

11/59

Teploenergetika
(1963) 8, S. 61/64

Zagoručenko, V.A., Kand. d. techn. Wiss., Kazavčinskij, Ja.Z., Dr. d. techn. Wiss. (Odesskij institut inženerov morskogo flota) (Marine-Ingenieurinstitut Odessa):

ENTWURF VON "RAHMENTAFELN" FÜR WASSERDAMPF, DIE NACH EINER ZUSTANDSGLEICHUNG ERRECHNET SIND

Als ein Entwurf von "Rahmentafeln" für Wasserdampf werden Tabellen der spezifischen Volumina, der Enthalpie und der (isobaren) Wärmekapazität bei gleichem Druck vorgeschlagen, die völlig nach einer Zustandsgleichung bis 1 000 °C und 1 000 Bar errechnet wurden. Die Zustandsgleichung wurde auf der Grundlage von thermischen Versuchsdaten aufgestellt und beschreibt mit der notwendigen Genauigkeit sowohl die thermischen als auch die kalorischen Eigenschaften von Wasserdampf.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Zustandsgleichung für Wasserdampf angeführt, nach der die vorgeschlagenen "Rahmentafeln" berechnet wurden. Die Gleichung wurde auf der Basis von Versuchsdaten für die thermischen Eigenschaften in Übereinstimmung mit dem allgemeinen Verfahren [L. 1] aufgestellt.

Die p-v-t-Versuchsdaten wurden ausgewertet und in Übereinstimmung miteinander gebracht [L. 2 - 10]. Darüber hinaus wurden die Werte der spezifischen Volumina für Wasserdampf an der Sättigungskurve und die Werte von [L. 11] benutzt.

Die Übereinstimmung des Versuchsmaterials wurde in dimensionslosen Koordinaten nach Isothermen $\sigma = f(\omega)$ und nach Isochoren $\sigma = f(t)$ durchgeführt, wobei $\sigma = pv/RT_k$ und $\omega = v_k/v$. Dabei wurde angenommen: $T_k = 647,31$ °K und $R = 47,060$. Infolge bedeutender Divergenzen bei den Werten für v_k bei verschiedenen Wissenschaftlern wurde

von uns ein Verfahren angewandt, das es ermöglichte, sowohl v_k als auch p_k zu präzisieren, indem man das Vorhandensein genügend zuverlässiger Daten auf der kritischen Isotherme benutzt. Dieses Verfahren geht von der Forderung aus, daß die Bedingungen des kritischen Punktes erfüllt sind; infolgedessen muß in den Koordinaten σ und $\varrho = \frac{1}{v}$ im kritischen Punkt die Gleichung

(1)

eingehalten werden.

Nach den Versuchsdaten [L. 2 -5, 6, 9, 10] sowie nach den p-v-t - "Rahmentafel"-Werten an der Sättigungslinie wurden in der Nähe der kritischen Dichte $p v / RT_k = f(t)$ Isochoren errichtet, von denen die Werte $p v / RT_k$ bei $t = 374,15^\circ \text{C}$ abgenommen wurden.

Es wurden auf der kritischen Isotherme die Ableitungen $\frac{d\sigma}{d\varrho}$ in 20 Punkten im Bereich $v = 2,9 - 3,4 \text{ cm}^3/\text{g}$ gefunden und in Abhängigkeit von der Dichte ϱ die Kurve $-\varrho \frac{d\sigma}{d\varrho} = \varphi(\varrho)$ konstruiert. Ihr Schnittpunkt mit der kritischen Isotherme $\sigma = f(\varrho)$ erfüllt die Gleichung (1). Ihr entsprechen die von uns als kritische Werte angenommenen Werte $v = 3,23 \text{ cm}^3/\text{g}$ und $p = 225,55 \text{ kg/cm}^2$. Die kritische Zahl ist $k = p_k v_k / RT_k = 0,239157$.

Wie oben aufgezeigt wurde, erfolgte der Ausgleich der thermischen Daten zuerst nach Isothermen (40 Isothermen von 200 bis 900°C). Auf jeder ausgeglichenen Isotherme wurden im Bereich der reduzierten Dichten $\omega = 0 - 2,0$ die Werte für σ auf 40 Isochoren abgenommen und die Werte $\sigma - \tau$ errechnet, wobei $\tau = \frac{T}{T_k}$ ist.

Weiter wurde auch graphisch ein Ausgleich nach Isochoren $\sigma - \tau = f(t)$ durchgeführt. Dabei berücksichtigte (berechnete) man die jeder Isochore ω entsprechenden Werte σ und τ auf der Sättigungskurve.

Durch die gegenseitige Übereinstimmung des Versuchsmaterials gewann man eine Tabelle von Werten für σ auf den Isothermen 200,

250, 300, 350, 374, 15, 400, 425, 450 und weiter alle 50 °C bis zu 900 °C für 40 Isochoren von $\omega = 0,05$ bis $\omega = 2,0$ (alle 0,05). Die Skala der Werte $\sigma = f(\omega, t)$ wurde bei der Aufstellung der Zustandsgleichung benutzt.

Nach sämtlichen Versuchsdaten im Bereich kleiner Dichten sowie den "Rahmentafel"-Werten der spezifischen Volumina auf der Sättigungskurve bei niedrigen Temperaturen wurden die Werte des zweiten Virialkoeffizienten im Temperaturbereich 0 - 900 °C bestimmt und ausgeglichen.

Die Werte des zweiten Virialkoeffizienten wurden von uns mit gro-
ßer Genauigkeit durch die Gleichung

(2)

beschrieben.

Im folgenden werden die analytischen Ausdrücke für ψ einzeln für die Temperaturen 0 - 374,15 °C und 374,15 - 1 000 °C angeführt.

Die Zustandsgleichung hat folgendes Aussehen:

(3)

wobei $\alpha_0, \alpha_1, \beta$ und γ Funktionen sind, die von der reduzierten Dichte ω abhängen,

ψ und φ Funktionen sind, die von der Temperatur abhängen.

In Übereinstimmung mit [L. 1] wurden als Temperaturfunktionen ψ und φ jeweils der nichtlineare Teil des zweiten Virialkoeffizienten (mit einer Genauigkeit bis zum konstanten Faktor) und der nichtlineare Teil der Isochore $\omega = 0,5$ angenommen.

Damit die Temperaturfunktion ψ den "Rahmentafel"-Werten auf der Sättigungskurve (bei niedrigen Temperaturen) besser entspricht, ist sie - wie schon oben aufgezeigt wurde - analytisch durch zwei Ausdrücke dargestellt, die sich im Bereich der kritischen Temperatur gegenseitig decken. Die Koeffizienten ψ und φ werden unten

angegeben.

Zur Ermittlung der Volumenfunktionen α_0 , α_1 , β und γ wurden die Gleichungen der vier Basisisothermen (374,15, 450, 550 und 750 °C) in Form von Polynomen der 8-ten Potenz (8-ten Grads) von der reduzierten Dichte ω vorläufig aufgestellt:

(4)

Die Koeffizienten B, C, ..., H der Basisisothermen führen wir in Tabelle 1 auf.

Die aufgestellten Gleichungen der Isothermen entsprechen mit einer Genauigkeit bis zu 0,04 % den ausgeglichenen Werten der Stütztabelle $\sigma = f(\omega, t)$.

Die Gleichung der kritischen Isotherme entspricht den angenommenen Werten der kritischen Parameter und erfüllt die kritischen Bedingungen, d.h. bei $\omega = 1$ ist $\sigma = k$, $\frac{d\sigma}{d\omega} = -k$ und $\frac{d^2\sigma}{d\omega^2} = 2k$, wobei $k = p_k v_k / RT_k = 0,239157$.

Haben wir die Gleichungen der Basisisothermen in der Form

(5)

geschrieben und setzen wir in das System (5) die Werte für τ_i und die ihnen entsprechenden Werte für ψ_i und φ_i ein, dann können wir das System (5) hinsichtlich α_0 , α_1 , β und γ lösen indem wir sie durch σ_1 , σ_2 , σ_3 und σ_4 ausdrücken.

Nach Substitution der Ausdrücke (4) für σ_i in der expliziten analytischen Form erhalten wir endgültig die Volumenfunktionen der Gleichung (3).

; (a)

; (b)

; <c>

. <d>

Die Temperaturfunktionen der Zustandsgleichung haben folgendes Aussehen:

für die Temperaturen 0 - 374,15 °C

; <e>

für die Temperaturen 374,15 - 1 000 °C

; <f>

für die Temperaturen 0 - 1 000 °C

. <g>

Die Zustandsgleichung gilt in dem gesamten einphasigen Bereich - einschließlich der Sättigungskurve - im Bereich der reduzierten Dichten $\omega = 0 - 2,0$.

In den Tabellen 2 - 4 sind die Werte der spezifischen Volumina, der Enthalpie und der Wärmekapazität c_p angegeben, die nach der vorgeschlagenen Zustandsgleichung für Wasserdampf bis zu 1 000 °C und 1 000 Bar berechnet wurden. Bei den Berechnungen wurde angenommen: 1 Bar = 1,019716 kp/cm², 1 int. cal = 4,18676 abs. J .

Bei der Berechnung der Enthalpie und der Wärmekapazität c_p wurden die erforderlichen Werte c_p^0 und i^0 nach der Gleichung von Keenan und Keyes ermittelt, die mit großer Genauigkeit die zuverlässigsten Werte von Friedman und Haar [L. 12] beschreibt.

Die Gleichungen für c_p^0 und i^0 sehen folgendermaßen aus:

, <h>

. <i>

Ein detaillierter Vergleich der nach der Zustandsgleichung errechneten Werte für v , i , c_p mit den neuesten Versuchswerten ist in einer gesonderten Arbeit dargelegt. -

Erläuterungen der Tabellen

T a f e l 1

T a f e l 2

Spezifische Volumina von Wasserdampf, v , cm^3/g

Temperatur t , $^{\circ}\text{C}$

T a f e l 3

Enthalpie von Wasserdampf, i , J/g

Temperatur t , $^{\circ}\text{C}$

T a f e l 4

Wärmekapazität c_p für Wasserdampf, J/g grad

Temperatur t , $^{\circ}\text{C}$

Literatur

- 1 Kazavčinskij, Ja. Z. "Teploenergetika", No 11, 1960
- 2 Timrot, D.L. Stat'ja v sbornike " Par vysokogo davlenija v energetike" (Aufsatz in dem Sammelband 'Hochdruck-Dampf in der Energetik'), Gosenergoizdat, 1950
- 3 Kirillin, V.A.
Rumjancev, L.I. Trudy MEI (Arbeiten des Moskauer Instituts für Energetik), vyp. X, 1953
- 4 Kirillin, V.A.
Zubarev, V.N. "Teploenergetika", No 11, 1955
- 5 Kirillin, V.A.,
Ulybin, S.A. "Teploenergetika", No 4, 1958; No 1, No 8, 1959
- 6 Rivkin, S.L.,
Achundov, T.S. "Teploenergetika", No 1, 1962
- 7 Vukalovič, M.P.,
Zubarev, V.N.,
Aleksandrov, A.A. "Teploenergetika", No 10, 1961; No 1, 1962
- 8 Holser, W.T.
Kennedy, G.C. Doklad na soveščanii Meždunarodnogo koordinacionogo komiteta, 1958 (Bericht auf der Konferenz des Internationalen Koordinationskomitees, 1958)
- 9 Keyes, F.G.,
Smith, L.B.,
Gerry, N.T. Proc. Amer. Acad. Arts a. Sci., 70, 319, 1936
- 10 Smith, L.B.,
Keyes, G.F. Mech. Eng., 53, 135, 1931; 54, 123, 1932
- 11 Osborne, N.S.,
Stimson, H.F.,
Ginnings, D.C. J. Res. Nat. Bur. Stand., 18, 389, 1937; 23, 197, 1939
- 12 Friedman, A.S.,
Haar, L. J. Chem. Phys., 22, 2051, 1954

ПРОЕКТ СКЕЛЕТНЫХ ТАБЛИЦ ПО ВОДЯНОМУ ПАРУ, РАССЧИТАННЫХ ПО УРАВНЕНИЮ СОСТОЯНИЯ

Канд. техн. наук В. А. ЗАГОРУЧЕНКО, доктор техн. наук Я. З. КАЗАВЧИНСКИЙ

Одесский институт инженеров морского флота

В настоящей работе приводится уравнение состояния для водяного пара, по которому рассчитаны предлагаемые скелетные таблицы. Уравнение составлено на основании опытных данных по термическим свойствам в соответствии с общим методом [Л. 1].

Обработке и взаимному согласованию подвергались экспериментальные данные p, v, t [Л. 2—10]. Кроме того, использовались значения удельных объемов водяного пара на кривой насыщения и данные [Л. 11].

Согласование экспериментального материала проводилось в безразмерных координатах по изотермам $\sigma = f(\omega)$ и по изохорам $\sigma = f(t)$, где $\sigma = pv/RT_h$ и $\omega = v_h/v$. При этом принято: $T_h = 647,31^\circ \text{C}$ и $R = 47,060$. В связи со значительным расхождением в значениях v_h у разных исследователей нами был применен прием, позволивший уточнить как v_h , так и p_h , пользуясь наличием достаточно достоверных данных на критической изотерме. Этот прием исходит из требования удовлетворения условий критической точки, вследствие чего в координатах σ и $\rho = \frac{1}{v}$ в критической точке должно соблюдаться равенство

$$\rho \cdot \left(\frac{d\sigma}{d\rho} \right)_{\omega=1} = -\sigma. \quad (1)$$

По экспериментальным данным [Л. 2—5, 6, 9, 10], а также скелетным данным p, v, t на линии насыщения были построены изохоры вблизи критической плотности $pv/RT_h = f(t)$, с которых снимались значения pv/RT_h при $t = 374,15^\circ \text{C}$.

Были найдены на критической изотерме производные $\frac{d\sigma}{d\rho}$ в 20 точках в интервале $v = 2,9 - 3,4 \text{ см}^3/\text{г}$ и была построена в зависимости от плотности ρ кривая $-\rho \frac{d\sigma}{d\rho} = \varphi(\rho)$. Точка ее пересечения с критической изотермой $\sigma = f(\rho)$ удовлетворяет равенству (1). Ей соответствуют значения $v = 3,23 \text{ см}^3/\text{г}$ и $\rho = 225,55 \text{ кг}/\text{см}^3$, принятые нами в качестве критических. Критическое число $k = p_h v_h / RT_h = 0,239157$.

Как указывалось выше, сглаживание термических данных производилось первоначально по изотермам (40 изотерм от 200 до 900°С). На каждой сглаженной изотерме в интервале приведенных плотностей $\omega = 0 - 2,0$ снимались значения σ на 40 изохорах и вычислялись значения $\sigma - \tau$, где $\tau = \frac{T}{T_h}$. Далее осуществлялось также графически сглаживание по изохорам $\sigma - \tau = f(t)$. При этом

Предлагаются в качестве проекта скелетных таблиц по водяному пару таблицы удельных объемов, энтальпий и изобарных теплоемкостей, целиком рассчитанные по уравнению состояния до 1000°С и 1000бар. Уравнение составлено на основании экспериментальных термических данных и описывает с необходимой точностью не только термические, но также и калорические свойства водяного пара.

учитывались соответствующие каждой изохоре ω значения σ и τ на кривой насыщения.

В результате взаимного согласования экспериментального материала была получена сетка значений σ на изотермах 200, 250, 300, 350, 374, 15, 400, 425, 450 и далее через 50°С до 900°С для 40 изохор от $\omega = 0,05$

до $\omega = 2,0$ (через 0,05). Сетка значений $\sigma = f(\omega, t)$ использовалась при составлении уравнения состояния.

По всем экспериментальным данным в области малых плотностей, а также скелетным значениям удельных объемов на кривой насыщения при низких температурах были определены и сглажены значения второго вириального коэффициента в интервале температур 0—900°С.

Значения второго вириального коэффициента с высокой точностью описаны нами уравнением

$$B(\omega) = 0,339924 + 0,380321 \tau - 2,136245 \psi. \quad (2)$$

Ниже приводятся аналитические выражения ψ отдельно для температур 0—374,15°С и 374,15—1000°С.

Уравнение состояния имеет вид:

$$\sigma = \alpha_0 + \alpha_1 \tau + \beta \psi + \gamma \varphi, \quad (3)$$

где $\alpha_0, \alpha_1, \beta$ и γ — функции, зависящие от приведенной плотности ω ;

ψ и φ — функции, зависящие от температуры.

В соответствии с [Л. 1] в качестве температурных функций ψ и φ приняты соответственно криволинейная часть второго вириального коэффициента (с точностью до постоянного множителя) и криволинейная часть изохоры $\omega = 0,5$.

Таблица 1

	374,15	450	550	750
τ	1	1,117177	1,271663	1,580634
B	-1,416000	-1,161752	-0,914967	-0,555939
C	+0,084606	+0,214274	+0,293400	+0,279700
D	+2,373410	+1,351389	+0,563071	-0,064066
E	-3,715738	-2,350818	-1,087928	+0,478241
F	+3,047864	+2,149729	+1,082760	-0,953926
G	-1,506709	-1,163687	-0,618466	+0,866570
I	+0,422594	+0,348050	+0,189603	-0,367196
H	-0,050780	-0,043600	-0,023616	+0,059377

Таблица 2. Удельные объемы водяного пара v , см³/г

P, бар	Температура t, °C																					
	100	150	200	250	300	350	375	400	425	450	475	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1 000
1	1 594	1 936	2 171	2 406	2 638	2 871	2 986	3 103	3 218	3 334	3 450	3 565	3 706	4 028	4 259	4 490	4 721	4 951	5 183	5 413	5 614	5 875
5			424,3	474,0	522,5	570,0	593,7	617,2	640,7	664,1	687,5	710,8	757,4	804,0	850,6	896,8	943,1	989,6	1 036	1 082	1 129	1 175
10			205,8	232,3	257,7	282,3	306,5	330,5	354,4	378,2	402,0	425,8	471,6	517,4	563,2	609,0	654,8	700,6	746,4	792,2	838,0	883,8
25			86,57	101,6	116,6	131,6	146,6	161,6	176,6	191,6	206,6	221,6	241,6	261,6	281,6	301,6	321,6	341,6	361,6	381,6	401,6	421,6
50																						
75																						
100																						
125																						
150																						
175																						
200																						
225																						
250																						
275																						
300																						
350																						
400																						
450																						
500																						
550																						
600																						
650																						
700																						
750																						
800																						
850																						
900																						
950																						
1 000																						

Таблица 3. Энтальпии водяного пара i , дж/г

P, бар	Температура t, °C																					
	100	150	200	250	300	350	375	400	425	450	475	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1 000
0	2688,5	2768,5	2879,8	2977,4	3076,6	3177,3	3228,2	3279,5	3331,3	3383,4	3436,0	3489,0	3536,3	3586,3	3636,3	3687,1	3737,9	3788,7	3839,5	3890,3	3941,1	3991,9
1			2875,0	2973,8	3073,9	3175,3	3226,4	3277,7	3329,1	3380,5	3432,0	3483,4	3534,9	3586,3	3637,7	3689,1	3740,5	3791,9	3843,3	3894,7	3946,1	3997,5
5			2854,5	2953,2	3053,0	3157,1	3210,4	3263,7	3317,1	3370,5	3423,9	3477,3	3530,7	3584,1	3637,5	3690,9	3744,3	3797,7	3851,1	3904,5	3957,9	4011,3
10			2827,6	2877,8	2918,7	2969,3	3020,0	3070,7	3121,4	3172,1	3222,8	3273,5	3324,2	3374,9	3425,6	3476,3	3527,0	3577,7	3628,4	3679,1	3729,8	3780,5
25																						
50																						
75																						
100																						
125																						
150																						
175																						
200																						
225																						
250																						
275																						
300																						
350																						
400																						
450																						
500																						
550																						
600																						
650																						
700																						
750																						
800																						
850																						
900																						
950																						
1 000																						

Таблица 4. Теплоемкости c_p водяного пара, дж/г·град

P, бар	Температура t, °C																						
	100	150	200	250	300	350	375	400	425	450	475	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1 000	
0	1,888	1,913	1,938	1,968	1,997	2,031	2,043	2,060	2,076	2,093	2,110	2,127	2,161	2,198	2,232	2,269	2,303	2,340	2,374	2,412	2,445	2,483	2,483
1	2,018	1,980	1,972	1,989	2,014	2,039	2,068	2,081	2,093	2,106	2,119	2,135	2,165	2,202	2,236	2,273	2,307	2,340	2,374	2,412	2,445	2,483	2,483
5			2,123	2,061	2,068	2,085	2,105	2,118	2,131	2,144	2,148	2,148	2,190	2,219	2,248	2,278	2,311	2,344	2,378	2,416	2,448	2,485	2,485
10			2,332	2,202	2,148	2,137	2,131	2,135	2,144	2,155	2,159	2,165	2,190	2,219	2,248	2,278	2,315	2,349	2,382	2,420	2,453	2,491	2,491
25				2,671	2,416	2,311	2,265	2,240	2,219	2,219	2,219	2,219	2,232	2,252	2,278	2,307	2,336	2,370	2,403	2,433	2,462	2,499	2,499
50					3,178	2,688	2,537	2,458	2,403	2,370	2,345	2,324	2,311	2,315	2,324	2,345	2,365	2,395	2,420	2,453	2,483	2,516	2,516
75					4,480	3,207	2,885	2,784	2,734	2,687	2,648	2,611	2,583	2,562	2,578	2,598	2,618	2,648	2,673	2,707	2,740	2,772	2,772
100						3,998	3,354	3,061	2,860	2,734	2,638	2,570	2,483	2,445	2,438	2,438	2,433	2,433	2,433	2,433	2,433	2,433	2,433
150						5,351	4,019	3,492	3,165	2,964	2,818	2,713	2,583	2,483	2,451	2,451	2,451	2,451	2,451	2,451	2,451	2,451	2,451
175						6,583	5,053	4,070	3,555	3,236	3,022	2,872	2,692	2,516	2,537	2,516	2,504	2,504	2,504	2,504	2,504	2,504	2,504
200							6,971	4,894	4,095	3,550	3,257	3,052	2,805	2,675	2,600	2,562	2,541	2,542	2,542	2,542	2,542	2,542	2,542
225							12,10	6,163	4,068	3,832	3,525	3,253	2,831	2,663	2,608	2,608	2,579	2,542	2,542	2,542	2,542	2,542	2,542
250							102,1	8,340	5,514	4,425	3,843	3,479	3,061	2,736	2,658	2,617	2,600	2,600	2,600	2,600	2,600	2,600	2,600
275							13,66	12,95	8,605	5,007	4,204	3,726	3,199	2,793	2,709	2,654	2,633	2,633	2,633	2,633	2,633	2,633	2,633
300							9,960	24,24	8,407	5,736	4,622	4,002	3,349	3,010	2,851	2,759	2,696	2,666	2,666	2,666	2,666	2,666	2,666
350							8,449	24,17	10,89	6,615	4,308	3,517	3,517	3,140	2,931	2,809	2,734	2,606	2,675	2,667	2,667	2,667	2,667
400							7,147	11,83	15,42	8,955	6,250	5,016	3,872	3,358	3,077	2,918	2,818	2,763	2,736	2,713	2,705	2,705	2,705
450							6,569	8,164	12,56	10,92	7,579	5,824	4,258	3,588	3,232	3,027	2,901	2,826	2,780	2,755	2,742	2,742	2,742
500								7,260	9,768	10,67	8,617	6,636	4,656	3,837	3,387	3,140	2,980	2,897	2,834	2,801	2,780	2,772	2,772
550									8,135	9,475	8,838	7,243	5,058	4,065	3,546	3,253	3,073	2,900	2,869	2,847	2,818	2,805	2,805
600									7,189	8,361	8,496	7,503	5,422	4,300	3,705	3,366	3,157	3,027	2,994	2,969	2,939	2,929	2,929
650									6,598	7,507	7,817	7,448	5,702	4,518	3,860	3,479	3,245	3,094	2,994	2,935	2,897	2,868	2,868
700									5,954	6,414	6,300	6,222	4,882	4,110	4,007	3,588	3,324	3,161	3,098	2,977	2,927	2,901	2,901
750									5,782	6,079	6,494	6,937	5,962	4,141	4,141	3,693	3,408	3,224	3,098	3,019	2,964	2,931	2,931
800									5,677	6,494	6,159	6,376	5,912	5,062	4,354	3,877	3,555	3,345	3,199	3,061	2,998	2,960	2,960
850										5,644	6,159	6,376	5,912	5,062	4,354	3,877	3,555	3,345	3,199	3,061	2,998	2,960	2,960
900										5,610	5,887	6,113	5,832	5,104	4,438	3,948	3,622	3,403	3,245	3,140	3,065	3,010	3,010
950										5,413	5,407	5,874	5,710	5,116	4,496	4,023	3,654	3,434	3,291	3,178	3,098	3,048	3,048
1 000										5,333	5,359	5,493	5,635	5,112	4,538	4,076	3,730	3,504	3,333	3,215	3,132	3,073	3,073
										5,333	5,359	5,493	5,635	5,112	4,538	4,076	3,730	3,504	3,333	3,215	3,132	3,073	3,073

Для лучшего удовлетворения скелетным данным на кривой насыщения (при низких температурах) температурная функция ψ , как уже указано ранее, представлена аналитически двумя выражениями, которые взаимно перекрываются в районе критической температуры. Коэффициенты ψ и ϕ даны ниже.

Для определения объемных функций $\alpha_0, \alpha_1, \beta$ и γ предварительно составлялись уравнения четырех базисных изотерм (374,15; 450; 550 и 750° C) в форме полиномов 8-й степени от приведенной плотности ω :

$$\sigma_i = \tau_i + B_i \omega + C_i \omega^2 + \dots + H_i \omega^8. \quad (4)$$

Коэффициенты B, C, \dots, H базисных изотерм приводим в табл. 1.

Составленные уравнения изотерм с точностью до 0,04% удовлетворяют сглаженным значениям опорной таблицы $\sigma = f(\omega, t)$.

Уравнение критической изотермы удовлетворяет принятым значениям критических параметров и критическим условиям, т. е. при $\omega = 1 \sigma = k, \frac{d\sigma}{d\omega} = -k$ и $\frac{d^2\sigma}{d\omega^2} = 2k$, где $k = p_h v_h / RT_h = 0,239157$.

Записав уравнения базисных изотерм в форме

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \alpha_0 + \alpha_1 \tau_1 + \beta \psi_1 + \gamma \varphi_1, \\ \sigma_2 &= \alpha_0 + \alpha_1 \tau_2 + \beta \psi_2 + \gamma \varphi_2, \\ \sigma_3 &= \alpha_0 + \alpha_1 \tau_3 + \beta \psi_3 + \gamma \varphi_3, \\ \sigma_4 &= \alpha_0 + \alpha_1 \tau_4 + \beta \psi_4 + \gamma \varphi_4. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

и подставляя в систему (5) значения τ_i и соответствующие им значения ψ_i и φ_i , решаем систему (5) относительно $\alpha_0, \alpha_1, \beta$ и γ , выражая их через $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ и σ_4 .

После подстановки выражений (4) для σ_i в явной аналитической форме получаем окончательно объемные функции уравнения (3).

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= 0,339924\omega + 1,619188\omega^2 - 9,338588\omega^3 + \\ &+ 2,090234\omega^4 + 1,891191\omega^5 + 2,738800\omega^6 - \\ &- 2,882319\omega^7 + 0,634763\omega^8; \\ \alpha_1 &= 1 + 0,380321\omega - 0,771176\omega^2 + 2,652828\omega^3 + \\ &+ 0,702238\omega^4 - 5,342643\omega^5 + 4,960672\omega^6 - \\ &- 1,944092\omega^7 + 0,289786\omega^8; \\ \beta &= -2,136245\omega + 0,526624\omega^2 + 5,114678\omega^3 - \\ &- 0,784243\omega^4 + 9,751860\omega^5 - 19,358266\omega^6 + \\ &+ 11,192791\omega^7 - 2,064516\omega^8; \\ \gamma &= -1,290030\omega^2 + 3,944492\omega^3 - 5,723967\omega^4 - \\ &- 3,252544\omega^5 + 10,152085\omega^6 - \\ &- 5,943876\omega^7 + 1,089187\omega^8. \end{aligned}$$

Температурные функции уравнения состояния имеют вид: для температур 0 — 374,15° C

$$\phi = \frac{2,694352}{\tau} - \frac{5,475572}{\tau^2} + \frac{6,295692}{\tau^3} - \frac{3,139294}{\tau^4} + \frac{0,624822}{\tau^5};$$

для температур 374,15 — 1000° C

$$\psi = \frac{1,827047}{\tau} - \frac{1,670389}{\tau^2} + \frac{0,843842}{\tau^3};$$

для температур 0—1000°С

$$\varphi = \frac{0,858964}{\tau^2} + \frac{0,141036}{\tau^3}$$

Уравнение состояния справедливо во всей однофазной области, включая кривую насыщения, в интервале приведенных плотностей $\omega = 0-2,0$.

В табл. 2—4, даны значения удельных объемов, энтальпий и теплоемкостей c_p , рассчитанные по предлагаемому уравнению состояния для водяного пара до 1000°С и 1000 бар. При расчетах, принято: 1 бар = 1,019716 кг/см²; 1 инт. кал = 4,18676 абс. дж.

При вычислении энтальпий и теплоемкостей c_p необходимые значения c_p^0 и i^0 определялись по уравнению Кинана и Кейса, с высокой точностью описывающему наиболее достоверные данные Фридмана и Хаара [Л. 12].

Уравнения для c_p^0 и i^0 имеют вид:

$$c_p^0 = 1,48286 + 7,5805 \cdot 10^{-4} T + 46,174 \frac{1}{T}, \text{ дж/г} \cdot \text{град};$$

$$i_0 = 1808,92 + 1,48286 \cdot T + 3,79025 \cdot 10^{-4} T^2 + 106,3196 \lg T, \text{ дж/г}.$$

Подробное сравнение значений v , i , c_p , вычисленных по уравнению состояния, с новейшими экспериментальными данными дано в отдельной работе.

Литература

1. Я. З. Казавчинский. «Теплоэнергетика», № 11, 1960.
2. Д. Л. Тимрот. Статья в сборнике «Пар высокого давления в энергетике», Госэнергоиздат, 1950.
3. В. А. Кириллин, Л. И. Румянцев. Труды МЭИ, вып. X, 1953.
4. В. А. Кириллин, В. Н. Зубарев. «Теплоэнергетика», № 11, 1955.
5. В. А. Кириллин, С. А. Улыбин. «Теплоэнергетика», № 4, 1958; № 1, № 8, 1959.
6. С. Л. Ривкин, Т. С. Ахундов. «Теплоэнергетика» № 1, 1962.
7. М. П. Вукалович, В. Н. Зубарев, А. А. Александров. «Теплоэнергетика» № 10, 1961; № 1, 1962.
8. W. T. Holser, G. C. Kennedy. Доклад на совещании Международного координационного комитета, 1958.
9. F. G. Keyes, L. B. Smith, H. T. Gergg. Proc. Amer. Acad. Arts a. Sci., 70, 319, 1936.
10. L. B. Smith. F. G. Keyes. Mech. Eng., 53, 135, 1931; 54, 123, 1932.
11. N. S. Osborne, H. F. Stimson, D. C. Gittings. J. Res. Nat. Bur. Stand., 18, 389, 1937, 23, 197, 1939.
12. A. S. Friedman, L. Haar. J. Chem. Phys., 22, 2051, 1954.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА ПРЯМЫМ МЕТОДОМ ВДОЛЬ ЛИНИИ НАСЫЩЕНИЯ, ВКЛЮЧАЯ КРИТИЧЕСКУЮ ТОЧКУ

Доктор физико-матем. наук Х. И. АМИРХАНОВ,
канд. физико-матем. наук А. М. КЕРИМОВ
Дагестанский филиал АН СССР

В работах [Л. 1—3] были изложены результаты прямого определения теплоемкости при постоянном объеме воды и водяного пара по 20 изохорам в различных интервалах температур и давлений. В настоящей работе исследование теплоемкости проводилось в более широком интервале температур и давлений еще по 28 изохорам.

Точность эксперимента в 2—3%, достигнутая в работах [Л. 1—3], является недостаточной для выявления некоторых предполагаемых скрытых особенностей воды и водяного пара, не обнаруженных до настоящего времени вследствие, очевидно, небольшой степени точности предыдущих экспериментов. Исследование теплоемкости c_v с большой степенью точности особенно важно теперь, когда решением первого официального заседания Международного координационного комитета по свойствам воды и водяного пара предусматривается создание таблиц опорных значений термических и калорических величин до 1000 кг/см² и 800°С.

Вышеизложенное потребовало дальнейшего усовершенствования высокотемпературного адиабатного калориметра. С этой целью толщина внутрен-

Приводятся экспериментальные данные c_v вдоль линии насыщения, включая критическую точку. Дается сравнение с расчетными данными.

ней оболочки калориметра была уменьшена до 1 мм, а зазор между внутренней и внешней оболочками, куда засыпается порошкообразное пелупроводниковое вещество, до 1,5 мм. Это, как указывалось ранее [Л. 3, 4], вполне допустимо, несмотря на большие давления, создаваемые внутри калориметра, ввиду передачи давления через слой окиси меди наружной оболочке, теплоемкость которой не влияет на значение водяного эквивалента.

Таким путем теплоемкость калориметра была доведена до величины, в 7—8 раз меньшей теплоемкости исследованной жидкости, и тем самым увеличена точность эксперимента: по левой пограничной кривой до 0,5—1%, по правой до 1—2,5%. При этом соотношение, полученное между теплоемкостями исследуемой жидкости и калориметра, дало возможность проводить измерение теплоемкости c_v с минимально возможным температурным шагом в 0,08°С вблизи критической точки, что позволило подойти к линии перехода на 0,04°С.

Далее с целью выявления зависимости теплоемкости c_v от удельного объема, которая резко скачивается вблизи критической точки, шаг опреде-