

Marcin Łatka, Jerzy Sado

Instytut Techniki Ciepłej

PARAMETRY I FUNKCJE TERMODYNAMICZNE FREONU R12 NA KRZYWEJ GRANICZNEJ

W pracy podano przybliżone zależności, które pozwalają obliczyć parametry i funkcje termodynamiczne na krzywej granicznej freonu R12. Znalaziono dwa rodzaje zależności, w których argumentem jest ciśnienie lub temperatura nasycenia, a poszukuje się gęstości, entalpii właściwej lub entropii właściwej cieczy wrzącej i pary nasyconej suchej. Załączono procedurę napisaną w języku Fortran IV dla obliczania wyżej wymienionych funkcji termodynamicznych. Zakres działania procedury zawiera się w przedziałach: $t \in \langle -70^{\circ}\text{C}; 105^{\circ}\text{C} \rangle$ oraz $p \in \langle 0,0123 \text{ MPa}; 3,649 \text{ MPa} \rangle$.

WYKAZ OZNACZEŃ

- t - temperatura nasycenia
- p - ciśnienie nasycenia
- h - entalpia właściwa
- s - entropia właściwa
- v - objętość właściwa
- f - funkcja
- x - argument funkcji
- ρ - gęstość
- ε - różnica
- σ - średnie odchylenie standardowe

Indeksy

- - wartość dokładna
- ' - ciecz wrząca
- " - para nasycona sucha

1. WSTĘP

Przy sporządzaniu bilansów cieplnych urządzeń pracujących w obszarze pary wilgotnej konieczna jest znajomość parametrów i funkcji termodynamicznych cieczy wrzącej i pary nasyconej suchej czynnika. W zależności od rodzaju bilansów stosuje się następujące metody:

a) dla prostych obliczeń bilansowych - tablice lub wykresy funkcji cieplnych,

b) dla żmudnych obliczeń bilansowych wymagających wykorzystania komputera - uniwersalne zależności funkcyjne,

c) w celu optymalizacji układu - specjalne zależności funkcyjne przybliżające również pochodną funkcji termodynamicznej.

W przedstawionej pracy znaleziono zależności funkcyjne dla freonu R12, które mogą być wykorzystane dla bilansów b. Wartości parametrów i funkcji termodynamicznych freonu wzięto z [1]. Ze względu na specyfikę obszaru okołokrytycznego ($t_c = 112^\circ\text{C}$ i $p_c = 4,131\text{ MPa}$) ograniczono od góry dziedzinę: temperaturę nasycenia do 110°C i ciśnienie nasycenia do $3,98\text{ MPa}$. Ostatecznie rozwiązano zadanie aproksymacyjne dla $m = 211$ danych tablicowych (węzłów) zawierających się w przedziałach: $t \in \langle -100^\circ\text{C}; 110^\circ\text{C} \rangle$ oraz $p \in \langle 0,0119\text{ MPa}; 3,98\text{ MPa} \rangle$. Parametry i funkcje termodynamiczne, które wzięto z [1], mają następujące miana: t [$^\circ\text{C}$], p [bar], h [kJ/kg], s [kJ/(kg·K)], ρ' [g/cm³], ρ'' [kg/m³].

Celem pracy jest znalezienie funkcji aproksymacyjnych, których argumentami są temperatura lub ciśnienie nasycenia, a wartościami funkcji są gęstość, entalpia właściwa i entropia właściwa cieczy wrzącej i pary nasyconej suchej, jak również i wzajemna relacja $t = t(p)$ oraz $p = p(t)$.

2. OPIS METODY I WYNIKI OBLICZEŃ

W zadaniu aproksymacji rozwiązuje się nadokreślony układ równań, w którym ilość niewiadomych - n (współczynników w funkcji przybliżającej) jest mniejsza od ilości równań - m . Powoduje to zmniejszenie błędu wielkości aproksymowanych i wygładza kształt funkcji aproksymującej. W zależności od wyboru funkcji bazowej $\varphi_j(x)$ rozwiązuje się zadanie liniowe lub nieliniowe. Z analizy teoretycznej wiadomo, że do aproksymacji liniowej najlepsze są wielomiany, a do nieliniowej - funkcje wymierne. Wybór ilości niewiadomych podlega następującym ograniczeniom: duża wartość - n prowadzi do powstania znacznego błędu losowego, mała wartość - n - do powstania znacznego błędu obciążenia.

Korzystając z wyników pracy [2] wybrano $n = 7$ zarówno dla aproksymacji liniowej jak i nieliniowej.

Postawione zadanie rozwiązano wykorzystując aproksymację w sensie najmniejszych kwadratów o normie określonej zależnością

$$\|\varepsilon\| = \sqrt{\sum_{i=1}^m \varepsilon^2(x)} \quad (1)$$

gdzie: $\varepsilon(x) = \bar{f}(x) - f(x)$,

$$f(x) = a_1 \varphi_1(x) + \dots + a_n \varphi_n(x),$$

$\bar{f}(x)$ - wielkość stabilizowana,

$\varphi_j(x)$ - funkcja bazowa.

Obliczenia przeprowadzono na EMC Cyber CDC 70 wykorzystując 15 cyfr znaczących. Wyniki obliczeń (współczynniki a_j) podano z dokładnością do 7 cyfr znaczących, co umożliwia wykorzystanie znalezionych funkcji w maszynach klasy IBM-PC. Analiza dokładności podana dla każdego przypadku została zrobiona dla współczynników a_j obciętych do 7 cyfr znaczących.

2.1. APROKSYMACJA LINIOWA

Ze względu na łatwość generowania i szybkość zbieżności wykorzystano wielomiany ortogonalne. Metodę generowania wielomianów ortogonalnych wzięto z [3]. W celu sprawdzenia wpływu ilości niewiadomych n na dokładność aproksymacji, znaleziono rozwiązanie dla wielomianu

$$f(x) = \sum_{i=1}^n a_i x^{i-1} \quad (2)$$

$n = 1, 2, \dots, 7$ dla wszystkich funkcji termodynamicznych.

Obliczone wariancje σ^2 zestawiono w tab. 1. Dodatkowo znaleziono również rozwiązanie dla $n = 12$ i okazało się, że dla wszystkich funkcji podanych w tab. 1 zmieniło to wariancję w co najwyżej trzeciej cyfrze znaczącej, w porównaniu z $n = 7$. Z tego powodu przyjęto $n = 7$ jako wartość ostateczną.

Obliczone wartości współczynników a_j wzoru (2) dla wszystkich funkcji termodynamicznych zestawiono w tab. 2.

Tabela 1

Lp.	Funkcja	6^2 dla wielomianu stopnia $k = n - 1$						
		$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$	$n = 6$	$n = 7$
1	$p(t)$	$0,2496 \cdot 10^2$	$0,1485 \cdot 10^1$	$0,1318 \cdot 10^{-1}$	$0,6010 \cdot 10^{-4}$	$0,3680 \cdot 10^{-4}$	$0,3810 \cdot 10^{-5}$	$0,3422 \cdot 10^{-5}$
2	$q'(t)$	$0,2095 \cdot 10^{-2}$	$0,4142 \cdot 10^{-3}$	$0,1134 \cdot 10^{-3}$	$0,3969 \cdot 10^{-4}$	$0,1609 \cdot 10^{-4}$	$0,7142 \cdot 10^{-5}$	$0,3382 \cdot 10^{-5}$
3	$q''(t)$	$0,2145 \cdot 10^4$	$0,4418 \cdot 10^3$	$0,1070 \cdot 10^3$	$0,3524 \cdot 10^2$	$0,1292 \cdot 10^2$	$0,5024 \cdot 10^1$	$0,2068 \cdot 10^1$
4	$h'(t)$	$0,2415 \cdot 10^2$	$0,2826 \cdot 10^1$	$0,9580 \cdot 10^0$	$0,2804 \cdot 10^0$	$0,7739 \cdot 10^{-1}$	$0,3117 \cdot 10^{-1}$	$0,1432 \cdot 10^{-1}$
5	$h''(t)$	$0,2944 \cdot 10^2$	$0,7069 \cdot 10^1$	$0,1302 \cdot 10^1$	$0,4239 \cdot 10^0$	$0,1489 \cdot 10^0$	$0,5798 \cdot 10^{-1}$	$0,2543 \cdot 10^{-1}$
6	$s'(t)$	$0,8508 \cdot 10^{-4}$	$0,2933 \cdot 10^{-4}$	$0,5672 \cdot 10^{-5}$	$0,1988 \cdot 10^{-5}$	$0,5732 \cdot 10^{-6}$	$0,2964 \cdot 10^{-6}$	$0,1757 \cdot 10^{-6}$
7	$s''(t)$	$0,3494 \cdot 10^{-3}$	$0,1561 \cdot 10^{-3}$	$0,4026 \cdot 10^{-5}$	$0,3608 \cdot 10^{-5}$	$0,9413 \cdot 10^{-6}$	$0,4365 \cdot 10^{-6}$	$0,2036 \cdot 10^{-6}$
8	$t(p)$	$0,7755 \cdot 10^3$	$0,3336 \cdot 10^3$	$0,1848 \cdot 10^3$	$0,1159 \cdot 10^3$	$0,7842 \cdot 10^2$	$0,5579 \cdot 10^2$	$0,4115 \cdot 10^2$
9	$q'(p)$	$0,4356 \cdot 10^{-2}$	$0,2591 \cdot 10^{-2}$	$0,1183 \cdot 10^{-2}$	$0,7995 \cdot 10^{-3}$	$0,5070 \cdot 10^{-3}$	$0,3689 \cdot 10^{-3}$	$0,2648 \cdot 10^{-3}$
10	$q''(p)$	$0,2185 \cdot 10^3$	$0,3216 \cdot 10^2$	$0,4015 \cdot 10^1$	$0,1079 \cdot 10^1$	$0,1462 \cdot 10^0$	$0,5653 \cdot 10^{-1}$	$0,8574 \cdot 10^{-2}$
11	$h'(p)$	$0,5421 \cdot 10^3$	$0,2481 \cdot 10^3$	$0,1277 \cdot 10^3$	$0,7976 \cdot 10^2$	$0,5255 \cdot 10^2$	$0,3715 \cdot 10^2$	$0,2707 \cdot 10^2$
12	$h''(p)$	$0,2269 \cdot 10^3$	$0,7559 \cdot 10^2$	$0,4481 \cdot 10^2$	$0,2646 \cdot 10^2$	$0,1799 \cdot 10^2$	$0,1251 \cdot 10^2$	$0,9179 \cdot 10^1$
13	$s'(p)$	$0,1089 \cdot 10^{-1}$	$0,5383 \cdot 10^{-2}$	$0,3045 \cdot 10^{-2}$	$0,1984 \cdot 10^{-2}$	$0,1364 \cdot 10^{-2}$	$0,9908 \cdot 10^{-3}$	$0,7420 \cdot 10^{-3}$
14	$s''(p)$	$0,1204 \cdot 10^{-2}$	$0,9896 \cdot 10^{-3}$	$0,7049 \cdot 10^{-3}$	$0,5526 \cdot 10^{-3}$	$0,4307 \cdot 10^{-3}$	$0,3465 \cdot 10^{-3}$	$0,2811 \cdot 10^{-3}$

Tabela 2

Funkcja	a_1	a_2	a_3	a_4
$p(t)$	$00,3083160 \cdot 10^1$	$0,1013762 \cdot 10^0$	$0,1254253 \cdot 10^{-2}$	$0,6524910 \cdot 10^{-5}$
$q'(t)$	$0,1396876 \cdot 10^1$	$-0,3275718 \cdot 10^{-2}$	$-0,1021901 \cdot 10^{-4}$	$0,4127243 \cdot 10^{-8}$
$q''(t)$	$0,1661671 \cdot 10^2$	$0,6217355 \cdot 10^0$	$0,9914987 \cdot 10^{-2}$	$0,2631372 \cdot 10^{-5}$
$h'(t)$	$0,3999131 \cdot 10^3$	$0,9546037 \cdot 10^0$	$0,1059386 \cdot 10^{-2}$	$-0,2509887 \cdot 10^{-5}$
$h''(t)$	$0,5530279 \cdot 10^3$	$0,4423624 \cdot 10^0$	$-0,1096259 \cdot 10^{-2}$	$-0,2265962 \cdot 10^{-5}$
$s'(t)$	$0,3999780 \cdot 10^1$	$0,3464083 \cdot 10^{-2}$	$-0,3051860 \cdot 10^{-5}$	$0,5083378 \cdot 10^{-9}$
$s''(t)$	$0,4560199 \cdot 10^1$	$-0,4493161 \cdot 10^{-3}$	$0,3814488 \cdot 10^{-5}$	$-0,3653022 \cdot 10^{-7}$
$t(p)$	$-0,7646876 \cdot 10^2$	$0,4342427 \cdot 10^2$	$-0,7200122 \cdot 10^1$	$0,6107272 \cdot 10^0$
$q'(p)$	$0,1613226 \cdot 10^1$	$-0,1187000 \cdot 10^0$	$0,1857784 \cdot 10^{-1}$	$-0,1561978 \cdot 10^{-2}$
$q''(p)$	$0,2567079 \cdot 10^0$	$0,5746213 \cdot 10^1$	$-0,3971132 \cdot 10^{-2}$	$-0,4806124 \cdot 10^{-2}$
$h'(p)$	$0,3322394 \cdot 10^3$	$0,3760508 \cdot 10^2$	$-0,6046441 \cdot 10^1$	$0,5094170 \cdot 10^0$
$h''(p)$	$0,5166007 \cdot 10^3$	$0,2090024 \cdot 10^2$	$-0,3533412 \cdot 10^1$	$0,2986743 \cdot 10^0$
$s'(p)$	$0,3711096 \cdot 10^1$	$0,1686549 \cdot 10^0$	$-0,2893148 \cdot 10^{-1}$	$0,2472713 \cdot 10^{-2}$
$s''(p)$	$0,4649162 \cdot 10^1$	$-0,6190611 \cdot 10^{-1}$	$0,1255259 \cdot 10^{-1}$	$-0,1127328 \cdot 10^{-2}$

Funkcja	a_5	a_6	a_7
$p(t)$	$0,8664985 \cdot 10^{-8}$	$0,3134208 \cdot 10^{-11}$	$0,2165431 \cdot 10^{-12}$
$q'(t)$	$0,1003602 \cdot 10^{-8}$	$-0,6307628 \cdot 10^{-11}$	$-0,1127693 \cdot 10^{-12}$
$q''(t)$	$-0,9077718 \cdot 10^{-6}$	$0,6247400 \cdot 10^{-8}$	$0,1059215 \cdot 10^{-9}$
$h'(t)$	$-0,5538099 \cdot 10^{-7}$	$0,6557992 \cdot 10^{-9}$	$0,8104677 \cdot 10^{-11}$
$h''(t)$	$0,9535220 \cdot 10^{-7}$	$-0,7048767 \cdot 10^{-9}$	$-0,1137109 \cdot 10^{-10}$
$s'(t)$	$-0,1499216 \cdot 10^{-9}$	$0,1777472 \cdot 10^{-11}$	$0,1983532 \cdot 10^{-13}$
$s''(t)$	$0,4095193 \cdot 10^{-9}$	$-0,2454206 \cdot 10^{-11}$	$0,2678773 \cdot 10^{-13}$
$t(p)$	$-0,2605097 \cdot 10^{-1}$	$0,5381944 \cdot 10^{-3}$	$-0,4284682 \cdot 10^{-5}$
$q'(p)$	$0,6592379 \cdot 10^{-4}$	$-0,1347429 \cdot 10^{-5}$	$0,1058591 \cdot 10^{-7}$
$q''(p)$	$0,6191631 \cdot 10^{-3}$	$-0,2169099 \cdot 10^{-4}$	$0,2696935 \cdot 10^{-6}$
$h'(p)$	$-0,2162933 \cdot 10^{-1}$	$0,4453360 \cdot 10^{-3}$	$-0,3533598 \cdot 10^{-5}$
$h''(p)$	$-0,1275077 \cdot 10^{-1}$	$0,2638995 \cdot 10^{-3}$	$-0,2108402 \cdot 10^{-5}$
$s'(p)$	$-0,1057320 \cdot 10^{-3}$	$0,2186376 \cdot 10^{-5}$	$-0,1740550 \cdot 10^{-7}$
$s''(p)$	$0,4926544 \cdot 10^{-4}$	$-0,1030975 \cdot 10^{-5}$	$0,8263265 \cdot 10^{-8}$

Analiza otrzymanego rozwiązania pokazuje, że:

- wartości średniego odchylenia standardowego dla wielomianów

$t = t(p)$ i $\rho'' = \rho''(t)$ są duże,

- dla $t \in \langle -100^{\circ}\text{C}; -70^{\circ}\text{C} \rangle$ wartości gęstości pary nasyconej suchej obliczone z wielomianu $\rho'' = \rho''(t)$ są ujemne.

Usterki te próbowano usunąć (nie zawsze z pozytywnym skutkiem) stosując aproksymację nieliniową.

2.2. APROKSYMACJA NIELINIOWA

Aby znaleźć dokładniejszą formułę dla $t = t(p)$, wykorzystano funkcję nieliniową o postaci

$$f(x) = \sum_{i=1}^7 a_i x^{i-4} \quad (3)$$

Rozwiązanie równania (1), w którym zastosowano funkcję (3) otrzymano posługując się metodą programowania nieliniowego, wykorzystując zmodyfikowany algorytm Rosenbrocka [4]. Rozwiązaniem, w którym średnie odchylenie standardowe $\delta = 4,588$, jest wektor

$$\mathbf{a} = \begin{pmatrix} -0,6846479 \cdot 10^{-3} \\ 0,9765277 \cdot 10^{-1} \\ -0,4239414 \cdot 10^1 \\ -0,3789244 \cdot 10^2 \\ 0,1195955 \cdot 10^2 \\ -0,4288231 \\ 0,5722145 \cdot 10^{-2} \end{pmatrix} \quad (4)$$

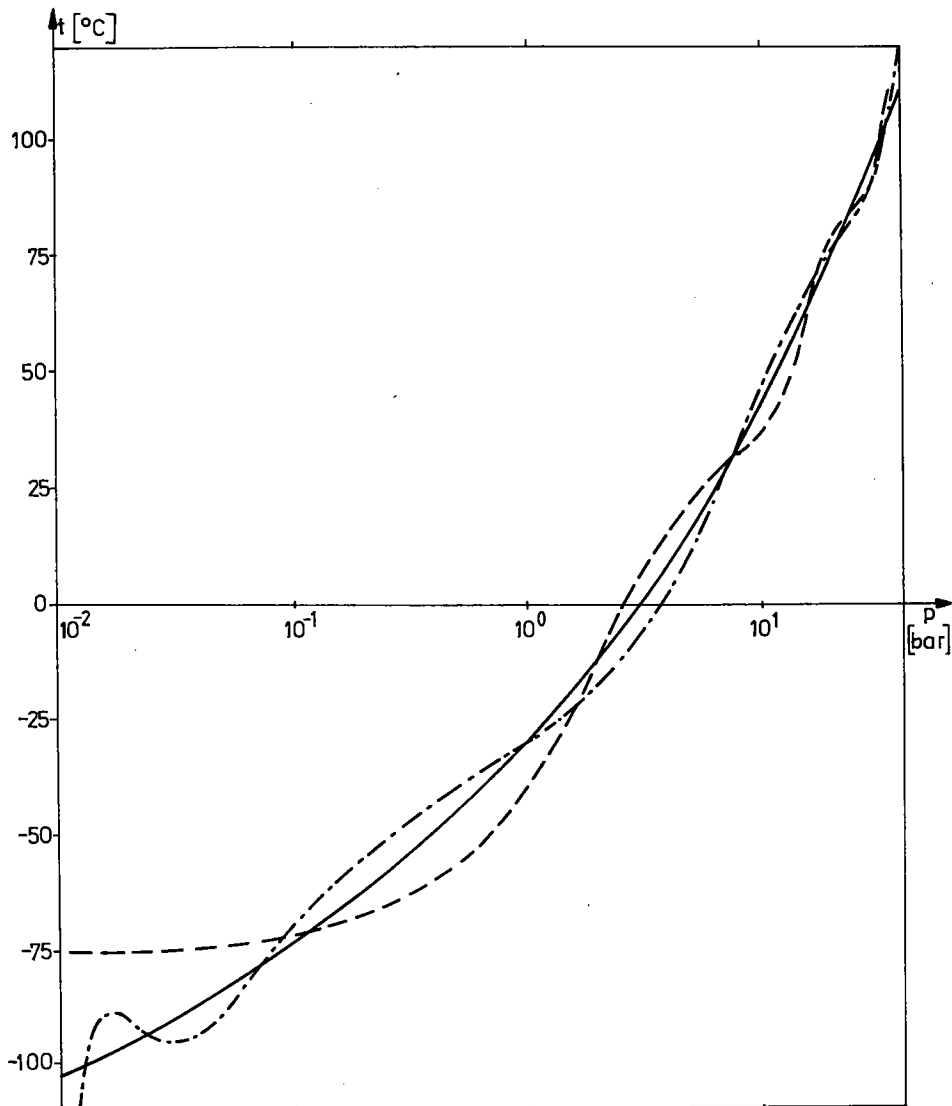
Próby wykorzystania funkcji nieliniowych o postaci

$$f(x) = \sum_{i=1}^7 a_i x^{i-3}, \quad (5)$$

$$f(x) = \sum_{i=1}^7 a_i x^{i-2} \quad (6)$$

nie poprawiły średniego odchylenia standardowego.

Na rysunku 1 pokazano linią ciągłą przebieg rzeczywistej linii nasycenia (wg danych z [1]), linią przerywaną - przebieg wynikający z wykorzystania funkcji (2), a linią kropkowo-kreskową - ze stosowania funkcji (3). Jak widać, największe odchylenia pojawiły się przy obu kresach dziedziny, co jest cechą charakterystyczną dla aproksymacji średniokwadratowej.



Rys.1. Aproksymacja wartości dla krzywej nasycenia (—) wartości dokładne; (---) przybliżenie liniowe; (-·-·-) przybliżenie nieliniowe

Aby znaleźć dokładniejszą zależność $\rho'' = \rho''(t)$, wypróbowano następujące funkcje nieliniowe:

- funkcję (3), w której $x = 273,15 + t$, w tym przypadku otrzymano $\delta = 8,409$;
- funkcję (3), w której $x = 101,5 + t$; w tym przypadku otrzymano $\delta = 11,82$;
- funkcję

$$f(t) = \sum_{i=1}^4 a_i (273,15 + t)^{i-4} + \sum_{i=5}^5 a_i t^{i-4} \quad (7)$$

Otrzymano w tym przypadku $\delta = 9,511$;

- funkcję

$$f(t) = \sum_{i=1}^3 a_i (273,15 + t)^{i-3} + \sum_{i=4}^7 a_i t^{i-3} \quad (8)$$

otrzymano w tym przypadku $\delta = 4,589$;

- funkcję

$$f(t) = \sum_{i=1}^2 a_i (273,15 + t)^{i-2} + \sum_{i=3}^7 a_i t^{i-2} \quad (9)$$

otrzymano w tym przypadku $\delta = 9,265$.

We wszystkich tych przypadkach otrzymano niefizyczne (ujemne) wartości gęstości ρ'' dla temperatury $t < -70^\circ\text{C}$. Ostatecznie dla zależności $\rho'' = \rho''(t)$ zaleca się stosowanie funkcji (2) z współczynnikami a_j podanymi w tab. 2, ale tylko dla temperatur $t \geq -70^\circ\text{C}$.

W przypadku gdy ograniczy się zakres stosowanych wzorów do obszarów:

$$0,01223 \text{ MPa} \leq p \leq 3,649 \text{ MPa}$$

$$-70^\circ\text{C} \leq t \leq 105^\circ\text{C}$$

znacznie poprawia się dokładność aproksymacji. W tabeli 3 zestawiono nowe wartości średnich odchyżeń standardowych obliczonych dla ograniczonego obszaru zmian parametrów funkcji.

Występujące w tab. 3 funkcje o numerach porządkowych 1-7 mają postać (2) ze współczynnikami z tab. 2, a ostatnia funkcja ma postać (3) ze współczynnikami (4).

Tabela 3

Lp.	Funkcja	δ
1	$p(t)$	$0,1573 \cdot 10^{-2}$
2	$q'(t)$	$0,2098 \cdot 10^{-2}$
3	$q''(t)$	$0,1838 \cdot 10^1$
4	$h'(t)$	0,1424
5	$h''(t)$	0,2057
6	$s'(t)$	$0,4732 \cdot 10^{-3}$
7	$s''(t)$	$0,5658 \cdot 10^{-3}$
8	$t(p)$	$0,4416 \cdot 10^1$

Z przeprowadzonej analizy wynika, że przy p jako zmiennej niezależnej uzyskuje się dokładniejsze przybliżenie wartości funkcji termodynamicznych, gdy zrealizuje się następujący algorytm obliczeniowy:

- obliczyć $t = t(p)$,
- znaleźć wartości funkcji termodynamicznych wykorzystując zależności omówione przy tab. 3.

Błąd wyznaczenia wartości funkcji można oszacować następująco:

$$|\Delta f| = \left| \left\langle \frac{df}{dt} \right\rangle \right| \delta_{t(p)} \quad (10)$$

gdzie:

$\left\langle \frac{df}{dt} \right\rangle$ - średnia wartość pochodnej funkcji f ,

$\delta_{t(p)}$ - średnie standardowe odchylenie obliczenia temperatury.

Obliczone średnie wartości błędu funkcji termodynamicznych zestawiono w tab. 4.

Tabela 4

Lp.	Funkcja	$ \Delta f $
1	$q'(p)$	$0,1447 \cdot 10^{-1}$
2	$q''(p)$	$0,2746 \cdot 10^1$
3	$h'(p)$	$0,4216 \cdot 10^1$
4	$h''(p)$	$0,1953 \cdot 10^1$
5	$s'(p)$	$0,1530 \cdot 10^{-1}$
6	$s''(p)$	$0,1984 \cdot 10^{-2}$

3. PROCEDURA MASZYNOWA

W celu lepszego wykorzystania otrzymanych zależności napisano procedurę na EMC w publikacyjnym Fortranie IV. Procedura oblicza wartości funkcji i parametrów termodynamicznych freonu R12 dla argumentu, którym może być temperatura lub ciśnienie nasycenia. Procedura oblicza wartości funkcji tylko dla zmiennych z podanej uprzednio dziedziny. Próba wykorzystania procedury dla argumentu spoza dziedziny, powoduje przerwanie realizacji i wydrukowanie ostrzegawczego komunikatu.

Sposób wołania procedury:

CALL SAT(T,P,Z,KTORY, IDRUK)

W segmencie wywołującym procedurę SAT należy zadeklarować zmienną indeksowaną Z jako

DIMENSION Z(6)

Parametrami wejściowymi procedury są:

- IDRUK - gdy różne od zera, to zostaną wydrukowane wyniki;
- gdy równe zero, wyniki nie są drukowane;
- KTORY=1 - argumentem jest temperatura nasycenia i wtedy T jest również parametrem wejściowym;
- KTORY=2 - argumentem jest ciśnienie nasycenia i wtedy P jest również parametrem wejściowym.

Parametrami wyjściowymi procedury są:

- P - ciśnienie nasycenia, gdy KTORY = 1,
- T - temperatura nasycenia, gdy KTORY = 2,
- Z - wektor wartości funkcji termodynamicznych. Kolejnymi współrzędnymi wektora Z są:

$$Z(1) - v' [\text{cm}^3/\text{g}],$$

$$Z(2) - v'' [\text{m}^3/\text{kg}],$$

$$Z(3) - h' [\text{kJ}/\text{kg}],$$

$$Z(4) - h'' [\text{kJ}/\text{kg}],$$

$$Z(5) - s' [\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})],$$

$$Z(6) - s'' [\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})].$$

Specjalny program testowy napisany w celu zbadania szybkości działania procedury potrzebował 1,945 s pracy centralnego procesora maszyny Cyber dla 352 wartości argumentu. Program wraz z procedurą zajęły w pamięci operacyjnej 768 słów 60-bitowych.

Należy podkreślić, że zależności podane w rozdz. 2 mogą być stosowane tylko do obliczania wartości funkcji termodynamicznych. Wykorzystanie tych zależności do obliczenia pochodnej funkcji termodynamicznej lub do obliczenia jej całki jest niewskazane. Do tego celu należy przeprowadzić aproksymację wykorzystując funkcje sklepane.

```

SUBROUTINE SAT(T,P,Z,KTORY,IDRUK)
C PARAMETRY TERMODYNAMICZNE FREONU R12 NA KRZYWEJ GRANICZNEJ
C KTORY=1 - ARGUMENTEM JEST TEMP. W DEG. C
C KTORY=2 - ARGUMENTEM JEST CISNIENIE W BARACH
C IDRUK=#0 - BEZ WYDRUKOW
C IDRUK#0 - DRUKUJE WYNIKI
DIMENSION Z(6)
C Z - WEKTOR WYNIKOW. KOLEJNE WSPOLRZEDNE TO:
C V1, V2, H1, H2, S1, S2
DIMENSION X(7,8),N(6)
DATA N/4HV1 =,4HV2 =,4HH1 =,4HH2 =,4HS1 =,4HS2 =/
DATA X/
1.308316E1, .1013762, .1254253E-2, .652491E-5,
2.8664985E-8, .3134208E-11, .2165431E-12,
3.1396876E1, -.3275718E-2, -.1021901E-4, .4127243E-8,
4.1003602E-8, -.6307628E-11, -.1127693E-12,
5.1661671E2, .6217355, .9914987E-2, .2631372E-5,
6-.9077718E-6, .62474E-8, .1059215E-9,
7.3999131E3, .9546037, .1059386E-2, -.2509887E-5,
8-.5538099E-7, .6557992E-9, .8104677E-11,
9.5530279E3, .4423624, -.1096259E-2, -.2265962E-5,
A.953522E-7, -.7048767E-9, -.1137109E-10,
1.399978E1, .3464083E-2, -.305186E-5, .5083378E-9,
2-.1499216E-9, .1777472E-11, .1983532E-13,
3.4560199E1, -.4493161E-3, .3814488E-5, -.3653022E-7,
4.4095193E-9, -.2454206E-11, -.2678773E-13,
5-.6846479E-3, .9765277E-1, -.4239414E1, -.3789244E2,
6.1195955E2, -.4288231, .5722145E-2/
DATA TMIN,TMAX,PMIN,PMAX/-70., 105.,1223, 36.49/
IF(KTORY.NE.1) GO TO 1
IF(T.LT.TMIN.OR.T.GT.TMAX) GO TO 5
P=X(1,1)+T*(X(2,1)+T*(X(3,1)+T*(X(4,1)+T*(X(5,1)
1+T*(X(6,1)+T*(X(7,1))))))
GO TO 2
1 CONTINUE
IF(P.IT.PMIN.OR.P.GT.PMAX) GO TO 6
T=((X(1,8)/P+X(2,8))/P+X(3,8))/P+X(4,8)+
1P*(X(5,8)+P*(X(6,8)+P*(X(7,8))))
2 CONTINUE
DO 3 I=2,7
R=X(1,I)+T*(X(2,I)+T*(X(3,I)+T*(X(4,I)+T*(X(5,I)+
1T*(X(6,I)+T*(X(7,I))))))
IF(I.IT.4) R=1./R
Z(I-1)=R
3 CONTINUE
IF(IDRUK.EQ.0) GO TO 7
PRINT 4,T,P,(N(I),Z(I),I=1,6)
4 FORMAT(1H0,5X,4HT = ,F6.1,5HDEG.C,2X,4HP = ,
1E14.4,3HBAR/1H0,5X,6(A4,E14.4))
GO TO 7
5 PRINT 8,TMIN,T,TMAX
8 FORMAT(10X,5HBLAD ,F6.0,4H.GE.,F9.2,4H.LE.,F6.0,
15HDEG.C)
GO TO 7
6 PRINT 9,PMIN,P,PMAX
9 FORMAT(10X,5HBLAD ,E14.4,4H.GE.,E14.4,4H.LE.,
1E14.4,3HBAR)
7 RETURN
END

```

BIBLIOGRAFIA

- [1] I.I. Perelsztejn, E.B. Paruszyn: Tiermodinamiczeskije i tieplofiziczeskije swojstwa roboczich wieszczestw chołodilnych maszin i tiepłowych nasosow. Moskwa, Legkaja i puszczewaja promyszlenost 1984.
- [2] Å. Björek, G. Dahlquist: Metody numeryczne. PWN, Warszawa 1983.
- [3] G.E. Forsythe: Generation and use of orthogonal polynomials for data-fitting with a digital computer. J. SIAM, 5(1957).
- [4] J. Sado: Wyznaczanie parametrów fizycznych, transportowych i spektralnych plazmy niskotemperaturowej. Arch. Termod., 3(1982).

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И ФУНКЦИИ ФРЕОНА R12
НА ГРАНИЧНОЙ КРИВОЙ

К р а т к о е с о д е р ж а н и е

В работе приводятся аппроксимирующие функции для фреона R12, которые дают возможность вычислить давление насыщения p , а также таких параметров, как t , q' , q'' , h' , h'' , s' , s'' для заданной температуры насыщения. Определяются также функции, которые для аргумента p определяют параметры: t , q' , q'' , h' , h'' , s' , s'' . Приводится процедура, составленная на языке ФОРТРАН IV, для вычисления вышеуказанных термодинамических функций. Возможности осуществления процедуры ограничиваются пределами: $t \in \langle -70^\circ\text{C}; 105^\circ\text{C} \rangle$ и $p \in \langle 0,01223 \text{ МПа}; 3,649 \text{ МПа} \rangle$.

THERMODYNAMIC FUNCTIONS AND PARAMETERS OF FREON-12
ON SATURATED LINE

Summary

In this paper the approximate formulae for calculation of saturation pressure - p and q' , q'' , h' , h'' , s' , s'' as a function of saturation temperature are found. In similar manner the approximate formulae for calculation of t , q' , q'' , h' , h'' , s' , s'' as a function of p are derived. The computer subroutine in Fortran IV for all above-mentioned thermodynamic functions and parameters was written. The operating range of this subroutine is in the ranges $t \in \langle -70^\circ\text{C}; 105^\circ\text{C} \rangle$ and $p \in \langle 0,01223 \text{ MPa}; 3,649 \text{ MPa} \rangle$.