

Mgr inż. Marek Bednarkiewicz
Instytut Techniki Ciepłej

**OBLICZANIE PARAMETRÓW I FUNKCJI TERMODYNOMICZNYCH
PARY WODNEJ I WODY
PRZY UŻYCIU ELEKTRONOWEJ MASZYNY CYFROWEJ**

1. Wstęp

Zastosowanie maszyn cyfrowych do obliczeń obiegów cieplnych siłowni parowych wymaga określenia związków między termodynamicznymi parametrami wody i pary wodnej w postaci przydatnej do obliczeń na maszynie cyfrowej. W tych obliczeniach, w których parametry pary i wody zmieniają się w niewielkim zakresie, można wprowadzić do pamięci maszyny potrzebną część tablic parowych. Obliczanie parametrów sprowadza się wtedy do interpolacji między wartościami podanymi w tablicach. Metoda ta znalazła zastosowanie głównie w obliczeniach elementów obiegu cieplnego, gdzie liczba potrzebnych zależności między parametrami pary i wody, jak również zakres zmienności tych parametrów jest stosunkowo nieduży.

W przypadku gdy oblicza się parametry obiegu siłowni w zmiennych warunkach pracy, zastosowanie tablic termodynamicznych okazało się niemożliwe ze względu na zbyt duże obciążenie pamięci maszyny.

Niniejszy artykuł jest opisem opracowanej w Instytucie Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej procedury obliczającej parametry i funkcje termodynamiczne pary i wody. Procedura została opracowana dla potrzeb modelowania matematycznego siłowni pracującej w zmiennych warunkach.

2. Przegląd publikacji

W ostatnich latach pojawiła się duża ilość prac poświęconych obliczaniu parametrów wody i pary wodnej przy pomocy zależności analitycznych.

Międzynarodowy Komitet (I.F.C.) utworzony w celu koordynacji prac nad równaniami stanu pary wodnej opublikował w 1963 r. "Tablice Szkieletowe" parametrów pary i wody [36] oraz polecił zespołowi uczonych angielskich, niemieckich i japońskich opracowanie wzorów, na podstawie których można byłoby obliczać wartości parametrów i funkcji termodynamicznych pary i wody, zgodne z wartościami podanymi w tablicach w granicach przewidzianej tolerancji. Wyniki prac tego zespołu opublikowano w 1966 roku [1], [56].

Opracowany system wzorów w formie zależności od ciśnienia i temperatury obejmuje obszar ograniczony temperaturami $0,01 \div 800$ °C oraz ciśnieniami $0 \div 1000$ bar. Główną wadą tych zależności jest ich skomplikowana budowa, co pociąga za sobą stosunkowo długi czas liczenia (Odra 1204 oblicza jeden parametr w czasie około 2 sekund). Dokładność obliczeń jest wystarczająca dla entalpii, entropii i objętości właściwej, natomiast błąd obliczenia ciepła właściwego dochodzi nawet do 6,5%.

Ponieważ omówione wzory I.F.C. w praktycznych obliczeniach technicznych okazały się mało przydatne, prace nad udoskonaleniem tych wzorów kontynuowano nadal. W najnowszych opracowaniach można wyodrębnić dwa kierunki: pierwszy polegający na dążeniu do zmniejszenia czasu pracy maszyny przy jednoczesnym ograniczeniu obciążenia jej pamięci i drugi polegający na poszukiwaniu zależności obliczających parametry pary dla innych danych niż temperatura i ciśnienie.

Autor opracowania [8] zaproponował zbiór wzorów do obliczeń parametrów pary i wody obejmujący cały, praktycznie ważny, w technicznych obliczeniach obszar w zakresie temperatur $0 \div 650$ °C i ciśnień do 400 barów dla wody i 350 barów w obszarze pary przegrzanej. Parametry na linii nasycenia dane są w zależności od temperatury, parametry pary przegrzanej od

ciśnienia i entalpii, a parametry wody od ciśnienia i temperatury.

Kosztom zmniejszenia obszaru stosowalności wzorów, udało się autorowi uzyskać równania mające prostą postać wielomianów dwóch zmiennych i dające dokładne rezultaty. Podstawową wadą tych wzorów jest stosunkowo duża liczba stałych.

Obszar pary przegrzanej jest znacznie lepiej opisany wzorami opublikowanymi w pracy [52]. Równania mają postać wielomianów dwóch zmiennych: odwrotności temperatury i ciśnienia. Opisują one w zakresie tolerancji Międzynarodowych Tablic Szkieletowych z 1963 roku parametry pary na krzywej nasycenia do 310°C i parametry pary przegrzanej od krzywej nasycenia do 800°C i ciśnienia 400 bar. Jednakże przy ciśnieniach zbliżonych do 400 bar i na krzywej nasycenia powyżej 270°C błąd obliczonej wartości ciepła właściwego w stosunku do eksperymentalnych danych jest duży (do 12% przy $t_g = 310^{\circ}\text{C}$). Ogromną zaletą tych wzorów jest ich prosta budowa i niewielka liczba stałych.

Wzory do obliczeń parametrów pary przegrzanej dla danego ciśnienia i entropii opublikowano w pracy [14]. Równania te, ze względu na rodzaj parametrów danych (ciśnienie i entropia), są bardzo ważne zwłaszcza dla obliczeń turbin parowych. Poważnym mankamentem tych wzorów jest bardzo duża liczba stałych.

3. Zależności analityczne między parametrami pary wodnej i wody

Obliczanie obiegu cieplnego siłowni pracującej w zmiennych warunkach wymaga znajomości następujących związków analitycznych między parametrami pary wodnej i wody:

$$\begin{aligned} &\text{para przegrzana: } h = f(p,t), \quad s = f(p,t), \quad v = f(p,t), \\ c_p = f(p,t), \quad h = f(p,s), \quad t = f(p,h), \quad t = f(p,s), \\ &\text{para mokra: } v = f(p,h), \quad x = f(p,h), \quad s = f(p,h), \\ v = f(p,s), \quad x = f(p,s), \quad h = f(p,s), \quad v = f(p,x), \quad h = f(p,x), \\ s = f(p,x), \\ &\text{woda: } h = f(p,t), \quad v = f(p,t), \quad t = f(p,h). \end{aligned}$$

Przyjęto następujące oznaczenia:

p - ciśnienie, t - temperatura, h - entalpia, s - entropia, v - objętość właściwa, c_p - ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu, x - stopień suchości.

Na podstawie analizy opublikowanych w literaturze wzorów pod kątem dokładności i racjonalnego wykorzystania maszyny cyfrowej wybrano do obliczeń następujące zależności:

3.1. Obszar pary przegrzanej - zależności $h = f(p, t)$, $s = f(p, t)$, $v = f(p, t)$, $c_p = f(p, t)$ - autorzy wzorów N.P.Wu-kałowicz, A.A.Aleksandrow, M.S.Trachtengerc [52]

$$h_b = h_w + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=0}^5 (j+1) \frac{A_{ij}}{T_b^{j+1}} p_b^i ; \quad (1)$$

$$s_b = s_w + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=0}^5 j \frac{A_{ij}}{T_b^{j+1}} p_b^i ; \quad (2)$$

$$v_b = R_b \frac{T_b}{p_b} + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=0}^5 i \frac{A_{ij}}{T_b^j} p_b^{i-1} ; \quad (3)$$

$$c_b = c_w - \sum_{i=1}^4 \sum_{j=0}^5 j(j+1) \frac{A_{ij}}{T_b^{j+1}} p_b^i ; \quad (4)$$

gdzie:

$$v_b = \frac{v}{v_c}, \quad h_b = \frac{h}{p_c v_c}, \quad s_b = \frac{s T_c}{p_c v_c}, \quad c_b = \frac{c_p T_c}{p_c v_c},$$

$$R_b = \frac{R_c T_c}{p_c v_c}, \quad p_b = \frac{p}{p_c}, \quad T_b = \frac{T}{T_c};$$

v_c, p_c, T_c, R_c - parametry punktu krytycznego,

$$h_w = \frac{1}{70,1204} \left[1808,9 + 1,48285 T + 3,79025 \cdot 10^{-4} T^2 + \right. \\ \left. + 46,174 \ln(T) \right],$$

$$s_w = \frac{1}{0,1083275} \left[-1,552407 + 0,46151 \ln(p) + \right. \\ \left. + 1,48285 \ln(T) + 7,5805 \cdot 10^{-4} T + \frac{46,174}{T} \right],$$

$$c_w = \frac{1}{0,1083275} \left(1,48285 + 7,5805 \cdot 10^{-4} T + \frac{46,174}{T} \right),$$

A_{ij} - współczynniki równań: (1), (2), (3), (4).

Wartości liczbowe podano w pracy [52].

3.2. Obszar pary przegrzanej - zależność $t = f(p, h)$ - autor wzoru J. Juza [8]

$$t_z = \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^5 A_{ij} h_z^i p_z^j + \frac{\sum_{i=0}^4 B_i h_z^i}{\sum_{i=0}^3 C_i p_z^i}, \quad (5)$$

gdzie:

$$t_z = \frac{t}{t_0}, \quad p_z = \frac{p}{p_0}, \quad h_z = \frac{h}{h_0} - 3,375;$$

$$t_0 = 100^\circ\text{C}, \quad p_0 = 100 \text{ bar}, \quad h_0 = 1000 \text{ kJ/kg};$$

A_{ij} , B_i , C_i - współczynniki równania (5). Wartości liczbowe podano w pracy [8].

3.3. Obszar pary przegrzanej - zależności $h = f(p, s)$ - autor wzoru Meyer [14]

$$h_m = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^{11} A_{ij} p_m^j s_m^i; \quad (6)$$

gdzie:

$$h_m = \frac{h}{p_c v_c}, \quad p_m = \left[\frac{p}{p_c} \right]^{0,05} - 0,81725, \quad s_m = \frac{s T_c}{p_c v_c} - 70;$$

p_c, v_c, T_c - parametry punktu krytycznego.

A_{ij} - współczynniki równania (6). Wartości liczbowe podano w pracy [14].

3.4. Obszar pary mokrej

Parametry pary w obszarze pary mokrej oblicza się pośrednio przez określenie wartości, jakie przy danym ciśnieniu

przyjmuje szukany i dany parametr na krzywej parowania i krzywej nasycenia z następujących wzorów:

Dla danego ciśnienia i entalpii:

$$v = v' + \frac{h - h'}{h'' - h'} (v'' - v'); \quad (7)$$

$$s = s' + \frac{h - h'}{h'' - h'} (s'' - s'); \quad (8)$$

$$x = \frac{h - h'}{h'' - h'}. \quad (9)$$

Dla danego ciśnienia i stopnia suchości:

$$v = v' + x (v'' - v'); \quad (10)$$

$$h = h' + x (h'' - h'); \quad (11)$$

$$s = s' + x (s'' - s'). \quad (12)$$

Dla danego ciśnienia i entropii:

$$v = v' + \frac{s - s'}{s'' - s'} (v'' - v'); \quad (13)$$

$$h = h' + \frac{s - s'}{s'' - s'} (h'' - h'); \quad (14)$$

$$x = \frac{s - s'}{s'' - s'}. \quad (15)$$

Parametry pary na krzywej nasycenia i wody na krzywej parowania oblicza się według wzorów opracowanych przez J. Juzę [8] i H. Vespera [51]:

Zależność temperatury wrzenia od ciśnienia:

$$t = \sum_{i=0}^{11} A_i (\ln p)^i. \quad (16)$$

Parametry wody na krzywej parowania w zależności od temperatury wrzenia:

$$v' = v_0 \sum_{i=0}^9 B_i t_z^i; \quad (17)$$

$$h' = h_0 \sum_{i=0}^9 C_i t_z^i ; \quad (18)$$

$$s' = s_0 \sum_{i=0}^9 D_i t_z^i . \quad (19)$$

Parametry pary na krzywej nasycenia w zależności od temperatury wrzenia:

$$v'' = \frac{p_0 v_0}{p} \sum_{i=0}^8 E_i t_z^i ; \quad (20)$$

$$h'' = h_0 \sum_{i=0}^7 F_i t_z^i ; \quad (21)$$

$$s'' = s_0 \sum_{i=0}^9 G_i t_z^i , \quad (22)$$

gdzie:

$$t_z = \frac{t}{t_0} ,$$

$$t_0 = 100^\circ\text{C}, \quad p_0 = 100 \text{ bar}, \quad h_0 = 1000 \text{ kJ/kg},$$

$$v_0 = 1 \text{ m}^3/\text{kg}, \quad s_0 = 1 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}.$$

$A_i, B_i, C_i, D_i, E_i, F_i, G_i$ - współczynniki równań (16), (17), (18), (19), (20), (21), (22) odpowiednio. Wartości liczbowe podano w pracy [8].

3.5. Obszar wody pod ciśnieniem - zależność $v = f(p, t)$,
 $h = f(p, t)$ - autor wzorów J. Juza [8]

$$v_z = B_0 + B_1 p_z + B_2 \left(\frac{1}{p_z + 2} + 0,227 + 0,018 p_z \right); \quad (23)$$

$$h_z = B_3 + B_4 + B_5 \left(\frac{1}{p_z + 2} - 0,24927 + 0,021 p_z \right); \quad (24)$$

gdzie:

$$B_n = \sum_{i=0}^{16} B_{ni} t_z^i ; \quad (25)$$

$$v_z = \frac{v}{v_0}, \quad h_z = \frac{h}{h_0}, \quad p_z = \frac{p}{p_0}, \quad t_z = \frac{t}{t_0};$$

B_{ni} - współczynniki równania (25)

t_0, p_0, v_0, h_0 - parametry odniesienia jak w p.3.4.

3.6. Obszar wody pod ciśnieniem - zależność $t = f(p, h)$

Ponieważ nie znaleziono w literaturze wzoru obliczającego temperaturę wody dla danego ciśnienia i entalpii, oblicza się ją z równania (24) metodą kolejnych przybliżeń. Pierwsze przybliżenie temperatury oblicza się z równania podanego w pracy J.Juzy [8]

$$t_z = 2,68 h_z - 0,29 h_z^2, \quad (26)$$

gdzie: t_z, h_z - bezwymiarowe parametry jak w p. 3.5.

4. Procedura obliczająca zależności między parametrami pary wodnej i wody

Złożona postać równań przedstawionych w rozdziale 3, jak również bardzo częste obliczanie parametrów pary i wody w programach obliczających obiegi cieplne siłowni powodują, że jest praktycznie niemożliwe pisanie tych wzorów bezpośrednio w każdym miejscu programu, w którym one są wymagane. Jedyne do przyjęcia rozwiązanie jest opracowanie procedury, która obliczałaby przedstawione w rozdz.2 zależności po przywołaniu jej w odpowiednim miejscu programu. Procedura ta powinna spełniać następujące warunki:

a) obliczać wszystkie zależności podane w rozdz.2, w obszarze dla pary mokrej ograniczonym izotermą $t = 330^{\circ}\text{C}$, dla wody izobarą $p = 400 \text{ ata}$, a dla pary przegrzanej izotermą $t = 800^{\circ}\text{C}$ i izobarą $p = 400 \text{ ata}$,

b) błąd obliczeń jest w granicach tolerancji określonej w Międzynarodowych Tablicach (I.F.C.),

c) w przypadku, gdy poszukiwana jest identyczna zależność w obszarze pary przegrzanej i mokrej procedura sama wybiera wzór do obliczeń, określając na podstawie danych parametrów w jakim obszarze pary znajduje się parametr poszukiwany.

d) dane dla procedury i wyniki obliczeń są określone w technicznym układzie jednostek: ciśnienie - [at], temperatura

- [°C], entalpia - [kcal/kg], entropia - [kcal/kg°C], objętość właściwa - [m³/kg], ciepło właściwe - [kcal/kg °C].

Punkt d) założeń wstępnych jest oczywiście zależny od tego, w jakim układzie jednostek oblicza program, w którym procedura ma być zastosowana.

5. Opis procedury

Na podstawie podanych w rozdz.3 wzorów opracowano procedurę funkcyjną o nazwie PARAM napisaną w języku GIER Algol III, która oblicza parametry pary wodnej i wody, zgodnie z przedstawionymi w rozdz.4 założeniami. Punkt d) założeń wstępnych odnosi się wyłącznie do zależności $i = f(p,s)$, którą procedura oblicza dla pary mokrej i przegrzanej. Wybór odpowiedniego wzoru do obliczeń następuje przez sprawdzenie, czy dana wartość entropii jest większa czy mniejsza od entropii suchej pary nasyconej dla danego ciśnienia. Oczywiście w pierwszym przypadku obliczenia będą przeprowadzone ze wzoru dla pary przegrzanej a w drugim dla pary mokrej.

Opisywana procedura o nazwie PARAM (k,y,z) posiada trzy parametry formalne:

y - przywoływany przez nazwę oznacza ciśnienie;

z - przywoływany przez nazwę oznacza w zależności od wartości parametru k, temperaturę, entalpię, entropię lub stopień suchości;

k - przywoływany przez wartość oznacza którą zależność między parametrami pary wodnej lub wody procedura ma obliczyć.

Przywoływanie procedury następuje przez nazwę po podstawieniu na parametry formalne "y" i "z" parametrów aktualnych oraz wstawienie określonej liczby w miejsce parametru "k".

Poniżej zestawiono wszystkie zastosowane w treści procedury wartości parametru "k" z podaniem zależności, która będzie obliczona oraz przykładowej instrukcji przywołania.

Wartość "k"	Zależność	Obszar	Przykład instrukcji
1	$h = f(p, t)$	p. przegrzana	$h := \text{PARAM}(1, p, t)$
2	$v = f(p, t)$	p. przegrzana	$v := \text{PARAM}(2, p, t)$
3	$s = f(p, t)$	p. przegrzana	$s := \text{PARAM}(3, p, t)$
4	$c_p = f(p, t)$	p. przegrzana	$cp := \text{PARAM}(4, p, t)$
5	$t = f(p, h)$	p. przegrzana	$t := \text{PARAM}(5, p, h)$
6	$h = f(p, s)$	p. przegrzana lub p. mokra	$h := \text{PARAM}(6, p, s)$
7	$v = f(p, t)$	woda	$v := \text{PARAM}(7, p, t)$
8	$h = f(p, t)$	woda	$h := \text{PARAM}(8, p, t)$
9	$t = f(p, h)$	woda	$t := \text{PARAM}(9, p, h)$
10	$v = f(p, h)$	p. mokra	$v := \text{PARAM}(10, p, h)$
11	$x = f(p, h)$	p. mokra	$x := \text{PARAM}(11, p, h)$
12	$s = f(p, h)$	p. mokra	$s := \text{PARAM}(12, p, h)$
13	$v = f(p, x)$	p. mokra	$v := \text{PARAM}(13, p, x)$
14	$h = f(p, x)$	p. mokra	$h := \text{PARAM}(14, p, x)$
15	$s = f(p, x)$	p. mokra	$s := \text{PARAM}(15, p, x)$
16	$v = f(p, s)$	p. mokra	$v := \text{PARAM}(16, p, s)$
17	$x = f(p, s)$	p. mokra	$x := \text{PARAM}(17, p, s)$
18	$t = f(p)$	p. mokra	$t := \text{PARAM}(18, p, p)$
19	$h'' = f(p)$	krzywa nasycenia	$hp := \text{PARAM}(19, p, p)$
20	$h' = f(p)$	krzywa parowania	$hw := \text{PARAM}(20, p, p)$

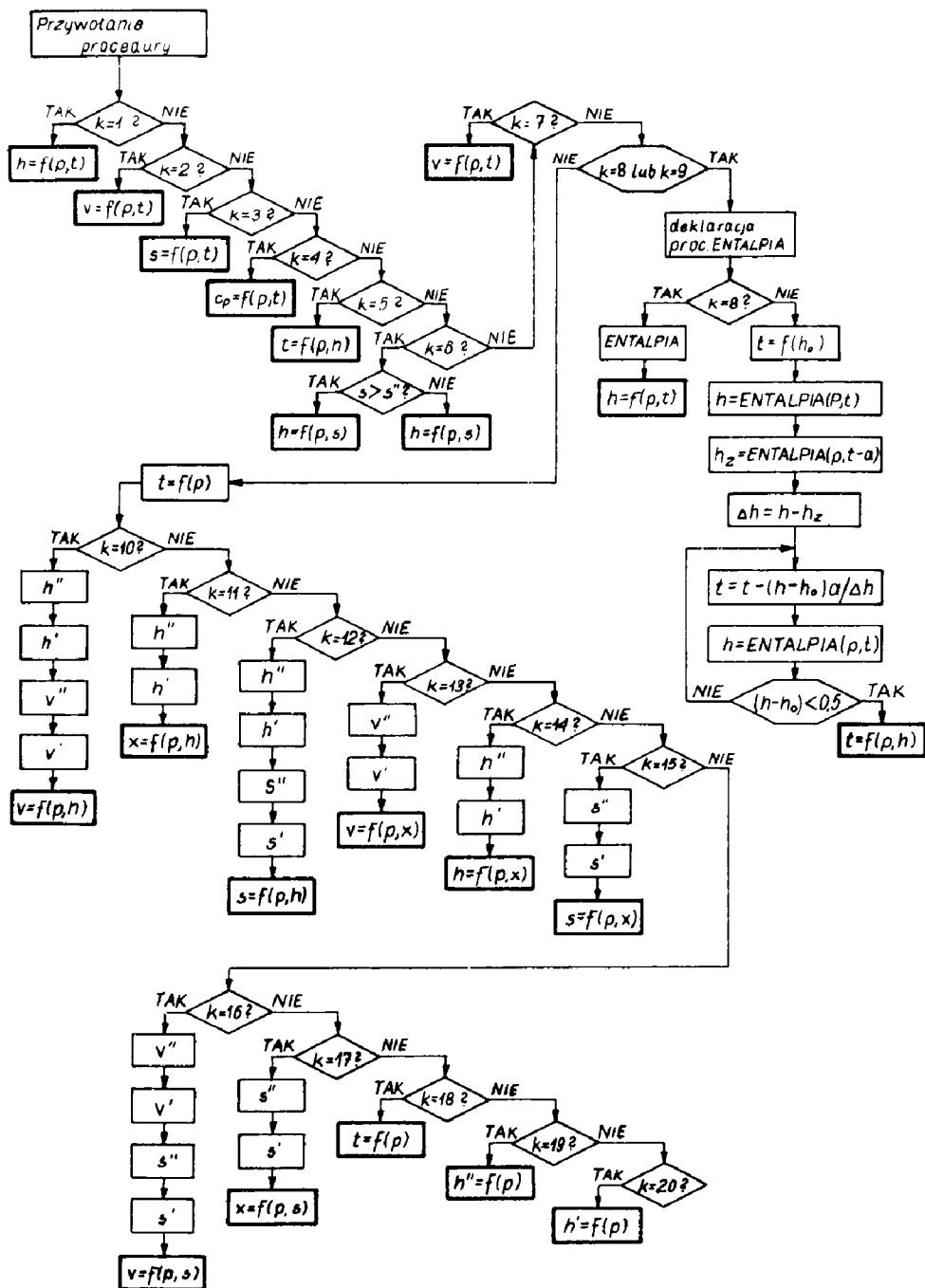
Zastosowane w przykładowych instrukcjach oznaczenia: ciśnienia (p), temperatury (t), entalpii (h), entropii (s), stopnia suchości (x), objętości właściwej (v) i ciepła właściwego (cp) mogą być oczywiście zastąpione przez dowolne inne oznaczenia. W szczególności w miejsce parametru formalnego "z" może być podstawiona nazwa procedury PARAM. Takie podstawienie pozwala zwiększyć ilość obliczanych zależności w obszarze pary przegrzanej o następujące pozycje:

```

v = f(p, h)    v := PARAM(2, p, PARAM(5, p, h));
s = f(p, h)    s := PARAM(3, p, PARAM(5, p, h));
cp = f(p, h)   cp := PARAM(4, p, PARAM(5, p, h));
t = f(p, s)    t := PARAM(5, p, PARAM(6, p, s));
v = f(p, s)    v := PARAM(2, p, PARAM(5, p, PARAM(6, p, s)));
cp = f(p, s)   cp := PARAM(4, p, PARAM(5, p, PARAM(6, p, s)));

```

Zasada działania procedury jest wyjaśniona w szczegółowo opisanym schemacie blokowym przedstawionym na rys.1.



Rys.1. Schemat blokowy procedury PARAM (k,y,z)

Przykładowe wyniki obliczeń sprawdzających

Para przegrzana

Dane		c_p (kcal/kg $^{\circ}$ C)		h (kcal/kg)	
p[at]	t($^{\circ}$ C)	z maszyny	z tablic	z maszyny	z tablic
0,05	100	0,452915	0,453	641,986	642,1
10	400	0,507530	0,507	779,532	779,5
100	500	0,606128	0,616	806,179	806,1

Dane		v (m 3 /kg)		s (kcal/kg $^{\circ}$ C)	
p[at]	t($^{\circ}$ C)	z maszyny	z tablic	z maszyny	z tablic
0,05	100	35,097241	35,08	2,09670	2,0953
10	400	0,312607	0,3126	1,78526	1,7843
100	500	0,033461	0,03352	1,57839	1,5781

Linia nasycenia

Dane	h'' (kcal/kg)h		h' (kcal/kg)		t($^{\circ}$ C)	
	z maszyny	z tab.	z maszyny	z tab.	z maszyny	z tab.
0,05	611,590	611,5	32,570	32,57	32,558	32,55
10	663,120	663,3	181,238	181,3	179,038	179,04
100	651,709	651,7	334,495	334,2	309,540	309,53

Woda

Dane		h (kcal/kg)		v (m 3 /kg)	
p(at)	t($^{\circ}$ C)	z maszyny	z tablic	z maszyny	z tablic
0,05	20	20,024	20,0	0,0010020	0,0010018
10	10	10,247	10,3	0,0010001	0,0009999
100	200	204,367	204,43	0,0011481	0,0011488

6. Obliczenia sprawdzające

Dwoma sposobami sprawdzono dokładność obliczeń wykonanych przy użyciu procedury PARAM. Pierwszy polegał na porównaniu wyników obliczeń z danymi tablicowymi (przykłady podano w tablicy 1). Drugi sposób jest sprawdzeniem pośrednim i polega na zastosowaniu w programie instrukcji, która powoduje obliczenie wartości parametru występującego w danych. Na przykład kolejne obliczenie następujących zależności: $h = f(p,t)$ i $t_1 = f(p,h)$ spowoduje obliczenie temperatury t_1 , której wartość powinna być identyczna z wartością danej temperatury t .

Wykonano następujące obliczenia:

1. Dane p , t obliczono kolejno $h = f(p,t)$, $t_1 = f(p,h)$.

Instrukcja w programie $t := \text{PARAM}(5,p,\text{PARAM}(1,p,t));$

Przykładowe wyniki obliczeń:

			błąd względny
$p = 0,05$	$t = 300$	$t_1 = 299,9518$	0,018%
$p = 1,2$	$t = 190,5$	$t_1 = 190,9448$	0,233%
$p = 12$	$t = 400$	$t_1 = 399,5762$	0,105%
$p = 20$	$t = 211,38$	$t_1 = 210,9912$	0,184%
$p = 50$	$t = 600$	$t_1 = 599,7625$	0,0396%

2. Dane p , s obliczono kolejno $h = f(p,s)$, $t = f(p,h)$,

$s_1 = f(p,t)$. Instrukcja w programie

$s := \text{PARAM}(3,p,\text{PARAM}(5,p,\text{PARAM}(6,p,s)));$

Przykładowe wyniki obliczeń:

			błąd względny
$p = 0,05$	$s = 2,1880$	$s_1 = 2,188057$	0,0026%
$p = 1,2$	$s = 1,8000$	$s_1 = 1,800719$	0,0398%
$p = 12$	$s = 1,8000$	$s_1 = 1,799811$	0,0105%
$p = 20$	$s = 1,5161$	$s_1 = 1,515695$	0,0268%
$p = 50$	$s = 1,5412$	$s_1 = 1,541506$	0,0202%

3. Dane p , h obliczono kolejno $t = f(p,h)$, $h_1 = f(p,t)$.

Instrukcja w programie $h := \text{PARAM}(1,p,\text{PARAM}(5,p,h));$

Przykładowe wyniki obliczeń:

			błąd względny
$p = 0,05$	$h = 664$	$h_1 = 664,122$	0,0184%
$p = 1,2$	$h = 700$	$h_1 = 700,114$	0,0163%
$p = 12$	$h = 700$	$h_1 = 700,346$	0,0495%
$p = 20$	$h = 668,5$	$h_1 = 668,237$	0,0394%
$p = 50$	$h = 792$	$h_1 = 791,710$	0,0366%

Obliczenia sprawdzające wykazały, że błąd wartości parametrów obliczonych przy użyciu procedury PARAM w stosunku do danych tabelarycznych nie przekracza 0,5% dla entalpii, entropii, temperatury i objętości właściwej. Jedynie dla ciepła właściwego błąd jest większy i maksymalna jego wartość wynosi ok. 1,6%. Wyniki obliczeń porównano z wartościami podanymi w tablicach M.P.Wukałowicza [48].

Obliczenia sprawdzające obejmowały również kontrolę czasu pracy maszyny cyfrowej. Stwierdzono, że średni czas pracy maszyny przy obliczaniu jednej zależności między parametrami pary lub wody wynosi ok. 0,5 sekund. Wynik uzyskano dzieląc czas wielokrotnego obliczenia wszystkich zależności zawartych w procedurze przez liczbę obliczonych parametrów. Ponieważ pomiar obejmował czas pracy drukarki wierszowej, rzeczywisty czas pracy maszyny cyfrowej jest nieco mniejszy.

Bibliografia

1. Aleksandrow A.A.: "Sistema urawnienii dla wodianowo para, prednaznaczennaja dla techniczeskich rascziotow". Tepłoenenergetyka. Nr 6, 1967.
2. Altunin W.W.: "Metod sostawlenia uprawnienia sostajania realnowo gaza po ograniczennomu koliczestwu ischodnych opytnych danych". Tepłoenenergetyka. Nr 3, 1962.
3. Haywood R.W.: Proceedings of the Sixth International Conference on the Properties of Steam. New York 1963.

4. Hotes H.: "Gleichungen und Rechenverfahren zur Bestimmung der Zustandsgrosen von Wasserdampf und Wasser auf digitalen Rechnautomaten". Allgem. Wärmetechn. 9, Nr 11/12, 1960.
5. Juza J.: "Urawnienie sostajania dla nasyczennowo i pie-regritowo para". Tepłoennergetyka. Nr 10, 1960.
6. Juza J.: "Urawnienia dla termodynamiczeskich swoistw wody i wodianowo para, prednaznaczennyje dla wyczylitelnych ma-szyn". Tepłoennergetyka. Nr 1, 1967.
7. Juza J.: An Equation of State for Water and Steam, Steam Tables in the Critical Region and in the Range from 1000 to 10000C bars. Academia, Nakladatelstvi Ceskoslovenske akademie ved. Praha, 1966.
8. Kesselman P.M.: "K waprosu opredielenia temperaturnoj funkcji urawnienia sostojenia realnowo gaza". Inżynierno Fiziczeskij Żurnał Nr 5, 1959.
9. Kazawczinskij J.Z., Kathe O.I.: "Urawnienie sostojania dla wodianowo para". Tepłoennergetyka Nr 7, 1958.
10. Kestin J., Di Pippo R.: Seventh Conference on the Properties of Steam. Area D: Formulation of equilibrium properties. Tokyo, Japan, September 1968 - Division of Engineering Brown University Providence. July 1968.
11. Keyes F.G., Kinan D.G.: "Itogi pierwowo sowieszczenia Miedzunarodnowo Koordynacjonnowo Komiteta po swojstwam wodianowo para, prochodiszewo w Moskwie 21 - 22 ijulia 1958 g." Tepłoennergetyka Nr 11, 1958.
12. Kirilin W.A.: "O miedzunarodnom sotrudniczestwie w obłasti issledowania termodynamiczeskich swoistw wodianowo para". Tepłoennergetyka Nr 7, 1958.
13. Meyer-Pittroff R., Grigull U.: Eine Umkehrfunktion zu der "1967 I.F.C. Formulation for Industrial Use" für die Berechnung der Temperatur von überhitztem Wasserdampf abhün-gig von Druck und Enthalpie". BWK 21, Nr 12, 1969.
14. Meyer-Pittroff R., Vesper H., Grigull U.: "Einige Umkehrfunktionen und Näherungsgleichungen zur "1967 I.F.C. Formulation for Industrial Use" für Wasser und Wasserdampf". BWK 21, Nr 5, 1969.

15. Maynger F., Schmidt E., Tratz H.: "Neue Zustandsgleichungen für Wasserdampf unter Berücksichtigung ihrer Verwendung in elektronischen Rechenanlagen". BWK 14, Nr 6, 1962.
16. "Meždunarodnyje stieklenyje tablicy termodinamiczeskich swoistw wody i wodianowo para 1963 goda". Tepłoennergetyka Nr 4, 1964.
17. Pałagin A.A., Finsztejn A.S., Kiriuchina G.P.: "K opredieniu parametrov sostojania wody i wodianowo para na cifrowoj awtomatycznej maszynie Urał - 1". Tepłoennergetyka Nr 1, 1963.
18. Pich R., Drehsen K.H.: - "Die Ermittlung der Zustandsgrossen von Wasser und Wasserdampf bei der elektronischen Berechnung von Dampfkesseln mit Hilfe digitaler Rechenautomaten". Energie 14, Nr 6, 1962.
19. Roszczin A.M., Kapłun S.M., Popyrin L.S.: "K woprosu ob opredienienii termodinamiczeskich parametrov sostojania wody i wodianowo para pri rascziotach na E.W.M." Izv. SO AN SSSR Nr 6, 1965.
20. Rywkin S.L., Achundow T.S.: - "Eksperymentalnoje isledowanie udielnych obiemow wody". Tepłoennergetyka Nr 1, 1962.
21. Sirota A.M., Malcew B.K.: "Eksperymentalnoje isledowanie tepłoenkosti wody w kriticzeskoj obłasti". Tepłoennergetyka Nr 1, 1962.
22. Sirota A.M., Malcew B.K.: "Eksperymentalnoje issledowanie tepłoenkosti wodianowo para". Tepłoennergetyka Nr 7, 1962.
23. Sirota A.M., Malcew B.K., Griszko A.J.: "Eksperymentalnoje issledowanie tepłoenkosti wody pri wysokich dawleniach". Tepłoennergetyka Nr 9, 1963.
24. Sirota A.M.: "Tepłoenkost wody i wodianowo para pri postojannom dawlenii na kriwoj nasyszczenia". Inżynierno Fizoczeskij Żurnał Nr 12, 1963.
25. Sirota A.M., Bieliakowa P.E., Szrago Z.H.: "Tablicy tepłoenkosti c_p wody". Tepłoennergetyka Nr 11, 1966.
26. Schmidt E.: "V D I" Wasserdampftafeln" - Berlin - Heidelberg - New York u. München: Springer Verlag und R. Oldenburg Verlag 1968.

27. Steltz W.G., Silversti G.I.: "The formulation od steam properties for digital computer application". Trans. A S M E T.80 Nr 4, 1958.
28. Schnackel H.C.: "Formulations for the thermodynamic properties of steam und water". Trans. A S M E T. 80, Nr 4, 1958.
29. Szeindlin A.E., Syczew W.W.: "Eksperymentalnoje issledowanie entalpii wody i wodianowo para pri temperaturach do 390°C i dawleniach do 500 KG/cm²". Tepłoennergetyka Nr 9, 1963.
30. Stepanczyk W.F.: "Kaloriceskoje urawnienie wody (żidkosti) dla szerokowo interwała dawlenii pri t 200°C" Izv. Wyz. Ucz. Zaw. SSSR - Energetyka Nr 10, 1969.
31. Stepanczyk W.F.: "Urawnienie sostojanja wody (żidkosti) dla szerokowo interwała dawlenii pri t 200°C". Izv. Wyz. Ucz. Zaw. SSSR - Energetyka Nr 2, 1970.
32. Stepanczyk W.F.: "Otnositelno obszczewo wida kaloricesko-wo urawnienia realnowo gaza". Izv. Wyz. Ucz. Zaw. SSSR - Energetyka Nr 7, 1970.
33. Timrot D.L., Riwkin S.L., Sirota A.M., Wargaftik N.B.: "Tablicy termodynamiczeskich swojstw wody i wodianowo para". Gosenergoizdat 1958.
34. Tratz H.: "Neue Zustandsgleichungen für flüssigs Wasser und eine verbesserte Gleichung der Dampfdruckkurve". BWK 14, Nr 8, 1962.
35. Wargeftik N.B.: "Tiepl'ofiziczeskije swojstwa wieszczestw. Sprawocznik". Gosenergoizdat 1956.
36. Wukałowicz M.P., Dżampow B.W., Razkazow D.S.: "Termiczeskije swoistwa wody i wodianowo para pri dawlenii do 1000 KG/cm² w interwale temperatur od 300 do 1000°C" Tepłoennergetyka Nr 7, 1961.
37. Wukałowicz M.P., Dżampow B.W., Razkazow D.S., Remizow S.S.: "Tablicy tiepl'oemkosti c_p wody i wodianowo para". Tepłoennergetyka Nr 12, 1961.
38. Wukałowicz M.P., Zubariew W.N., Aleksandrow A.A.: "Eksperymentalnoje opredielenie udielnych obiemow wodianowo para pri temperature 700 - 900°C i dawlenii do 1200 KG/cm²". Tepłoennergetyka Nr 1, 1962.

39. Wukałowicz M.P., Zubarijew W.N., Aleksandrow A.A.: "Urawnienie sostożania i tablicy termodynamiczeskich swoistw wodianowo para pri temperaturach $850 \div 1500^{\circ}\text{C}$ i dawleniach $10 \div 1000 \text{ KG/cm}^2$ ". Tepłoenerygetyka Nr 7, 1962.
40. Wukałowicz M.P.: "Tablice termodynamiczeskich swoistw wody i wodianowo para". Gosenergoizdat 1963.
41. Wukałowicz M.P.: "Szestoża mieźdunarodnaja konferencija po swoistwam wody i wodianowo para". Tepłoenerygetyka Nr 4, 1964.
42. Wukałowicz M.P., Zubarijew W.N., Prusakow P.G.: "Urawnienie sostożania wodianowo para pri temperaturach $800 \div 1500^{\circ}\text{C}$ i dawleniach $5 \div 1000 \text{ bar}$ ". Tepłoenerygetyka Nr 9, 1965.
43. Wukałowicz M.P. - "Tablice termodynamiczeskich swoistw wody i wodianowo para". Izdatielstwo Energia, 1965.
44. Wukałowicz M.P. Wargaftik N.B., Riwkin S.L., Aleksandrow A.A.: "O rabotie mieźdunarodnowo komiteta po formuliacjam dla wodianowo para i wody". Tepłoenerygetyka Nr 1, 1967.
45. Wukałowicz M.P., Altunin W.W., Spiridonow G.A.: "Metody postrożenia urawnienii sostożania wieszczestw po eksperymentalnym termodynamiczeskim danym z primienieniem elektronno - wycisłitelnych cyfrowych maszyn". Tepłofizyka Wysokich Temperatur T. 5, Nr 2, 1967.
46. Wukałowicz M.P., Zubarijew W.N., Siergiejewa L.W.: "Urawnienie sostożania pieregritowo wodianowo para, prigodnoje dla rascziotow turbin z pomoszczju E.C.W.M.". Nr 5, 1967.
47. Wukałowicz M.P., Trachtengerc M.C., Spiridonow G.A.: "Urawnienie sostożania wodianowo para pri temperaturach wysze 500°C ". Tepłoenerygetyka Nr 7, 1967.
48. Wukałowicz M.P., Aleksandrow A.A., Trachtengerc M.C.: "Urawnienie sostożania pieregritowo wodianowo para, prednaznaczennoje dla promyszlennych rascziotow na E.W.C.M." Tepłoenerygetyka Nr 9, 1968.
49. Wulman F.A.: "Rascziot parametrow i pokazatelej tepłowej schematy na bystrodejstwużuszczej cifrowej wycisłitelnoj maszynie". Tepłoenerygetyka Nr 9, 1963.
50. Wulman F.A., Woronina W.P.: "Rascziot termodynamiczeskich swoistw wody i wodianowo para na bystrodejstwużuszczej

- wycisłitelnoj maszinie po urawnieniu Zagoruczenko - Kazawczinskowo". Tepłoenetergetyka Nr 6, 1964.
51. Vesper H.: "Näherungsgleichungen für die Zustandsgrößen des Wassers und des Dampfes an den Grenzkurven zur Verwendung in elektronischen Rechenmaschinen". BWK 15, Nr 1, 1963.
 52. Zens R.: "Ein Programmsystem für die elektronische Berechnung von Kreisprozessen bei Dampfturbinenanlagen". BWK 15, Nr 2, 1963.
 53. Zens R.: "Näherungsgleichung für die Berechnung isentroper Wärmegefälle des überhitzten Wasserdampfes mit einer Datenverarbeitungsanlage": Siemens - Z. 38, Nr 1, 1964.
 54. Zens R.: "Ein Programmsystem für die elektronische Berechnung von Kreisprozessen bei Dampfturbinenanlagen". Siemens - Z. 37, Nr 7, u. Nr 8, 1963.
 55. The 1967 I.F.C. Formulation for industrial use. Issued by the International Formulation Committee of the Sixth International Conference on the Properties of Steam.
 56. Meyer-Pittroff R., Vesper H., Grigull U.: "Einige Umkehrfunktionen und Näherungsgleichungen zur "1967 I.F.C. Formulation for Industrial Use" für Wasser und Wasserdampf". BWK 21, Nr 5, 1969.

Расчет параметров водяного пара и воды
при помощи математической вычислительной машины

К р а т к о е с о д е р ж а н и е

Описана процедура закодированная в системе GIER Algol III которая подсчитывает все зависимости между параметрами водяного пара и воды, необходимые при расчетах (при помощи математической вычислительной машины) параметров термодинамического цикла энергоустановок, работающих при изменяющихся условиях.

Доклад заключает перечень аналитических зависимостей между параметрами пара и воды, которые были исследованы для програм-

мирования, описание процедуры и примеры проверочных расчетов.

The Calculation of the Parameters of Water
Steam and Water with the Use of the Computer

S u m m a r y

It is presented the procedure that was recorded in GIER Algol III code and that calculates all the interdependences between water steam and water parameters that are indispensable for calculation (with the aid of computer) of the termic circulation of the power station working in changin conditions.

The work include the compendium of analitical interdependences between water steam and water parameters that were used for programming and the procedure description and examples of verifying calculations.

Rękopis dostarczone w listopadzie 1970 r.