entalpii (linie przerywane) dla obszaru pary przegrzanej a)  $\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_i = f(p,i)$ , b)  $\left(\frac{\partial v}{\partial i}\right)_p = f(p,i)$

Na rys.2 przedstawiono przykładowe zależności  $\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_i = f(p,i)$  oraz  $\left(\frac{\partial v}{\partial i}\right)_p = f(p,i)$  dla pary wodnej przegrzanej.

Charakterystyczną cechą tych zależności jest praktycznie liniowy związek między wartością pochodnej a entalpią w znacznym zakresie zmian entalpii. Właściwość tę potwierdza także analiza zależności (17) i (18), słusznych jak to wskazano dla znacznego obszaru pary przegrzanej. Wyrażenie  $\frac{(i-i_c)(k-1)}{k}$  zależy bowiem praktycznie liniowo od entalpii, wobec niewielkich zmian  $i_c = f(p,i)$  oraz  $k = f(p,i)$  w znacznych obszarach zmian parametrów. Wyrażenie  $\frac{k-1}{k}$  zależy od entalpii jeszcze w mniejszym stopniu, toteż można zastosować tu przybliżenie liniowe.

Rys.3 przedstawia podobne przykładowe zależności dla obszaru pary wilgotnej. Pochodna  $\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_i$  zależy tutaj także liniowo od entalpii, gdyż można wykazać, że dla obszaru pary wilgotnej pochodna ta jest równa

$$\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_i = \frac{\partial v'}{\partial p} + \frac{(i-i'') \frac{\partial i'}{\partial p} - (i-i') \frac{\partial i''}{\partial p}}{(i''-i')^2} (v''-v') + \frac{i-i'}{i''-i'} \left(\frac{\partial v''}{\partial p} - \frac{\partial v'}{\partial p}\right) \quad (19)$$

Pochodna  $\left(\frac{\partial v}{\partial i}\right)_p$  dla obszaru pary wilgotnej nie zależy od entalpii, gdyż

$$\left(\frac{\partial v}{\partial i}\right)_p = \frac{v''-v'}{i''-i'} = f(p) \quad (20)$$

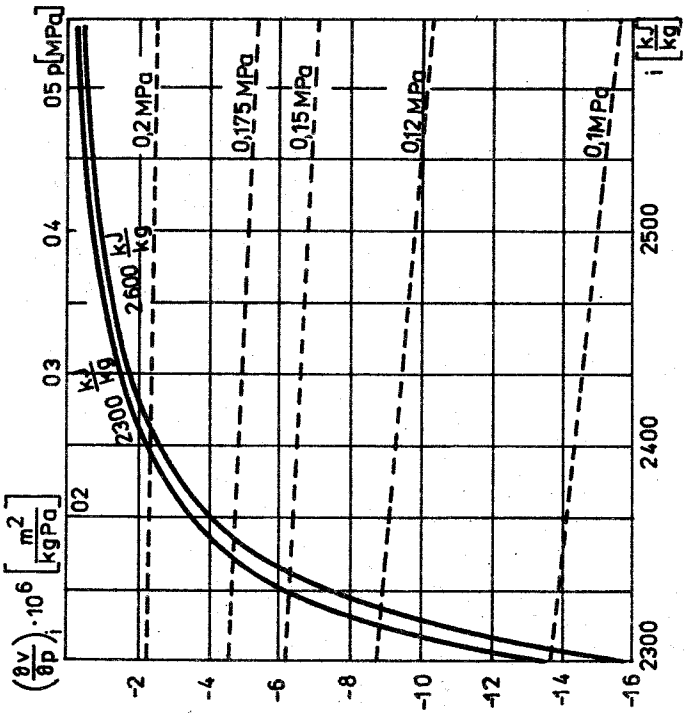
Przykładowe zależności  $\frac{\partial v'}{\partial p} = f(p)$  oraz  $\frac{\partial i'}{\partial p} = f(p)$  przedstawiono na rys.4.

Porównanie wartości pochodnych wyznaczonych przedstawioną metodą z wartościami podanymi w tablicach [5] wykazało, że błędy obliczeń nie przekraczają 1% a tylko w pobliżu linii nasycenia wzrastają do kilku procent.

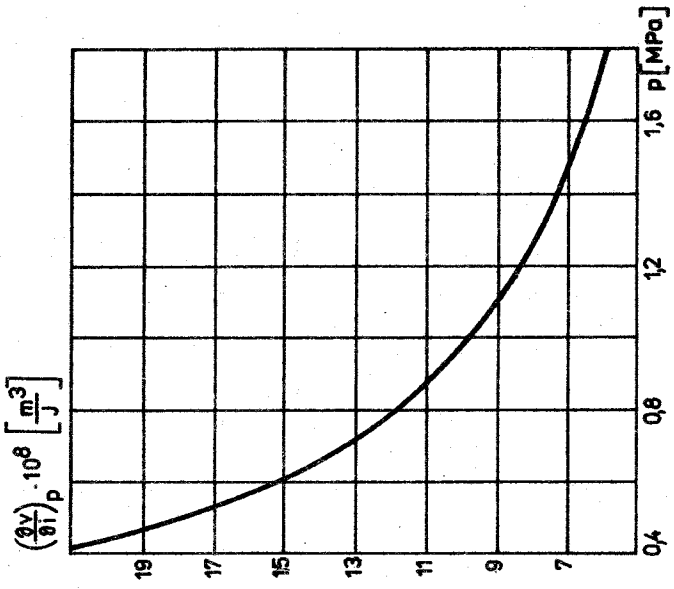
Porównanie takie można było oczywiście przeprowadzić tylko dla obszaru objętego tablicami.



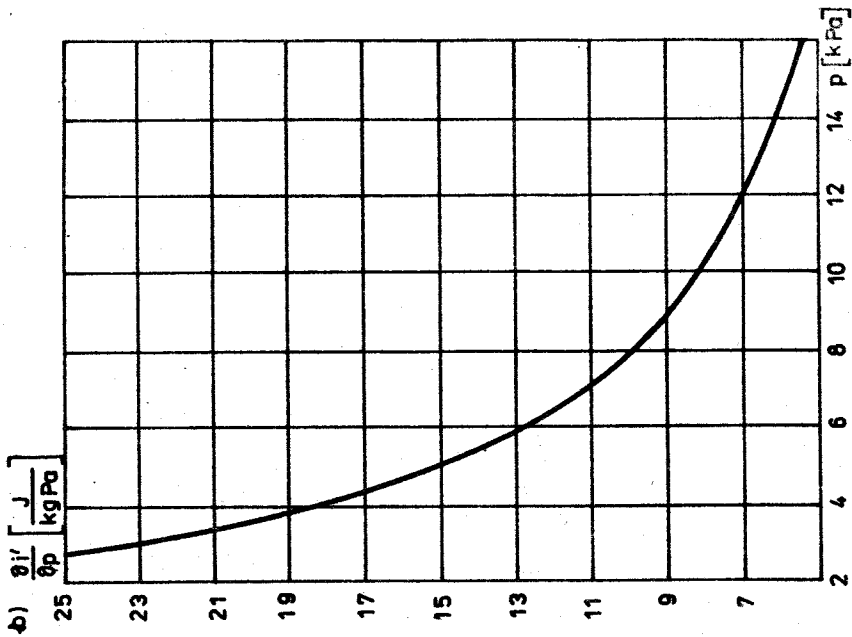
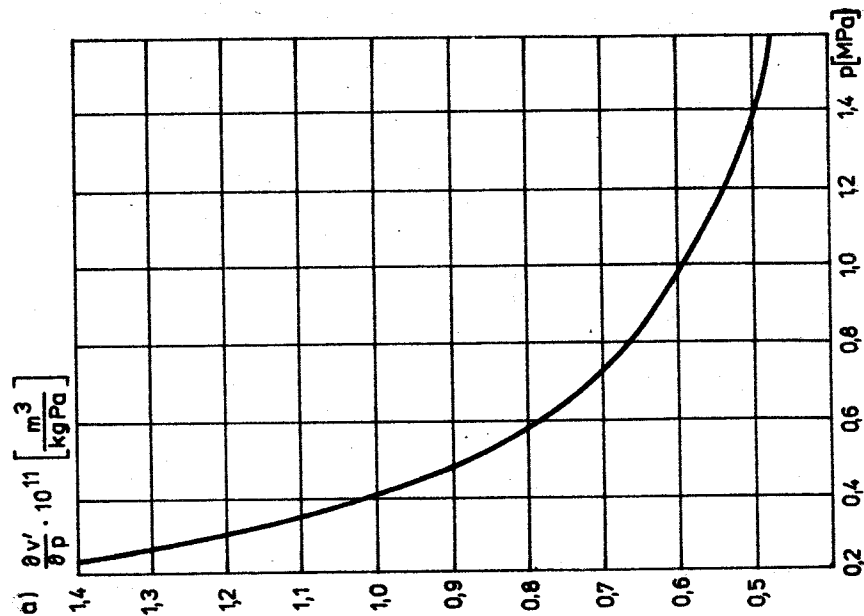
a)



b)



Rys. 3. Przykładowe zależności pochodnych termodynamicznych od ciśnienia (linie ciągłe) i entalpii (linie przerywane) dla obszaru pary wilgotnej; a)  $(\frac{\partial v}{\partial p})_i = f(p, i)$ , b)  $(\frac{\partial v}{\partial p})_p = f(p)$



Rys. 4. Przykładowe zależności pochodnych termodynamicznych od ciśnienia dla wrzącej wody:  
 a)  $\frac{\partial v'}{\partial p} = f(p)$ , b)  $\left( \frac{\partial i'}{\partial p} \right) = f(p)$

#### 4. BUDOWA PROCEDUR OBLICZENIOWYCH DO WYZNACZANIA POCHODNYCH W TRAKCIE OBLICZEŃ MODELU TURBINY

Wyznaczanie wartości pochodnych przez różniczkowanie zależności między parametrami w trakcie rozwiązywania modelu całej turbiny bardzo wydłuża czas obliczeń. Aby tego uniknąć w oparciu o wyznaczone wcześniej wartości pochodnych, opracowano odpowiednie procedury obliczeniowe wykorzystujące bezpośrednio związki między wartością pochodnej a ciśnieniem i entalpią. Przygotowano dwa warianty procedur.

W wariantcie pierwszym wartości pochodnych zestawiono w tablicach. Dla zależności (11) i (12) w obszarze pary przegrzanej są to dwuwymiarowe tablice  $TA(5,m)$  gdzie w pięciu kolumnach zestawiono ciśnienia i odpowiadające im wartości pochodnych w poniższy sposób:

$$TA(1,m) = p,$$

$$TA(2,m) = \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_i \quad \text{dla wartości entalpii } i_1,$$

$$TA(3,m) = \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_i \quad \text{dla wartości entalpii } i_2,$$

$$TA(4,m) = \left(\frac{\partial v}{\partial i}\right)_p \quad \text{dla wartości entalpii } i_1,$$

$$TA(5,m) = \left(\frac{\partial v}{\partial i}\right)_p \quad \text{dla wartości entalpii } i_2.$$

Tablice zawierają "m" takich zestawów. Wykorzystano tu liniową zależność pochodnej od entalpii w zakresie entalpii  $i_1$  do  $i_2$ .

Tablice uzupełniono odpowiednim algorytmem przeszukującym tablice  $TA$  oraz pozwalającym dla ciśnienia  $p$  mającego wartość w zakresie  $TA(1,k-1) \leq p < TA(1,k)$  oraz entalpii  $i$  znaleźć wartość pochodnych poprzez liniową interpolację między wartościami:  $TA(2,k-1)$ ,  $TA(2,k)$ ,  $TA(3,k-1)$ ,  $TA(3,k)$  dla pochodnej  $\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_i$  oraz  $TA(4,k-1)$ ,  $TA(4,k)$ ,  $TA(5,k-1)$ ,  $TA(5,k)$  dla pochodnej  $\left(\frac{\partial v}{\partial i}\right)_p$ .

W przypadku obszaru pary wilgotnej odpowiednie tablice TB (4,m) posiadają 4 kolumny, gdyż jak to wcześniej stwierdzono dla tego obszaru pochodna  $\left(\frac{\partial v}{\partial i}\right)_p$ , jest funkcją tylko ciśnienia.

Podobnie dla pochodnych  $\frac{\partial v'}{\partial p}$  oraz  $\frac{\partial i'}{\partial p}$  odpowiednie tablice TC(3,m) posiadają tylko trzy kolumny zawierające kolejno wartość  $p$ ,  $\frac{\partial v'}{\partial p}$  oraz  $\frac{\partial i'}{\partial p}$ .

W wariancie drugim opracowano analityczne zależności określające wartość pochodnych  $\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_i$  oraz  $\left(\frac{\partial v}{\partial i}\right)_p$  dla obszaru pary przegrzanej. Na podstawie zależności (17) i (18) poszukiwano funkcji o postaci:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_i = W(i,p) \frac{1}{p^2}, \quad (21)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial i}\right)_p = W(i,p) \frac{1}{p}, \quad (22)$$

gdzie:

$$W = \sum_{j=0}^n A_j p^j, \quad (23)$$

a współczynniki  $A_j$  wyrażają się wielomianami

$$A_j = \sum_{l=0}^m B_{jl} i^l. \quad (24)$$

Wartości współczynników wyznaczono według zasady najmniejszej sumy kwadratów, poszukując tak stopni wielomianów  $n$  oraz  $m$ , aby maksymalny względny błąd aproksymacji był mniejszy od zadanej wartości.

W wyniku obliczeń otrzymano następujące zależności: dla obszaru  $0,1 \leq p \leq 20$ ,  $3250 < i \leq 3600$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_i = & \left[ (4,11439 \cdot 10^{-7} - 2,20554 \cdot 10^{-10} \cdot i) \right. \\ & \left. + (-1,0199 \cdot 10^{-10} + 1,03041 \cdot 10^{-13} \cdot i) p \right] \frac{1}{p^2}, \end{aligned} \quad (25)$$

$$\delta = 0,0085,$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial v}{\partial i}\right)_p &= \left[ (3,42136 \cdot 10^{-7} - 3,5797 \cdot 10^{-11} \cdot i) + \right. \\ &+ (-5,39472 \cdot 10^{-10} + 3,41154 \cdot 10^{-13} \cdot i) p \\ &\left. + (-2,56017 \cdot 10^{-12} - 1,00925 \cdot 10^{-15} \cdot i) p^2 \right] \frac{1}{p}, \end{aligned} \quad (26)$$

$$\delta = 0,0058,$$

dla obszaru  $0,1 \leq p \leq 20$ ,  $3050 < i \leq 3250$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_i &= \left[ (4,1900 \cdot 10^{-7} - 2,2576 \cdot 10^{-10} \cdot i) + \right. \\ &+ (9,30572 \cdot 10^{-9} - 2,92242 \cdot 10^{-12} \cdot i) p \\ &\left. + (-5,61425 \cdot 10^{-10} + 1,82769 \cdot 10^{-13} \cdot i) p^2 \right] \frac{1}{p^2}, \end{aligned} \quad (27)$$

$$\delta = 0,0071,$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial v}{\partial i}\right)_p &= \left[ (3,0658 \cdot 10^{-7} - 2,4951 \cdot 10^{-11} \cdot i) + \right. \\ &+ (-1,84858 \cdot 10^{-8} + 5,99037 \cdot 10^{-12} \cdot i) p + \\ &\left. + (9,28047 \cdot 10^{-10} - 2,95712 \cdot 10^{-13} \cdot i) p^2 \right] \frac{1}{p}, \end{aligned} \quad (28)$$

$$\delta = 0,0093,$$

dla obszaru  $0,1 \leq p \leq 20$ ,  $2850 \leq i \leq 3050$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_i = \left[ (4,34601 \cdot 10^{-7} - 2,27448 \cdot 10^{-10} \cdot i) + \right.$$

$$+ 3,75336 \cdot 10^{-9} - 1,21294 \cdot 10^{-12} \cdot i) p \quad (29)$$

$$+ -3,01722 \cdot 10^{-10} + 1,04644 \cdot 10^{-13} \cdot i) p^2 \left] \frac{1}{p^2},$$

$$\delta = 0,016,$$

$$\left( \frac{\partial v}{\partial i} \right)_p = \left[ (1,5431 \cdot 10^{-7} + 2,65025 \cdot 10^{-11} \cdot i) + \quad (30)$$

$$+ (5,34376 \cdot 10^{-9} - 2,10762 \cdot 10^{-12} \cdot i) p +$$

$$+ (-1,00616 \cdot 10^{-9} + 3,52341 \cdot 10^{-13} \cdot i) p^2 \left] \frac{1}{p},$$

$$\delta = 0,036,$$

dla obszaru  $s \leq 9,5$ ,  $i \leq 3600$ ,  $p \leq 0,1$

$$\left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_i = (4,44751 \cdot 10^{-7} - 2,29998 \cdot 10^{-10} \cdot i) \frac{1}{p^2}, \quad (31)$$

$$\delta = 0,018,$$

$$\left( \frac{\partial v}{\partial i} \right)_p = (3,32662 \cdot 10^{-7} - 3,30962 \cdot 10^{-11} \cdot i - \quad (32)$$

$$- 4,03492 \cdot 10^{-10} \cdot p) \frac{1}{p},$$

$$\delta = 0,037,$$

gdzie  $\delta$  jest względnym błędem między wartością wyliczoną przy wykorzystaniu podanych funkcji i wartością z tablic [5].

W powyższych zależnościach przyjęto następujące jednostki:

$p$  [MPa],  $i$  [kJ/kg],  $s$  [kJ/kg deg],  $\left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_i$  [m<sup>3</sup>/kg Pa]

$\left( \frac{\partial v}{\partial i} \right)_p$  [m<sup>3</sup>/J].

## 5. UWAGI KOŃCOWE

Przedstawione zagadnienie opisu własności termodynamicznych pary wodnej rozpatrywano z punktu widzenia jego zastosowania przy modelowaniu matematycznym dynamiki turbin, stąd zajmowano się tylko takimi zależnościami, których znajomość jest konieczna dla sformułowania modelu turbiny. Wydaje się jednak, że opisana metodyka postępowania, szczególnie w zakresie pochodnych termodynamicznych, może znaleźć zastosowanie przy poszukiwaniu innych zależności.

Podany sposób opisu własności termodynamicznych pary wodnej był wielokrotnie wykorzystywany w obliczeniach modeli matematycznych dynamiki turbin na parę nasyconą, np. [10], [11].

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Lewandowski J.: Metoda wyznaczania charakterystyk dynamicznych turbin na parę nasyconą dla elektrowni jądrowych. Praca doktorska, Politechnika Warszawska 1978.
- [2] Traupel W.: Thermische Turbomachinen. Springer Verlag, Berlin, Bd I 1977.
- [3] Horlock J.H.: Axial Flow Turbines. Butterworths Londyn 1966.
- [4] Wukałowicz M.P. Tablicy termofizycznych właściwości wody i wodianowo para, Jzd. Standartow, Moskwa 1969.
- [5] Riwkin S.L., Aleksandrow A.A. Kremnenskaja F.A.: Termodynamicheskie proizwodnyje dla wody i wodianowo para, Energia, Moskwa 1977.
- [6] Bednarkiewicz M.: Obliczanie parametrów i funkcji termodynamicznych własności wody i pary wodnej przy użyciu elektronicznej maszyny cyfrowej. Biuletyn Informacyjny ITC PW 29/1971.
- [7] Kulig M.: Podprogramy dla obliczeń fizycznych i termodynamicznych własności wody i pary wodnej na maszynie cyfrowej. Raport IBJ Nr 1384/IX/R, Warszawa 1973.
- [8] Matla R.: Metody obliczeń izentropowych spadków entalpii przy zastosowaniu ETO. Gospodarka Paliwami i Energią 5/1971.

- [9] Demidowicz B.P. i inni.: Metody numeryczne. PWN, Warszawa 1965.
- [10] Lewandowski J.: Metoda wyznaczania charakterystyk dynamicznych turbin dla elektrowni jądrowych. Archiwum Energetyki 1/1980
- [11] Grunwald B., Lewandowski J., Miller A., Plewa J.: Model matematyczny turbiny na parę nasyconą do badania dynamiki turbozespołu elektrowni jądrowej. Biuletyn Informacyjny ITC PW (w druku).

## ВОПРОСЫ ОПИСАНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДЯНОГО ПАРА ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ДИНАМИКИ ТУРБИН

### К р а т к о е   с о д е р ж а н и е

В работе обсуждаются вопросы, связанные с описанием термодинамических свойств водяного пара с особым учетом методов вычисления термодинамических производных. Рассматриваются зависимости, знание которых необходимо при математическом моделировании динамики турбин. Приводятся методы вычисления термодинамических производных и основы построения вычислительных процедур, обеспечивающих возможность вычисления производных по ходу вычислений моделей турбины. Приводятся аналитические зависимости между выбранными термодинамическими производными, давлением и энтальпией перегретого водяного пара.

## PROBLEMS OF WATER VAPOUR OF THERMODYNAMIC PROPERTIES DESCRIPTION IN MATHEMATICAL MODELLING OF TURBINE DYNAMICS

### S u m m a r y

It has been presented some problems of thermodynamic properties of water vapour description, especially of method of thermodynamic derivatives calculation. Formulas needed for mathematical modelling of turbine dynamics have been shown. The method of thermodynamic derivatives determining and base of structure of procedures for derivatives computation, in the time of turbine model calculation, have been discussed. In-



dependencies between some thermodynamic derivatives, pressure and enthalpy for superheated steam in analytical form have been presented.

Rękopis dostarczono w październiku 1980 r.