

水及水蒸汽 的热力学性质表



水利电力出版社

全 苏 热 工 研 究 所

水及水蒸汽 的热力学性质表

刘 紀 聰譯

水 利 电 力 出 版 社

內 容 提 要

本表包括状态参数在 400 公斤/公分²及 750°C 以下的水和水蒸汽的热力学性质表, 以及粘度和热传导系数表。

编制表时, 利用了以捷尔任斯基命名的全苏热工研究所和莫斯科动力学院的新的实验资料。

为便利计算, 表末附有 is 、 ts 和 ti 曲线图, 以及超临界范围内温度间隔 1°C 的热焓详细表。

本表供设计和科研机关、电站和工厂的工程技术人员以及高等学校学生之用。

水及水蒸汽的热力学性质表是由科学技术博士 Д. Л. 吉姆洛特(第一版用至 300 公斤/公分²和 600°C 的各表)、科学技术副博士 С. Л. 雷符金和 А. М. 斯洛特(本版用至 400 公斤/公分²和 750°C 的各表)编制的。

导热率和粘度表是由科学技术博士 Н. Б. 华尔加伏契克编制的。

作者: 科学技术博士 Д. Л. 吉姆洛特

科学技术副博士 С. Л. 雷符金

科学技术副博士 А. М. 斯洛特

科学技术博士 Н. Б. 华尔加伏契克

ВТИ ТАБЛИЦЫ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА ГОСЭНЕРГОИЗДАТ МОСКВА 1958

水及水蒸汽的热力学性质表

根据苏联国立动力出版社1958年莫斯科增订第二版翻译

刘 纪 聪译

*

2140 R467

水利电力出版社出版(北京西郊科学路二里沟)

北京市书刊出版业营业许可出字第105号

水利电力出版社印刷厂排印

新华书店北京科技发行所发行 各地新华书店经售

*

787×1092 1/32开本 * 6%印张 * 154千字 * 定价(第10类)1.50元

1959年8月北京第1版

1959年8月北京第1次印刷(0001—2,570册)

目 录

緒言.....	2
I. 水蒸汽热力学性質表的編制.....	7
II. 水蒸汽的导热率.....	16
III. 水蒸汽的粘度.....	17
参考文献.....	20

采用的符号

表 I. 干饱和水蒸汽及在饱和綫上的水(按温度排列)

表 II. 干饱和水蒸汽及在饱和綫上的水(按压力排列)

表 III. 水及过热蒸汽

表 IV. 在超临界范圍內水蒸汽的焓

表 V. 过热蒸汽在定压下的真实比热

表 VI. 在饱和綫上水及水蒸汽的动力粘度及运动粘度

表 VII. 水蒸汽及水的动力粘度 $\mu \cdot 10^9$

表 VIII. 水的热傳导系数 λ

表 IX. 水蒸汽的热傳导系数 $\lambda \cdot 10^3$

附录: 水及水蒸汽的骨干表(1934年第三次国际蒸汽表會議上采用)

表 X. 饱和水及饱和水蒸汽的性質

表 XI. 水及过热水蒸汽的比容

表 XII. 水及过热水蒸汽的焓

緒 言

現代的水和水蒸汽熱力學性質表不是直接根據實驗數據來編制，就是根據國際水蒸汽會議採用的基干點表(也稱骨干表)來編制的。

骨干表是由各國研究者所獲得的實驗數據加以分析和綜合的結果。為了水蒸汽表的統一，骨干表中的每個數值，都帶有允許的偏差數(允差)。目前的骨干表是1934年第三次國際蒸汽性質會議所採用的(見附錄)。

比容骨干表，基本上是按照凱斯和斯密特的實驗數據〔文獻1和2〕編制的，他們研究水和水蒸汽在溫度 460°C 和壓力 360公斤/公分^2 以下的比容。即是說，在 400公斤/公分^2 等壓綫上水的比容，及在 500 和 550°C 等溫綫上蒸汽的比容，是用升插法得到而列入骨干表的。

編制焓值骨干表時，主要來源之一，是加伏里奇克和米斯科夫斯基(捷克斯洛伐克)的研究材料〔文獻3〕，他們用節流法，測定過當壓力達 250公斤/公分^2 、溫度 550°C 以及當壓力達 400公斤/公分^2 、溫度 500°C 時水蒸汽的焓。考慮到這些數據，科赫按照水和水蒸汽的比熱 C_p ，測定結果〔文獻5和6〕及蒸發潛熱測定結果〔文獻7〕，計算出了焓值〔文獻4〕。

許多國家用各種方法所進行的大量實驗研究，奠定了第三次國際會議上採用的飽和水 and 蒸汽的骨干表的基础。

這些總結到骨干表中的豐富的實驗資料，後來被基南和凱斯(美國)〔文獻8〕、科赫(德國)〔文獻9〕及卡蘭達爾和愛格爾頓(英國)利用來編制了水和水蒸汽的熱力學性質表〔文獻10〕。以後，卡蘭達爾和愛格爾頓對溫度達 600°C 及壓力達 225公斤/公分^2 用節流法直接測定焓所獲得的結果，也被利用在後來的編表工作中〔文獻11〕。

在1946年，吳卡諾維奇出版了蘇聯第一個水蒸汽表。

這個表在編制時，利用了水蒸汽的狀態方程式。這個方程式是由吳卡諾維奇和諾維柯夫的实际氣體理論擬定的。方程式中的常量，是按照骨干表中的數據計算出來的。長期以來，吳卡諾維奇表不只一次地再版，最近，在1955年還出了第五版〔文獻12〕。

上面曾經提到過，1934年的骨干表，對於高溫下的比容是用升插法建立的。第三次國際會議以前，對超臨界範圍的研究，同樣不夠精確。在此範圍內的基干點，少到難以可靠的插入水蒸汽的熱力學性質。

因此，全蘇熱工研究所在吉姆洛特領導下，建立了定壓下比熱(吉姆洛特、華爾加伏契克、雷符金及恰斯杜欣)及比容的實驗研究〔文獻13~15〕。這些研究的結果繪在圖1~4上。

全蘇熱工研究所的研究，肯定了這樣一個狀態參數範圍，在此範圍內，不同作者的水蒸汽表之間，允許有較大的差數。同時，對臨界範圍內水蒸汽比熱的極大值及比容特別進行過詳細的研究。

大卡/公斤·°C

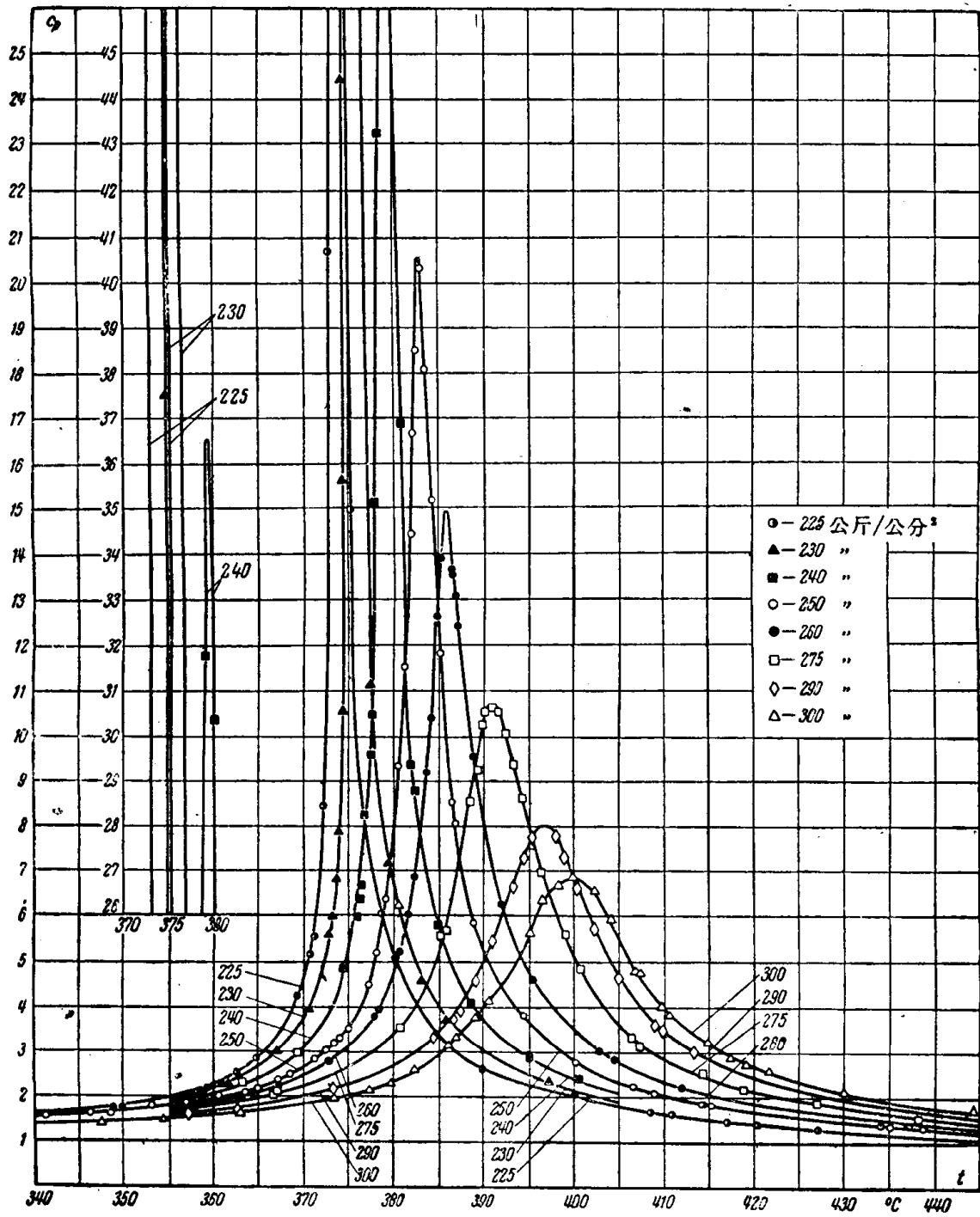


图 1 在临界及超临界范围内水蒸汽的比热(按照全苏热工研究所数据)

大卡/公斤·°C

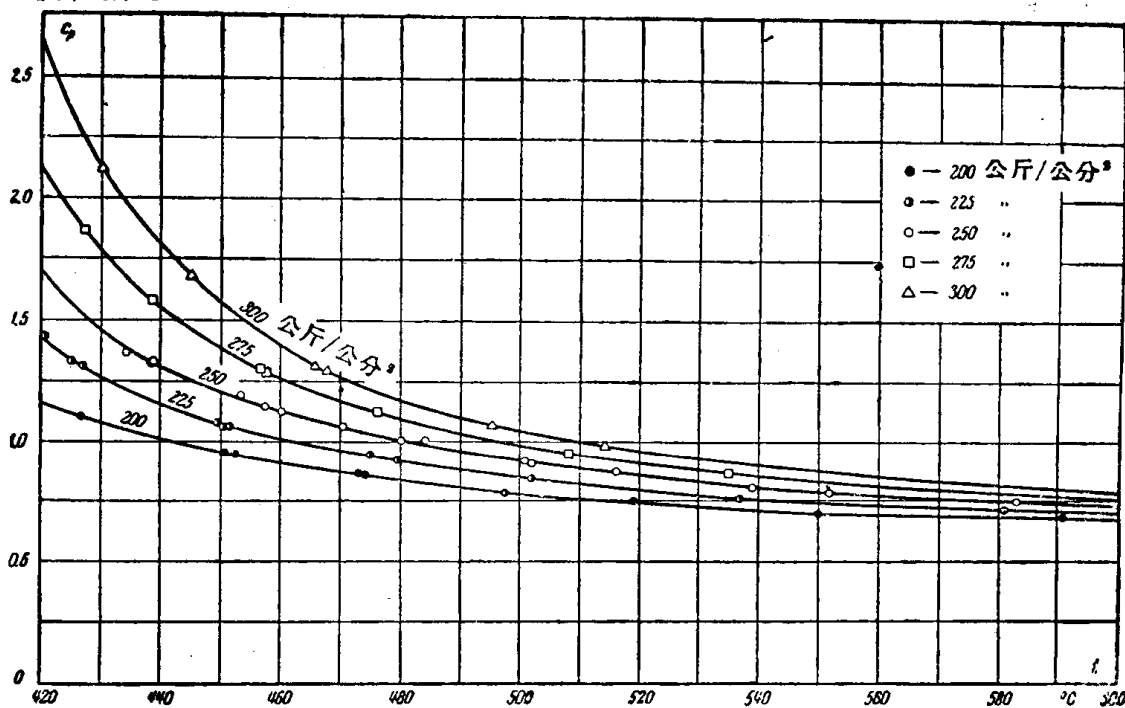


图 2 高参数水蒸汽的比热(按照全苏热工研究所数据)

公斤/公分³

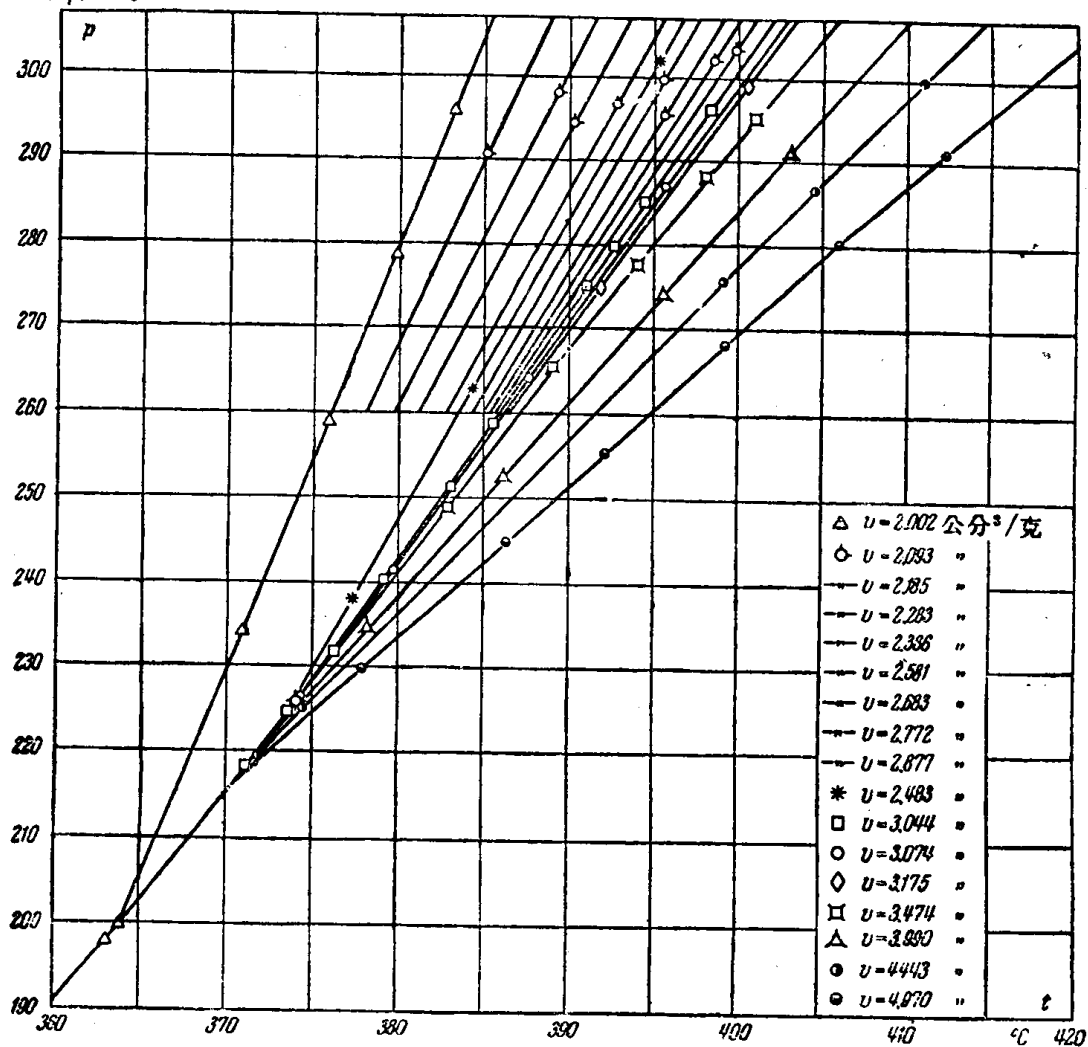


图 3 在临界及超临界范围内的水蒸汽的比容(按照全苏热工研究所数据)

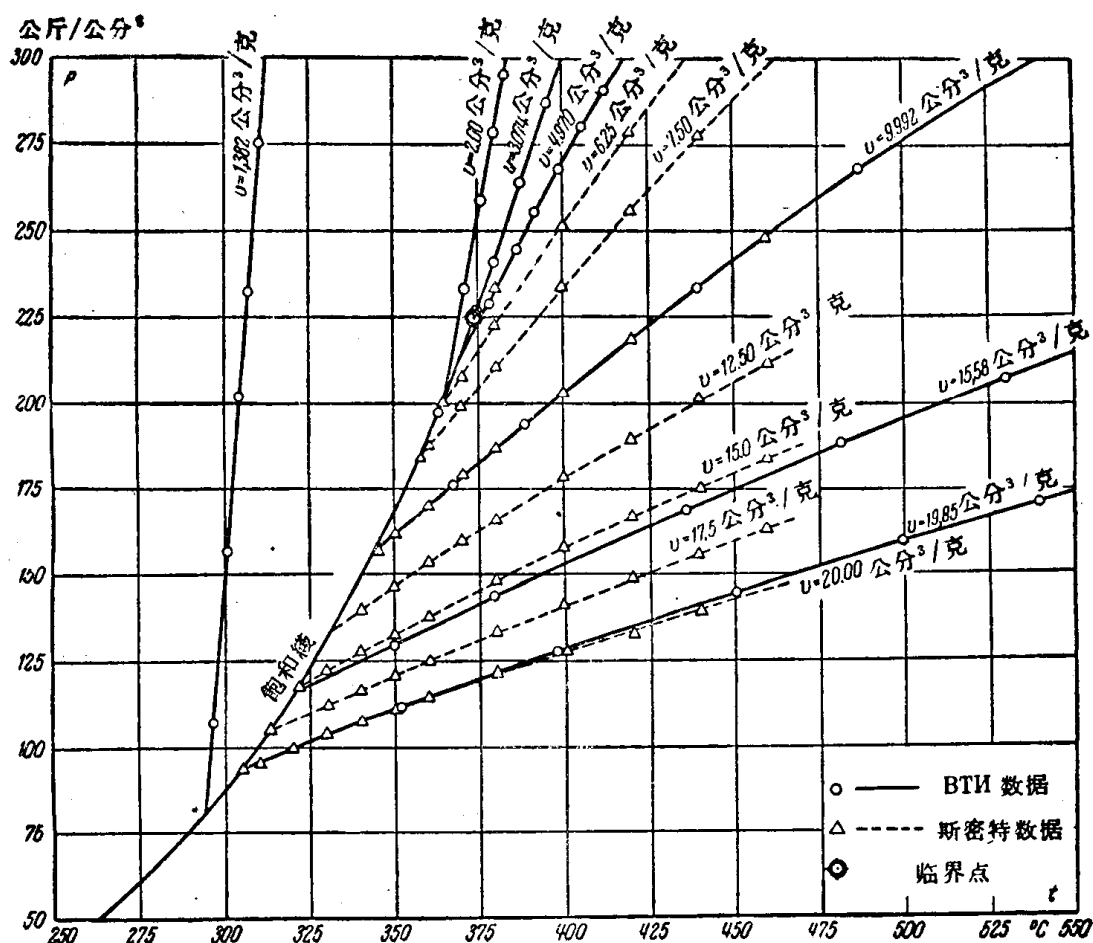


图4 高参数水蒸汽的比容(按照全苏热工研究所数据)

基于全苏热工研究所得到的数据,能够比采用平均直径法较精确地确定临界比容。

为了求得临界比容,曾确定了临界范围内饱和线附近的等容线切线的斜角。知道了这些斜角与比容的关系,再考虑到比容线同饱和线在临界点,仅有一条共同切线的这种情况,就容易求得临界比容。

按照全苏热工研究所的实验,等容线的斜角可以足够精确地表示为下列方程式〔文献16〕:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v = \frac{10^3}{v + 0.000407}.$$

导数 (dP/dT) 沿着饱和线在临界点的值,按照阿斯波尔、斯吉模松和德仁涅克斯(美国)的数据〔文献17〕是 $2.728 \cdot 10^4$ 公斤/公尺²·°C,于是导出临界比容 $v = 0.00326$ 公尺³/公斤。

全苏热工研究所的实验证明,水蒸汽的临界等容线实际上是条直线,对于其他的物质,也同样如此。

全苏热工研究所积累的实验资料,曾用来编制压力达300公斤/公分²及温度达600°C的水及水蒸汽的热力学性质表,已于1952年出版〔文献16〕。

全苏热工研究所表是在吉姆洛特领导下编制的。

众所周知，到目前为止，没有任何一个經驗的或理論的水蒸汽状态方程式，包含了制表的状态参数的全部范围。

其中最大的困难，是建立当密度超过临界密度一半时的超临界范围，及高压下饱和綫附近的关系式。迄今所有出版的表中，这些范围都是用图解法編制的，没有任何計算公式。

在編制全苏热工研究所的表时，曾利用了两个經驗方程式，其中之一，是作为在超临界范围及饱和綫附近范围的表示式。

第一方程式(I)确切地描述了包括在表中的几乎全部状态参数，只有比热极大值附近的狭条范围除外(图5)。这个方程式的应用范围，和目前用同样方法編制出版的其他表使用的方程式一样。

方程式(I)的編制，是基于全苏热工研究所在高压高温(到 600°C 及 300公斤/公分^2)下，水蒸汽比热的实验数据，以及其他研究者的实验数据(温度达 450°C 及压力达 200公斤/公分^2)。

方程式(I)同全苏热工研究所关于比热及比容的实验数据很吻合。同样，同第三次国际会议骨干表的数据也很吻合。

第二方程式(II)很确切地描述了超临界范围及处于饱和綫附近的范围。它是在总结全苏热工研究所超临界范围内的水蒸汽比热的实验数据的基础上，以及其他研究者在饱和綫附近水蒸汽的比热及焓的最可靠的实验数据基础上而編制的。在饱和綫上水和水蒸汽的热力学量采用阿斯波恩、斯吉模松及德仁涅克斯的数值[文献17]。

以上提到的所有的水蒸汽表，基本上合乎于1934年骨干表的容差系统，这个系统已为国际公认所证实。或者说，在編制骨干表时追求的主要目的——水蒸汽表的划一，无疑是达到了。

然而，第三次国际会议参加者的那个期望，即由他们所創制的骨干表来满足热力工作数十年的需求的期望，却未能实现[文献18]。热力工程近年来剧烈发展的结果，就要求編制较高压力和温度的水蒸汽表，这在1934年拟制骨干表时是曾预料到的。

在苏联进行的高参数水蒸汽热力学性质的实验研究[文献18及19]，目前已导致这一问题的解决。因此，在全苏热工研究所物理技术室里，雷符金及斯洛特曾着手把全苏热工研究所表扩充到压力 400公斤/公分^2 及温度 750°C 的工作。

全苏热工研究所表的本版(第二版)，就是这个工作的结果。

为了扩充全苏热工研究所表到较高的压力和温度范围，主要是利用莫斯科动力学院在基列林领导下得到的比容实验数据(见图7及8)。热力性质的計算，是按照以下部分中讲述的差值法进行的。

在比热极大值的范围内，除基列林的比容数据[文献19]外，还考虑了謝德林关于比热[文献20]以及加伏里契克和米斯克夫斯基关于焓[文献3]的实验研究结果。

当压力为 400公斤/公分^2 及温度为 $0\sim 300^{\circ}\text{C}$ 时，水的热力学性质是按照凱斯的数据[文献1]、和积比容骨干表的数据，采用已知的热力学关系式，用图解微分法和图解积分法进行計算的。因为在所说的状态参数范围内，水的焓与压力的关系很微，按照 $P-V-T$ 数据計算焓和熵，可以保证足够高的精确度。

I. 水蒸汽热力学性质表的编制

1. 对于压力达 300 公斤/公分²和温度达 600°C 的表

(摘自第一版绪言)

表的计算是从表示比热 C_p 与压力和温度关系的两个方程式出发而得的。对于引入表中的其余的量 (焓 i 熵 s 及比容 v)，必须借助于联系热量及参数量本身的已知热力学关系式。

由状态函数：焓 $i = u + APv$ ；自由能 $F = u - Ts$ 及热力势 $\Phi = u - Ts + APv$ ，容易导出在编制水蒸汽表时使用的基本方程式。

这些状态函数的全微分的形式是：

$$di = Tds + AvdP; \quad (1)$$

$$dF = -sdT - APdv; \quad (2)$$

$$d\Phi = -sdT + AvdP; \quad (3)$$

利用全微分的性质，由方程式 (2) 和 (3) 得到：

$$\left(\frac{\partial S}{\partial v}\right)_T = A \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v; \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T = -A \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P. \quad (5)$$

但

$$C_p = T \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_P; \quad (6)$$

$$C_v = T \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_v. \quad (7)$$

把此二方程式对 P 及对应地对 v 微分，并改变方程式右边微分的次序，再考虑到关系式 (4) 及 (5)，就得到：

$$\left(\frac{\partial C_p}{\partial P}\right)_T = AT \left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_P; \quad (8)$$

$$\left(\frac{\partial \omega}{\partial v}\right)_T = AT \left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2}\right)_v. \quad (9)$$

式 (1) 中，视 S 为 P 和 T 的函数，并利用式 (5)，求得：

$$\left(\frac{\partial i}{\partial P}\right)_T = A \left[-T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P + v \right], \quad (10)$$

这个式子给出定温下焓 i 与压力的关系。

引入新变量 $\tau = \frac{1}{T}$ 代替 T ，式 (10) 可表为较简单的形式

$$\left(\frac{\partial i}{\partial P}\right)_\tau = A \left[\frac{\partial(v\tau)}{\partial \tau} \right]_P. \quad (11)$$

比热差数 $C_p - C_v$ 同样也可求得，由式 (1)，即：

$$di = T \left(\frac{\partial S}{\partial v}\right)_T dv + T \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_v dT + AvdP.$$

視 v 为 P 和 T 的函数, 求得:

$$di = \left[T \left(\frac{\partial S}{\partial v} \right)_T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P + T \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_v \right] dT + \left[T \left(\frac{\partial S}{\partial v} \right)_T \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T + Av \right] dP. \quad (12)$$

如所周知, $\left(\frac{\partial i}{\partial T} \right)_P = C_p$. 由式(4)及(7)求得:

$$C_p - C_v = AT \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P. \quad (13)$$

此外, 由式(1), 应当有:

$$\left(\frac{\partial i}{\partial S} \right)_P = T. \quad (14)$$

方程式(5)、(8)、(11)及(12)联系着主要的热力学量, 这些方程式被用来导出焓 i , 比容 v 及熵 S 的计算公式。

在这些公式中, 热量的量度单位, 采用电制大卡, 等于 $\frac{1}{860}$ 国际千瓦小时。

气体常数 R 取为 47,053 公斤公尺/公斤度。热的功当量

$$A = 426.99 \text{ 公斤公尺/电制大卡.}$$

热力绝对学温度 T 与百度温标温度 t 的关系是

$$T = 273.16 + t.$$

我們导出的比热第一方程式为:

$$c_p = c_{p_0} + \frac{P}{10^4} [a_1^c v + a_2^c v + a_3^c v + (b_1^c v + b_2^c v) p + (c_1^c v + c_2^c v) p^2 + (d_1^c v + d_2^c v + d_3^c v) P^{2.8} + e_1^c v P^8] \quad (I)$$

$$\text{式中 } a_1^c v = 3.3333 \cdot 10^8 \frac{1}{T^4};$$

$$a_2^c v = 2.3199 \cdot 10^{29} \frac{1}{T^{12}};$$

$$a_3^c v = -1.7376 \cdot 10^{-2} k [(2T - 373.16) - r(T - 373.16)];$$

$$k = -8.3180 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-1.0111} \cdot 10^{-8} (T - 373.16)^2;$$

$$r = 1 + 7.4194 \cdot 10^{-8} T (T - 373.16);$$

$$b_1^c v = 4.8192 \cdot 10^{20} \frac{1}{T^{10.5}};$$

$$b_2^c v = 7.9890 \cdot 10^{28} \cdot \frac{1}{10^{13.63}};$$

$$c_1^c v = 9.6168 \cdot 10^{14} \frac{1}{T^{11}};$$

$$c_2^c v = 2.0391 \cdot 10^{50} \frac{1}{T^{12.6}};$$

$$d_1^c v = 1.4319 \cdot 10^{63} \frac{1}{T^{26.2}};$$

$$d_2^c v = 4.0690 \cdot 10^3 \left\{ \frac{n}{1.6147 \cdot 10^3} \left(\frac{1}{T} + 1.8274 \cdot 10^{-8} (T - 648.16) \right) - 0.69750 \cdot 10^{-9} (2T - 648.16) m \right\};$$

$$m = 3.5190 \cdot 10^{49} \frac{1}{T^{25.2}} \cdot 10^{-10^{-4}} (T - 648.16)^2;$$

$$n = 1.6147 \cdot 10^3, m[1 + 1.7577 \cdot 10^{-8} T(T - 648.16)];$$

$$d_3^c p = 1.1575 \cdot 10^{18} \frac{1}{T^{14}};$$

$$e_1^c p = 1.9696 \cdot 10^{79} \frac{1}{T^{47}}.$$

由这个方程式得出 v , i 及 s 的表示式为:

$$v = \frac{RT}{P} - [a_0^v + a_1^v + a_2^v + a_3^v + (b_1^v + b_2^v)P + (c_0^v + c_1^v + c_2^v)P^2 + (d_1^v + d_2^v + d_3^v)P^{2.8} + (e_0^v + e_1^v)P^8]. \quad (Ia)$$

式中

$$\begin{aligned} a_0^v &= 0.000190; & c_1^v &= 1.1645 \cdot 10^{-3} T C_1^c p; \\ a_1^v &= 3.5583 \cdot 10^{-3} T a_1^c p; & c_2^v &= 0.19707 \cdot 10^{-3} T C_2^c p; \\ a_2^v &= 0.32348 \cdot 10^{-3} T a_2^c p; & d_1^v &= 0.24576 \cdot 10^{-3} T d_1^c p; \\ a_3^v &= k; & d_2^v &= m; \\ b_1^v &= 0.85616 \cdot 10^{-3} T b_1^c p; & d_3^v &= 0.89158 \cdot 10^{-3} T d_3^c p; \\ b_2^v &= 0.49608 \cdot 10^{-3} T b_2^c p; & e_0^v &= -2.1332 \cdot 10^{-57}; \\ e_0^v &= -0.95000 \cdot 10^{-17}; & e_1^v &= 0.17775 \cdot 10^{-3} T e_1^c p. \end{aligned}$$

$$i = i_0 - \frac{P}{10^4} [a_0^i + a_1^i + a_2^i + a_3^i + (b_1^i + b_2^i)P + (c_1^i + c_2^i)P^2 + (d_1^i + d_2^i + d_3^i)P^{2.8} + (e_0^i + e_1^i)P^8]. \quad (Ib)$$

式中

$$\begin{aligned} a_0^i &= 0.00447; & c_1^i &= 0.099998 T C_1^c p; \\ a_1^i &= 0.33333 T a_1^c p; & c_2^i &= 0.040000 T C_2^c p; \\ a_2^i &= 0.090911 T a_2^c p; & d_1^i &= 0.039653 T d_1^c p; \\ a_3^i &= 23.420 k r; & d_2^i &= n; \\ b_1^i &= 0.10531 T b_1^c p; & d_3^i &= 0.076926 T d_3^c p; \\ b_2^i &= 0.079199 T b_2^c p; & e_0^i &= -5.5510 \cdot 10^{-57}; \\ c_0^i &= 0.74160 \cdot 10^{-6}; & e_1^i &= 0.021739 T e_1^c p; \end{aligned}$$

$$S = S_0 - AR \ln \frac{P}{P_0} - \frac{P}{10^4} [a_1^s + a_2^s + a_3^s + (b_1^s + b_2^s)P + (c_1^s + c_2^s)P^2 + (d_1^s + d_2^s + d_3^s)P^{2.8} + e_1^s P^8], \quad (Ib)$$

式中

$$\begin{aligned} a_1^s &= 0.25000 a_1^c p; & c_2^s &= 0.038462 c_2^c p; \\ a_2^s &= 0.083335 a_2^c p; & d_1^s &= 0.038169 d_1^c p; \\ a_3^s &= 1.7376 \cdot 10^{-3} (T - 373.16) k; & d_2^s &= 2.8383 \cdot 10^{-3} (T - 648.16) m; \\ b_1^s &= 0.095239 b_1^c p; & d_3^s &= 0.071432 d_3^c p; \\ b_2^s &= 0.073370 b_2^c p; & e_1^s &= 0.021277 e_1^c p; \\ c_1^s &= 0.090908 c_1^c p; & P_0 &= 0.01 \cdot 10^4. \end{aligned}$$

零压时, 比热按下列公式计算:

$$C_{p_0} = 0.3521 + 0.00018463 T + \frac{11.33}{T}, \quad (15)$$

① 原文可能误印成 $b_1^s = 0.095239 b_2^c p$. ——译者注

这个公式是按 B.C. 西列茨基的数据构成的。

由式(15)得到 i_0 和 S_0 的积分关系式:

$$i = \int c_p dT \text{ 和 } s = \int \frac{c_p}{T} dT,$$

在 $t=0^\circ\text{C}$ 及相应的饱和压力下, 水的焓和熵取为零值^①:

$$i_0 = 430.67 + 0.3521T + 0.92315 \cdot 10^{-4} T^2 + 26.088 \text{Lg} T; \quad (16)$$

$$s_0 = 0.20230 - 2.30258 AR \text{Lg} \frac{P_0}{0.0006228 \cdot 10^4} + 0.81074 \text{Lg} T \\ + 1.8463 \cdot 10^{-4} T - \frac{11.33}{T}. \quad (17)$$

我們导出的比热第二方程式(II)为:

$$z = \frac{1}{0.3707} \left(y - A \left(1 + \frac{y}{B} \right) \sqrt{1 - \frac{y}{C}} \right), \quad (\text{II})$$

式中 $y = T - 648.16;$

$$z = P \cdot 10^{-4} - 227.82.$$

系数 A , B 及 C 是量 $x = \frac{cp - cp_0}{k}$ 的函数。

$$A = \frac{100}{2.74x^3 + 9.3x^2 + 5.8x + 1.4019};$$

$$B = \frac{78.4}{x + 0.9284};$$

$$C = \frac{1}{X} \left(150 + \frac{140}{x + 2.35} \right).$$

系数 k 是下列形式的函数:

$$k = 1.01 \times \left\{ 1 + \frac{4.244(P \cdot 10^{-6}) - 6.353 -}{100} \right. \\ \left. - \sqrt{[4.244(P \cdot 10^{-6}) - 6.353]^2 - [42.80(P \cdot 10^{-6}) - 10.19(P \cdot 10^{-6}) - 43.31]} \right\}.$$

方程式(II)给出比热、压力及温度之间隐蔽的关系。它相当于 Z 的二次方程式, y 的三次方程及 x 的四次方程, 即是說对于在根式方程中的这些量中的任何一个都可以解为其余两个的函数。

为了表示方程式应用范围界限以下的区域, 按这个方程式编制了温度顺次间隔 $0.2 \sim 1^\circ\text{C}$ 的比热詳值表(沿等压綫)。焓和熵是按这些数据用近似积分法依下列方程式計算的:

$$i_T = \int_{T_1}^T c_p dT + i_{T_1} \quad (18)$$

及

$$s_T = \int_{T_1}^T \frac{c_p}{T} dT + s_{T_1}, \quad (19)$$

式中 T_1 ——方程式(I)及(II)应用范围界限的相应温度(见图5)。

① 注意, 此处系指 $i=i_0$, $s=s_0$ 。——譯者注

等压线上连接成方程式(I)及(II)应用范围界限的那些点, 按照这两个方程式计算出的量, 以及相应的导数值, 应该是相同的。

因此, 量 i_{T_1} 及 s_{T_1} 按方程式(16)及(1B)计算, 而当其温度低于 T_1 时, 焓和熵按式(18)及(19)计算, 其中的 c_p 值由方程式(II)得到。

对于比容的计算是利用方程式

$$v = v_{T_1} - \int_{T_1}^T \int_{T_1}^T \frac{1}{T} \left(\frac{\partial c_p}{\partial P} \right)_T dT dT + \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_{PT_1} (T - T_1), \quad (20)$$

式(8)积分就可得到这个方程式。

对于所有的等压线, 当其温度为 T_1 时, 比容 v_1 及导数 $\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P$ 的值按(Ia)计算。

导数 $\left(\frac{\partial c_p}{\partial P} \right)_T$ 按方程式(II)计算。

为了计算二重积分, 在方程式(II)应用范围内, 按照等压线及温度间隔 $0.2 \sim 1^\circ\text{C}$ 编制了导数 $\left(\frac{\partial c_p}{\partial P} \right)_T$ 的详细数值表。

按得到的数据, 用近似积分法计算比容值。

饱和线是按最新的实验数据用通常的方法建立的, 水的热力学性质表也同样如此。

为了将方程式(I)及(II)的计算结果, 同实验数据按比热进行比较, 因而制作了曲线图(见图5), 在图上绘出计算的等压线及全苏热工研究所不同研究者所研究的结果得到的实验点。

在这个图上标出了这两个方程式的应用界限。

在比较实验数据和计算曲线时, 必须考虑到不同实验的精确度和可靠性是远不相同

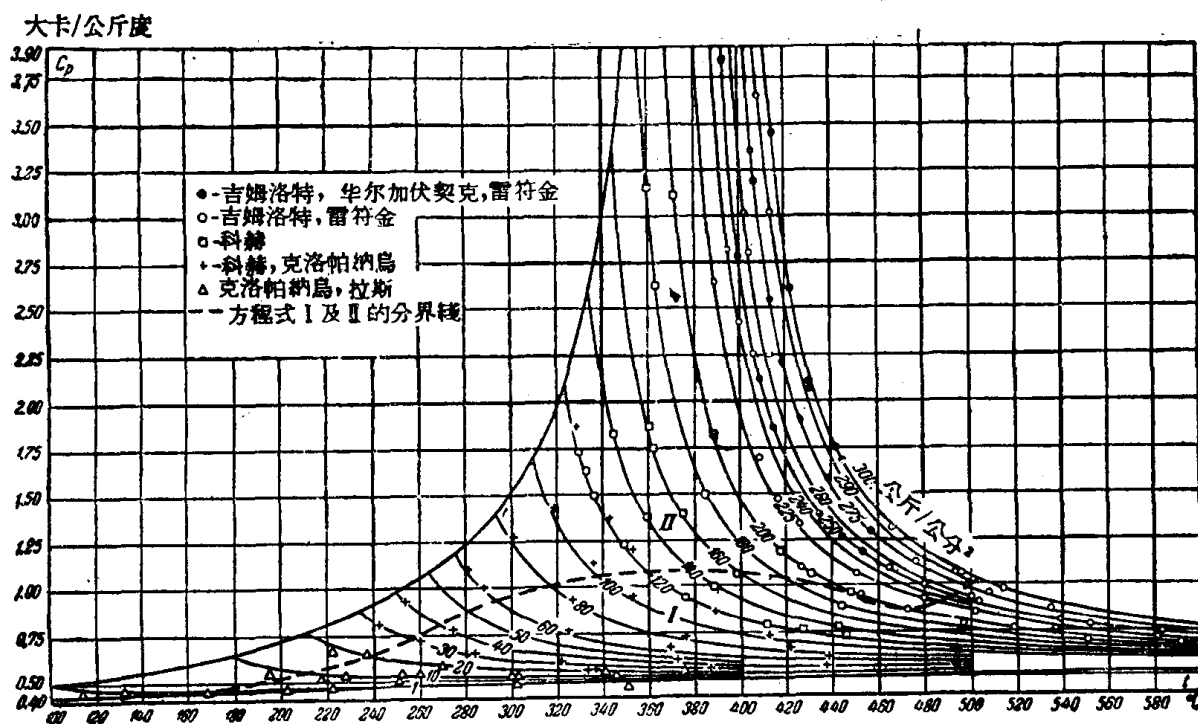


图5 过热水蒸汽的比热(按照全苏热工研究所表及实验数据编制)

的。精确和可靠的全苏热工研究所的数据，奠定了计算公式的基础，同计算曲线极为吻合。

科赫对温度为 460°C 、压力为 $120 \sim 200$ 公斤/公分² 时进行的实验是十分可靠的，与计算曲线满意地符合。

克洛帕纳乌和科赫早先在慕尼黑技术物理实验室内，对压力达 120 公斤/公分² 时关于比热的测定，如所周知，与加伏里奇克和米斯科夫斯基的焓值是不符合的，而同样，与压力在 $120 \sim 200$ 公斤/公分² 范围内，科赫较晚的焓值测定实验也不符合。

按照克洛帕纳乌和科赫的数据计算焓时，得到的结果大大地超过焓的实验数据，并跑到允许差数之外。在饱和线附近，这些差数特别大。编制水蒸汽表饱和线的附近范围时，只在足够高的温度情况下，才使用这些数据。

饱和线附近可能利用的仅有焓和比容的数据。

从图 5 看出，克洛帕纳乌和科赫比热的数据，高于计算曲线，而计算曲线同焓的实验数则很吻合。

全苏热工研究所表与目前所有的水蒸汽表有本质的差别，这个差别是，制表时利用的实验数据相当于表中状态参数的基本范围^①。正如电站部 1950 年 12 月 18 日在“苏维埃技术解答”第 65 号中所说：同其它的表比较，全苏热工研究所编制的表，是最精确最可靠的。

表的焓值全部落在第三次国际蒸汽表会议的焓值骨干表的允许差数内。

在等压线 300 公斤/公分² 上，当其温度为 400°C 时，按照表中的比容，超出骨干点在允许差数中的比容。

这个点的比容是基于我们在超临界范围内的实验研究。

当温度从 372°C 到临界温度 (374.15°C) 时，我们的表的饱和水蒸汽的焓值，基于最新的实验数据，稍为超过允许差数。

超临界范围内，由全苏热工研究所大量的比热实验资料，编出了此范围内温度间隔 1°C 的详细焓值表。

这个表包括压力为 $230 \sim 300$ 公斤/公分²、温度 $350 \sim 450^{\circ}\text{C}$ 的范围，早先出版的这种表，因为是在全苏热工研究所比热实验之前，故不可能有这些实验资料。根据本表，全苏热工研究所物理技术实验室用五倍比例尺绘制了 is -图，这对精确的计算是必须的。

* * *

前面说过，克洛帕纳乌和科赫的实验数据，比全苏热工研究所表显著地抬高了（特别是饱和线附近）。表第一版在苏联出版后，为了确定饱和线附近水蒸汽的热力学性质，斯洛特和吉姆洛特在 1954~1955 年曾进行过水蒸汽比热 (C_p) 的新的测定〔文献 21 及 22〕。这些测定的结果，从图 6 上可以得出结论，同列入 1952 年全苏热工研究所表的 C_p 值完全吻合。计算及测量的 C_p 值间最大差数为 2.5%；在研究的范围内，列入全苏热工研究所表的 40 个 C_p 值中，有 36 个与实验数据之差小于 1%。

即是说，全苏热工研究所在制表时，对克洛帕纳乌赫及科赫的数据误差所作的结

① 即不用升插法。——译者

論，得到了實驗的証實。

全苏热工研究所表的第二版，在等压綫20~60公斤/公分²上接近飽和綫的五点的 C_p 值的变化，同新的實驗数据相当(見表 V)。

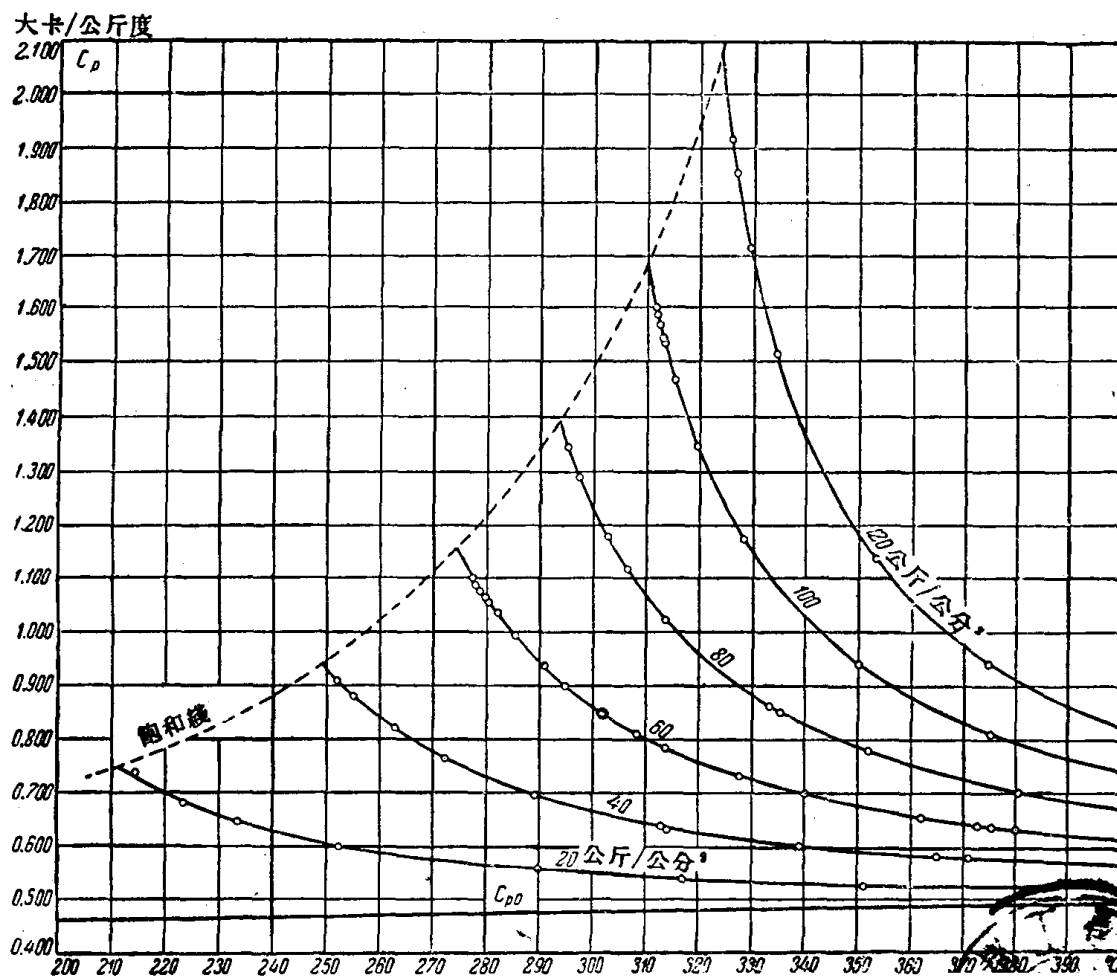


图 6 到临界范围水蒸汽的比热(按照全苏热工研究所数据)

2. 对于压力达400公斤/公分²及温度达750°C的表

为了把水蒸汽表延伸到600~750°C范围，当其全压力在400公斤/公分²以下时，利用方程式(I)。

对于压力为250~400公斤/公分²及温度在600°C以下时，水蒸汽表是用差值法編制的，这种能够以比較简单的办法就能保証热量与热力学量的一致，因为此时受到图解分析的不是热力量本身，而只是它們与专门选择的函数的差值。

这个专门的函数曾利用了尤日的状态方程式[文献23]：

$$v = \frac{RT}{P} - \left(a_0 + a_1 \left(\frac{P}{10^6} \right) + a_2 \left(\frac{P}{10^6} \right)^2 + a_3 \left(\frac{P}{10^6} \right)^3 \right) \quad (\text{II})$$

式中 $R=47.05$, 公尺/°C;

$T=273.2+t$, °C;

P =压力, 公斤/公尺²;

v ——比容, 公尺³/公斤;

$$a_0 = \frac{0.11354}{\left(\frac{T}{100}\right)^2} + \frac{0.04381}{\left(\frac{T-200}{100}\right)^2} - 0.000539;$$

$$a_1 = \frac{2.549 \cdot 10^3}{\left(\frac{T}{100}\right)^{2.1}} + \frac{1.236 \cdot 10^7}{\left(\frac{T}{100}\right)^{1.4}} - 0.000030;$$

$$a_2 = \frac{4.312 \cdot 10^{13}}{\left(\frac{T}{100}\right)^{2.1}} - \frac{5.7007 \cdot 10^{12}}{\left(\frac{T}{100}\right)^{2.0}} - 0.00000050;$$

$$a_8 = \frac{1.22 \cdot 10^{0.0}}{\left(\frac{T}{100}\right)^{0.2}} - \frac{8.5 \cdot 10^{4.0}}{\left(\frac{T}{100}\right)^{0.9}}.$$

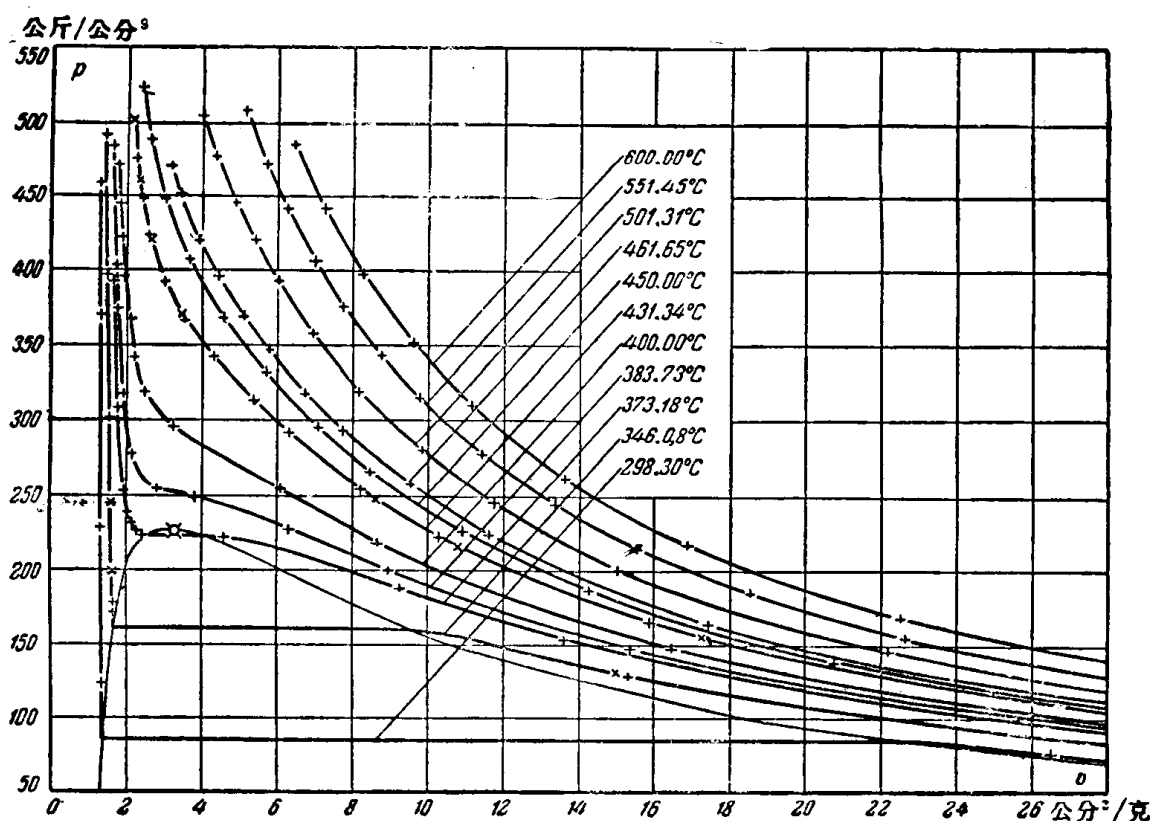


图7 高参数水蒸汽的比容(按照莫斯科动力学院的数据)

(第一及第二组实验)

这个经验方程式主要是依据比容〔文献2〕及焓〔文献3〕的实验结果拟定的。当其水蒸汽的密度在临界密度一半以下以及温度从0到350°C的饱和线上时,该方程式决定的水蒸汽热力学性质,具有高度的精确度。

对于我们的目的来说,尤日方程式变得特别有利,因为它明显地表示了比容与压力和温度的关系。而这个方程式的温度函数的计算,比另外的状态方程式大为简化了。

分析尤日方程式和实验数据的差数可知,当其密度超过临界密度一半时,如果式(Ⅲ)中最后一项的乘幂指数减少,就可能降低。因此在方程式(Ⅲ)内,引入表示式