

TALLINNA POLÜTEHNILINE INSTITUUT
Soojusenergeetika kateeder

REAALSETE GAASIDE
ERISOOJUSED

TALLINN
1961

A-24763

TALLINNA POLÜTEHNILINE INSTITUUT

Soojusenergeetika kateeder

REAALSETE GAASIDE ERISOOJUSED

Koostanud J. Ivand

*Sm. H. Põrsand'ile
Lahuse korraldaja
Tallinn*

Tallinn
1961

Таллинский политехнический институт
Кафедра теплоэнергетики

Я. Иванд

Теплоемкости реальных газов

TARTU ÜLIKOOLI
RAAMATUKOGU

Sissejuhatus

Käesolevas brošüüris esitatakse reaalsete gaaside erisoojuste võrrandid, kusjuures erisoojust vaadeldakse funktsioonina temperatuurist ja rõhust. Brošüür on ette nähtud täiendava õppeabinõuna üliõpilastele, kes kuulavad tehnilise termodünaamika ja üldise soojustehnika kursust.

Brošüüri koostamise aluseks on olnud peamiselt prof.dr. H.Faltini "Technische Wärmelehre" kolmas trükk (VEB.Wilhelm Knapp, Verlag Halle /Saale/, 1956). Õpikut kasutatakse Saksa Demokraatliku Vabariigi ülikoolides ja teistes kõrgemates õppeasutustes.

§ 1. Reaalsete gaaside erisoojusted ja oleku- ehk karaktervõrrandid

Reaalsete gaaside erisoojusted c_p ja c_v on funktsioonid gaasi temperatuurist ja rõhust ning, nagu teada termodünaamikast, avalduvad seostega:

$$c_p = c_{p_0} - AT \int \left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2} \right)_p dp \quad (1)$$

$$c_v = c_{v_0} + AT \int \left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2} \right)_v \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T dp \quad (2)$$

Võrrandites (1) ja (2) on c_{p_0} ja c_{v_0} reaalse gaasi erisoojusted vastavalt gaasi olekule, kui $p \rightarrow 0$ ja $v \rightarrow \infty$. Reaalne gaas selles olekus allub ideaalse gaasi karaktervõrrandile ja seega c_{p_0} ja c_{v_0} on ainuüksi temperatuuri funktsioonid ja nad on arvutatavad kvantide teooria põhjal koostatud erisoojuste võrranditega.

Järelikult võrrandite (1) ja (2) integraalid esindavad gaasi rõhust tingitud erisoojuste korrektsioone, s.o.

$$c_p = c_{p_0} + \Delta c_p \quad (3)$$

$$c_v = c_{v_0} + \Delta c_v \quad (4)$$

Edasi nähtub võrranditest (1) ja (2), et erisoojuste võrrandite kuju oleneb reaalse gaasi karaktervõrrandist, kuna ta määrab nendesse võrranditesse kuuluvad osatuletised.

Reaalse gaasi karaktervõrrandeid on andnud paljud teadlased, kuid tavaliselt ükski neist ei hõlma reaalse gaasi kõiki võimalikke olekuid, näiteks kriitilist ja kriitiliselähedast olekut, madal- ja kõrgrõhu piirkondi jne. Seetõttu ei saa ka teatud karaktervõrrandi põhjal tuletatud erisoojuste võrrandite kasutamine anda rahuldavaid tulemusi piirkondades, mida karaktervõrrand ise ei haara.

Käesolevas on erisoojuste võrrandid tuletatud Berthelot'i ja Wohli poolt antud reaalse gaasi karaktervõrrandi järgi, sest viimastele, eriti Berthelot' omale, on võimalik arvutusteks ja diferentseerimiseks anda lihtsat kuju.

Berthelot' võrrandi taandatud kuju on:

$$\left(\pi + \frac{16}{3} \frac{1}{v^2 \varphi^2}\right) \left(\varphi - \frac{1}{4}\right) = \frac{32}{9} v \quad (5)$$

kus π , v ja φ on nn.taandatud termilised parameetrid, mis on termiliste parameetrite suhtes samanimeliste kriitiliste parameetritega p_k , v_k , T_k , s.o.

$$\pi = \frac{p}{p_k}, \quad \varphi = \frac{v}{v_k} \quad \text{ja} \quad v = \frac{T}{T_k}$$

Nende suhete abil saab Berthelot' võrrandi teisendada käsitlemiseks sobivamasse kujusse:

$$pv = RT + \left(\frac{9}{128} R \frac{T_k}{p_k} - \frac{27}{64} R \frac{T_k^3}{p_k T_k^2} \right) p \quad (6)$$

Võrrand (6) muutub ideaalse gaasi karaktervõrrandiks kahel juhul: kui $p \rightarrow 0$ või kui $T = T_k \sqrt{6} = 2,45 T_k$, sest siis $B \rightarrow 0$. Viimane on nn. Boyle' temperatuur.

Osatuletiste leidmiseks on võimalik võrrandit (6) lihtsustada asendustega:

$$B = \frac{9}{128} R \frac{T_k}{p_k} - \frac{27}{64} R \frac{T_k^3}{p_k T^2} = C - D \frac{1}{T^2} \quad (7)$$

kus

$$C = \frac{9}{128} R \frac{T_k}{p_k} \quad \text{ja} \quad D = \frac{27}{64} R \frac{T_k^3}{p_k} \quad (8)$$

mille tulemusena

$$pv = RT + (C - D \frac{1}{T^2}) p \quad (9)$$

ehk

$$pv = RT + Bp \quad (10)$$

Berthelot' võrrand annab empiiriliste andmetega hästi ühtuvald tulemusi madalamatel rõhkudel gaasidele, mille nn. kriitiline koefitsient on ligilähedane Berthelot' võrrandi (5) koefitsiendiga $\frac{32}{9}$, s.o.

$$\frac{\pi \varphi}{v} = \frac{pv}{T} \cdot \frac{T_k}{p_k v_k} = \frac{RT_k}{p_k v_k} = \frac{32}{9} = 3,555... \quad (11)$$

Temperatuuride suhtes (Euckeni^{x)} järgi) on Berthelot' võrrand kasutatav alljärgnevatel piirkondades:

$$\frac{T}{T_k} \leq 0,7. \text{ Kehtib kuni temperatuurile } T \text{ vastava külastusrõhuni } p_s;$$

$$0,7 \leq \frac{T}{T_k} \leq 1,3. \text{ Kehtib rõhuni, mis on määratav seosega:}$$

$$p_{s, \frac{T}{T_k}=0,7} + \frac{p_k - p_{s, \frac{T}{T_k}=0,7}}{0,6} \left(\frac{T}{T_k} - 0,7 \right);$$

x)

A.Eucken, Energie und Wärmehalt, Leipzig, 1929, S.403

$1,3 \leq \frac{T}{T_k} \leq 2,5$. Kehtib gaasi kriitilise rõhuni p_k ;

$\frac{T}{T_k} \geq 2,5$. Kehtib kuni rõhuni $0,4 p_k \frac{T}{T_k}$.

Wohli poolt antud reaalsete gaaside karaktervõrrandi taandatud kuju on:

$$\pi \varphi = \frac{\pi}{4} + \frac{15}{4} \vartheta - \frac{6}{\varphi \vartheta} + \frac{4}{\varphi^2 \vartheta^{4/3}} - \frac{1}{\varphi^3 \vartheta^{4/3}} \quad (12)$$

kus π , φ ja ϑ on samuti taandatud termilised parameetrid nagu Berthelot' võrrandiski.

Asendades võrrandis (12) taandatud parameetrid neile vastavate suhetega, saab võrrandile anda kuju:

$$pv = RT + \left[\frac{RT_k}{15p_k} - \frac{24}{15} v_k \left(\frac{T_k}{T} \right)^2 \right] p + \frac{64}{225} \frac{v_k}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^{10/3} p^2 - \frac{64}{3375} \frac{v_k}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^{13/3} p^3 \quad (13)$$

Võrrandi (13) tuletamisel on arvesse võetud, et Wohli võrrandi kriitiline koefitsient on 3,75, s.o.

$$\frac{\pi \varphi}{\vartheta} = \frac{RT_k}{p_k v_k} = \frac{15}{4} = 3,75 \quad (14)$$

kus R on gaasi konstant ja avaldub seosega

$$R = \frac{pv}{T}$$

Osatuletiste leidmise lihtsustamiseks on sobiv võrrandile (13) anda kuju:

$$pv = RT + Bp + Cp^2 - Dp^3 \quad (15)$$

kus

$$B = a - \frac{b}{T^2} ; \quad C = \frac{c}{T^{10/3}} ; \quad D = \frac{d}{T^{13/3}} \quad (16)$$

Võrrandist (13) nähtub, et konstantide a , b , c ja d avaldised on:

$$a = \frac{RT_k}{15p_k}; \quad b = \frac{24}{15} v_k T_k^2; \quad c = \frac{64}{225} \frac{v_k}{p_k} T_k^{10/3};$$

$$d = \frac{64}{3375} \frac{v_k T_k^{13/3}}{p_k^2} \quad (17)$$

Ka Wohli poolt antud karaktervõrrand ei haara gaaside kõiki olekuid. Ta ei kehti mahtude juures, mis on väiksemad kriitilisest mahust, s.t. ütleb üles gaaside vedelate olekute piirkonnas. Võrreldes Berthelot' võrrandiga, sobib Wohli võrrand paremini gaaside kõrgematele rõhkudele ja ta kirjeldab selles piirkonnas õigesti nende gaaside käitumist, millede kriitiline temperatuur on allpool 0°C ning kriitiline koefitsient on arvu 3,75 läheduses, s.o. piirides

$$3,5 \leq \frac{RT_k}{p_k v_k} \leq 4,0$$

§ 2. Tõelised erisoojused Berthelot' võrrandi järgi

1) Tõeline isobaarne kaaluline erisoojus $c_p \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}}$

Määrame erisoojuse võrrandis (1) esineva osatuletise $\left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_p$. Selleks ilmutame võrrandi (9) gaasi kilomahu v suhtes, s.o.

$$v = \frac{RT}{p} + C - D \frac{1}{T^2} \quad (18)$$

Diferentseerides seda võrrandit temperatuuri suhtes vastavalt protsessile $p = \text{konst.}$, saame:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{R}{p} + 2 D \frac{1}{T^3} \quad (19)$$

$$\left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_p = - 6 D \frac{1}{T^4} \quad (20)$$

Järelikult

$$c_p = c_{p_0} + AT \int \left(\frac{81}{32} R \frac{T_k^3}{p_k} \frac{1}{T^4} \right) dp$$

Integreerinud, saame võrrandi c_p lõplikuks arvutamiseks:

$$c_p = c_{p_0} + AR \frac{81}{32} \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 p \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (21)$$

Võrrandis (21), kus p ja p_k on absoluutsed rõhud, võib neid võtta mis tahes ühikuis, sest võrrandi selles liikmes esineb rõhkude suhe.

Võrrandis (21) esinev ideaalse gaasi erisoojus c_{p_0} asendatakse vahel erisoojusega, mis vastab rõhule 1 atm (760 mmHg) ja temperatuurile T , sest erisoojuste rõhust sõltumata osa on tavaliselt antud vastavalt neile termilistele parameetritele.

Tähistades selle erisoojuse c_{p_1} , võime ta võrrandi (21) põhjal avaldada seosega:

$$c_{p_1} = c_{p_0} + \frac{81}{32} AR \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 \cdot 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (22)$$

Lahutades võrrandi (21) võrdsetest võrrandi (22) võrdsed, saame:

$$c_p = c_{p_1} + \frac{81}{32} AR \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 (p - 1) \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (23)$$

Erinevalt võrrandist (21) on rõhud siin füüsikalistes atmosfäärides.

2) Tõeline isobaarne molekulaarne erisoojus $c_p \frac{\text{kcal}}{\text{kmol}^\circ\text{C}}$

Võrrandid molekulaarsete erisoojuste jaoks saame võrrandite (22) ja (23) võrdsete korrutamisel gaasi molekulaarkaaluga. Silmas pidades, et korrutis $AR\mu = 1,986$, saame:

$$c_p = c_{p_0} + 5,027 \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 p \frac{\text{kcal}}{\text{kmol}^\circ\text{C}} \quad (24)$$

$$v_6 i \quad c_p = c_{p_4} + 5,027 \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 (p - 1) \quad \frac{\text{kcal}}{\text{kmol}^\circ\text{C}} \quad (25)$$

$$3) \text{ Tõeline mahuline isobaarne erisoojus } c_p' \quad \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3^\circ\text{C}}$$

Tõelise mahulise isobaarse erisoojuse, s.o. erisoojuse c_p' ühe normaalkuupmeetri gaasi kohta saame molekulaarsete erisoojuste võrrandite võrdsete jagamisel ühe kilomooli gaasi mahuga normaaltingimustes, s.o. arvuga 22,4.

Järelikult võrrandid c_p' arvutamiseks avalduvad kujul:

$$c_p' = c_{p_0}' + 0,2244 \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 p \quad \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3^\circ\text{C}} ; \quad (26)$$

$$c_p' = c_{p_4}' + 0,2244 \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 (p - 1) \quad \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3^\circ\text{C}} \quad (27)$$

Näide 1. Arvutada lämmastiku erisoojus $c_p' \quad \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3^\circ\text{C}}$ temperatuuri juures 500°C ja rõhu juures 40, 80, 100 jne. atm ning võrrelda saadud andmeid tabeli VI andmetega. Tabelist I leiame, et lämmastiku kriitilised parameetrid on: $p_k = 34,6 \text{ ata} = 34,6 \cdot 0,968 = 33,5 \text{ atm}$, $T_k = 126^\circ\text{abs.}$, $v_k = 3,218 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$. Tabeli VII järgi vastab temperatuurile 500°C erisoojus $c_{p_4}' = \frac{2,472}{22,4} = 0,334 \quad \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3^\circ\text{C}}$.

Võrrandi (27) põhjal:

$$\begin{aligned} c_p' &= c_{p_4}' + 0,2244 \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 (p - 1) = \\ &= 0,334 + 0,2244 \cdot \frac{1}{33,5} \left(\frac{126}{773} \right)^3 (p - 1) = \\ &= 0,334 + 0,000029(p - 1) \quad \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

Arvutustulemused on antud järgnevas tabelis:

Rõhk atm	1	40	80	100	500	800	1000
Arvutatud c_p'	0,334	0,335	0,336	0,337	0,349	0,357	0,363
Tabeli VI järgi	0,334	0,335	0,337	0,338	0,349	0,353	0,355

Tabelist nähtub, et andmed ühtivad hästi kuni rõhuni 500 atm. Lämmastiku kriitiline koefitsient on

$$\frac{RT_k}{p_k v_k} = \frac{30,26 \cdot 126}{33,5 \cdot 10^4 \cdot 3,218 \cdot 10^{-3}} = 3,54,$$

mis on samane Berthelot' võrrandi kriitilise koefitsiendiga.

Näide 2. Võrrelda võrrandiga (27) arvutatud õhu mahulisi erisoojusi tabelis VI antud erisoojustega, kui $t = 200^\circ\text{C}$. Õhu kriitilised parameetrid on:

$$T_k = 132,46^\circ\text{abs.}, \quad p_k = 37,17 \text{ atm.}$$

Tabelist VI leiame, et

$$c_{p'}' = 0,3159 \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3\text{C}}$$

Lahendus. Võrrandi (28) järgi

$$\begin{aligned} c_p' &= 0,3159 + 0,2244 \frac{1}{37,17} \left(\frac{132,46}{473} \right)^3 (p - 1) = \\ &= 0,3159 + 0,000133(p - 1) \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3\text{C}} \end{aligned}$$

Arvutustulemused on antud alljärgnevas tabelis:

Gaasi rõhk atm	1	10	60	100	180	220
Arvutatud $c_p' \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3\text{C}}$	0,3159	0,318	0,324	0,329	0,340	0,345
c_p' tabeli VI järgi	0,3159	0,318	0,325	0,332	0,342	0,346

Järelikult ühtuvad ka õhu puhul arvutatud erisoojused hästi tabeli VI omadega. Õhu kriitiline koefitsient on:

$$\frac{RT_k}{p_k v_k} = \frac{29,27 \cdot 132}{37,2 \cdot 10^4 \cdot 3,227 \cdot 10^{-3}} = 3,218$$

mida võib lugeda heaks kokkulangemiseks Berthelot' võrrandi kriitilise koefitsiendiga. Seega asub õhk Berthelot' võrrandi arvutuspiirkonnas.

4) Tõeline kaaluline isohoorne erisoojus $c_v \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$

Tõeline kaaluline erisoojus avaldus võrrandiga (2), s.o.

$$c_v = c_{v_0} + AT \int \left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2} \right)_v \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T dp$$

Osatuletiste leidmiseks kasutame gaasi karaktervõrrandit (10) kujul:

$$p = \frac{RT}{v-B} \quad (a)$$

Diferentseerides võrrandit temperatuuri järgi vastavalt protsessile $v = \text{konst.}$, leiame, et

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v = \frac{R}{v-B} + \frac{RT}{(v-B)^2} \cdot \frac{dB}{dT}$$

$$\left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2} \right)_v = \frac{R}{(v-B)^2} \frac{dB}{dT} + \frac{RT}{(v-B)^2} \frac{d^2 B}{dT^2} + \frac{dB}{dT} \left[\frac{R}{(v-B)^2} + \frac{2RT}{(v-B)^3} \frac{dB}{dT} \right].$$

Arvestades, et $\left(\frac{dB}{dT} \right)^2$ on kõrgema järgu väike suurus, võime tuletise $\left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2} \right)_v$ võtta kujul:

$$\left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2} \right)_v = \frac{2R}{(v-B)^2} \frac{dB}{dT} + \frac{RT}{(v-B)^2} \frac{d^2 B}{dT^2}$$

Osatuletise $\left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T$ leidmiseks ilmutame võrrandi (10) kiloma-hu suhtes, s.o.

$$v = \frac{RT}{p} + B$$

mille diferentseerimisel saame

$$\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T = -\frac{RT}{p^2} = -\frac{(v-B)^2}{RT},$$

sest karaktervõrrandi (a) põhjal

$$p_2^2 = \left(\frac{RT}{v-B}\right)^2$$

Järelikult

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2}\right)_v \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T &= -\left[\frac{2R}{(v-B)^2} \frac{dB}{dT} + \frac{RT}{(v-B)^2} \frac{d^2 B}{dT^2}\right] \frac{(v-B)^2}{RT} = \\ &= -\frac{1}{T} \left(2 \frac{dB}{dT} + T \frac{d^2 B}{dT^2}\right) \end{aligned}$$

Aluseks võttes seost (7), s.o.

$$B = \frac{9}{127} R \frac{T_k}{p_k} - \frac{27}{64} R \frac{T_k^3}{p_k T^2}$$

leiame, et

$$\begin{aligned} \frac{dB}{dT} &= \frac{27}{64} \cdot 2 \frac{R}{p_k} \left(\frac{T_k}{T}\right)^3; \\ \frac{d^2 B}{dT^2} &= -\frac{27}{64} \cdot 2 \cdot 3 \cdot R \frac{T_k^3}{p_k T^4} \end{aligned}$$

Järelikult

$$\left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2}\right)_v \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T = \frac{1}{T} \left[\frac{27}{32} R \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T}\right)^3\right]$$

Tehes selle asenduse võrrandisse (2), saame:

$$c_v = c_{v_0} + A \int \left[\frac{27}{32} \frac{R}{p_k} \left(\frac{T_k}{T}\right)^3\right] dp.$$

Integreerides seda võrrandit, saame erisoojuse c_v arvutamiseks lõpliku võrrandi kujul:

$$c_v = c_{v_0} + \frac{27}{32} AR \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T}\right)^3 p \quad \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (28)$$

Erisoojuse c_{v_4} kaudu avaldub võrrand (28):

$$c_v = c_{v_1} + \frac{27}{32} AR \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 (p - 1) \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (29)$$

5) Tõeline molekulaarne isohoorne erisoojus $c_v \frac{\text{kcal}}{\text{kmol}^\circ\text{C}}$

Korrutades võrrandi (28) ja (29) võrdseid gaasi molekulaarkaaluga ja silmas pidades, et $AR\mu = 1,986$, saame molekulaarsete erisoojuste võrrandid kujul:

$$c_v = c_{v_0} + 1,676 \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 p \frac{\text{kcal}}{\text{kmol}^\circ\text{C}} \quad (30)$$

$$c_v = c_{v_1} + 1,676 \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 (p - 1) \frac{\text{kcal}}{\text{kmol}^\circ\text{C}} \quad (31)$$

6) Tõeline mahuline isohoorne erisoojus $c_v' \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3^\circ\text{C}}$

Jagades võrrandite (30) ja (31) võrdseid kilomoolmahuga normaaltingimustes, s.o. arvuga 22,4, saame:

$$c_v' = c_{v_0}' + 0,0748 \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 p \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3^\circ\text{C}} \quad (32)$$

$$c_v' = c_{v_1}' + 0,0748 \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 (p - 1) \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3^\circ\text{C}} \quad (33)$$

Võrreldes isobaarsete ja isohoorsete erisoojuste rõhukorrekt-sioone omavahel, ilmneb, et isohoorsete erisoojuste rõhukor-rektsioonid moodustavad ühe kolmandiku isobaarsete omadest. Võrranditest (21) ja (28) või (24) ja (30) või (26) ja (32)

$$\frac{\Delta c_v}{\Delta c_p} = \frac{27}{81} = \frac{1,676}{5,027} = \frac{0,0748}{0,2244} = \frac{1}{3}$$

Järelikult

$$\Delta c_v = \frac{1}{3} \Delta c_p \quad (34)$$

7) Tõeliste isobaarsete ja isohoorsete erisoo- juste vahe

Vaatleme esiteks kaalulisi erisoojusi. Võrrandite (21) ja (28) põhjal erisoojuste c_p ja c_v vahe avaldub:

$$c_p - c_v = c_{p_0} - c_{v_0} + \left(\frac{81}{32} - \frac{27}{32} \right) AR \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 p \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

Arvesse võttes, et $c_{p_0} - c_{v_0} = AR$, saame võrrandi kujul:

$$c_p - c_v = AR + \frac{54}{32} AR \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 p \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (35)$$

ehk

$$c_p - c_v = AR \left[1 + 1,6876 \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 p \right] \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (36)$$

Molekulaarsete ja mahuliste erisoojuste vahe jaoks saame seosed analoogiliselt võrranditest (24) ja (30) ning (26) ja (32):

$$C_p - C_v = 1,986 + 3,3514 \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 p \frac{\text{kcal}}{\text{kmol}^\circ\text{C}} \quad (37)$$

$$c_p' - c_v' = 0,0886 + 0,1496 \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 p \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3^\circ\text{C}} \quad (38)$$

§ 3. Keskmisel erisoojused Berthelot' võrrandi järgi

1) Keskmisel isobaarsed erisoojused

Keskmise kaalulise isobaarse erisoojuse 0°C kuni $t^\circ\text{C}$ arvutame seosest:

$$\bar{c}_p t = \int_{273}^T c_p dT$$

$$\bar{c}_p = \frac{1}{t} \int_{273}^T c_p dT \quad (39)$$

Asendades võrrandis (39) tõelise erisoojuse c_p tema avaldisega võrrandist (21), saame:

$$\bar{c}_p = \frac{1}{T} \int_{273}^T \left[c_{p_0} + \frac{81}{32} AR \frac{T_k^3}{p_k} \frac{1}{T^3} p \right] dT$$

Pärast integreerimist saame võrrandi kujul:

$$\bar{c}_p = \bar{c}_{p_0} + \frac{81}{32} AR \frac{T_k^3}{p_k} \frac{1}{2T} \left(\frac{1}{273^2} - \frac{1}{T^2} \right) p \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (40)$$

ehk

$$\bar{c}_p = \bar{c}_{p_0} + \frac{81}{32} AR \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 \frac{T}{2T} \left[\left(\frac{T}{273} \right)^2 - 1 \right] p \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (41)$$

Keskmise erisoojuse $\bar{c}_{p_1}$ kaudu avaldub võrrand:

$$\bar{c}_p = \bar{c}_{p_1} + \frac{81}{32} AR \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 \frac{T}{2T} \left[\left(\frac{T}{273} \right)^2 - 1 \right] (p-1) \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (42)$$

Analoogiliselt eespool toodule avalduvad keskmiste molekulaarsete ja mahuliste isohoorsete erisoojuste võrrandid kujul:

$$\bar{c}_p = \bar{c}_{p_1} + 5,027 \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 \frac{T}{2T} \left[\left(\frac{T}{273} \right)^2 - 1 \right] (p-1) \frac{\text{kcal}}{\text{kmol}^\circ\text{C}} \quad (43)$$

ja

$$\bar{c}_p' = \bar{c}_{p_1}' + 0,2244 \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 \frac{T}{2T} \left[\left(\frac{T}{273} \right)^2 - 1 \right] (p-1) \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3^\circ\text{C}} \quad (44)$$

2) Keskmised isohoorsed erisoojused

Keskmise kaalulise isohoorse erisoojuse $\bar{c}_v \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$ arvutamise seosest

$$c_v = \frac{1}{T} \int_{273}^T c_v dT$$

Asendades tõelise erisoojuse c_v tema avaldisega võrrandist (28), saame:

$$\bar{c}_v = \frac{1}{T} \int_{273}^T \left[c_{v_0} dT + \frac{27}{32} AR \frac{T_k^3}{p_k} p \frac{dT}{T^3} \right]$$

Pärast integreerimist ja lihtsaid teisendusi saame:

$$\bar{c}_v = \bar{c}_{v_0} + \frac{27}{32} AR \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 \frac{T}{2t} \left[\left(\frac{T}{273} \right)^2 - 1 \right] p \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (45)$$

Erisoojuse $\bar{c}_{v_1}$ kaudu avaldub võrrand:

$$\bar{c}_v = \bar{c}_{v_1} + \frac{27}{32} AR \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 \frac{T}{2t} \left[\left(\frac{T}{273} \right)^2 - 1 \right] (p-1) \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (46)$$

Võrrandid keskmiste molekulaarsete ja mahuliste isohoorsete erisoojuste jaoks avalduvad:

$$\bar{c}_v = \bar{c}_{v_1} + 1,676 \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 \frac{T}{2t} \left[\left(\frac{T}{273} \right)^2 - 1 \right] (p-1) \frac{\text{kcal}}{\text{kmol}^\circ\text{C}} \quad (47)$$

ja

$$\bar{c}'_v = \bar{c}'_{v_1} + 0,07848 \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 \frac{T}{2t} \left[\left(\frac{T}{273} \right)^2 - 1 \right] (p-1) \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3^\circ\text{C}} \quad (48)$$

Võrranditest nähtub, et ka samanimeliste keskmiste erisoojuste puhul moodustab rõhust tingitud korrektsioon isohoorsetel erisoojustel ühe kolmandiku isobaarsete omast, s.o.

$$\Delta \bar{c}_v = \frac{1}{3} \Delta \bar{c}_p \quad (49)$$

3) Keskmiste isobaarsete ja isohoorsete erisoojuste vahe

Kaaluliste erisoojuste vahe $\bar{c}_p - \bar{c}_v$ saame, kui võrrandi (41) võrdsetest lahutame võrrandi (45) võrdsed. Pärast tavalisi tehteid saame lõpliku seose kujul:

$$\bar{c}_p - \bar{c}_v = AR + \frac{54}{32} AR \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 \frac{T}{2t} \left[\left(\frac{T}{273} \right)^2 - 1 \right] p \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (50)$$

Molekulaarsete ja mahuliste erisoojuste vahed võrrandi (50) põhjal avalduvad kujul:

$$\bar{c}_p - \bar{c}_v = 1,986 + 3,3514 \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 \frac{T}{2t} \left[\left(\frac{T}{273} \right)^2 - 1 \right] p \frac{\text{kcal}}{\text{kmol}^\circ\text{C}} \quad (51)$$

ja

$$\bar{c}'_p - \bar{c}'_v = 0,0886 + 0,1496 \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^{\frac{7}{2}} \left[\left(\frac{T}{273} \right)^2 - 1 \right] p \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3 \text{OC}} \quad (52)$$

§ 4. Tõelised erisoojused Wohli karakter- võrrandi järgi

1) Tõeline isobaarne kaaluline erisoojus $c_p \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}}$.

Et määrata võrrandisse (1) kuuluv osatuletis $\left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2} \right)_p$, ilmutame Wohli poolt antud gaasi karakterivõrrandist (15) ki-
lomahu v , s.o.

$$v = \frac{RT}{p} + B + Cp - Dp^2$$

Võrrandi diferentseerimine temperatuuri järgi $p = \text{konst.}$ puhul annab:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = \frac{R}{p} + \frac{\partial B}{\partial T} + \frac{\partial C}{\partial T} p - \frac{\partial D}{\partial T} p^2$$

$$\left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2} \right)_p = \frac{\partial^2 B}{\partial T^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial T^2} p - \frac{\partial^2 D}{\partial T^2} p^2 \quad (53)$$

Seoste (16) ja (17) alusel

$$\frac{\partial B}{\partial T} = 2 \frac{b}{T^3}$$

$$\frac{\partial^2 B}{\partial T^2} = -6 \frac{b}{T^4} = -\frac{6 \cdot 24}{15} \frac{v_k T_k^2}{T^4} = -\frac{6 \cdot 24}{15} \frac{1}{T} \frac{v_k}{T_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3$$

Et seose (14) põhjal

$$\frac{v_k}{T_k} = \frac{4}{15} \frac{R}{p_k}$$

siis

$$\frac{\partial^2 B}{\partial T^2} = -\frac{6 \cdot 24}{15} \frac{4}{15} \frac{1}{T} \frac{R}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 = -2,56 \frac{R}{T} \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3$$

Samu seoseid kasutades:

$$\frac{\partial C}{\partial T} = - \frac{10}{3} \frac{c}{T^{13/3}}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 C}{\partial T^2} &= \frac{130}{9} \frac{c}{T^{16/3}} = \frac{130}{9} \cdot \frac{64}{225} \cdot \frac{v_k}{T_k} \frac{1}{p_k} \frac{1}{T} \left(\frac{T_k}{T} \right)^{13/3} = \\ &= \frac{130 \cdot 64 \cdot 4}{9 \cdot 225 \cdot 15} \frac{R}{T} \frac{1}{p_k^2} \left(\frac{T_k}{T} \right)^{13/3} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial T^2} = 1,0958 \frac{R}{T} \frac{1}{p_k^2} \left(\frac{T_k}{T} \right)^{13/3}$$

$$\frac{\partial D}{\partial T} = - \frac{13}{3} \frac{d}{T^{16/3}}$$

$$\frac{\partial^2 D}{\partial T^2} = \frac{208}{9} \frac{d}{T^{19/3}} = \frac{208}{9} \cdot \frac{64}{3375} \frac{v_k T_k^{13/3}}{p_k^2 T^{19/3}} =$$

$$\frac{208 \cdot 64}{9 \cdot 3375} \frac{v_k}{T_k} \frac{1}{p_k^2} \frac{1}{T} \left(\frac{T_k}{T} \right)^{16/3} = \frac{208 \cdot 64 \cdot 4}{9 \cdot 3375 \cdot 15} \frac{R}{T} \frac{1}{p_k^3} \left(\frac{T_k}{T} \right)^{16/3}$$

$$\frac{\partial^2 D}{\partial T^2} = 0,116868 \frac{R}{T} \frac{1}{p_k^3} \left(\frac{T_k}{T} \right)^{16/3}$$

Järelikult osatuletis $\left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2} \right)_p$ avaldub lõplikul kujul valemist (53)

$$\left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2} \right)_p = - \frac{R}{T} \left[2,56 \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 - 1,0958 \frac{1}{p_k^2} \left(\frac{T_k}{T} \right)^{13/3} + 0,116868 \frac{1}{p_k^3} \left(\frac{T_k}{T} \right)^{16/3} \right]$$

See asendus võrrandisse (1) tehtud, integreerime ja saame erisoojuse võrrandi $c_p \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$ lõplikul kujul:

$$c_p = c_{p_0} + AR \left[\frac{2,56}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 - \frac{0,548}{p_k^2} \left(\frac{T_k}{T} \right)^{13/3} + \frac{0,03896}{p_k^3} \left(\frac{T_k}{T} \right)^{16/3} \right] \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (54)$$

2) Tõeline isobaarne molekulaarne eri-
soojus $C_p \frac{\text{kcal}}{\text{kmol}^\circ\text{C}}$

Korrutades võrrandi (54) võrdseid gaasi molekulaarkaalu-

ja kuna $\Delta R\mu = 1,986$, saame

$$C_p = C_{p_0} + 5,084 \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T}\right)^3 p - 1,086 \frac{1}{p_k^2} \left(\frac{T_k}{T}\right)^{13/3} p^2 + \\ + 0,07737 \frac{1}{p_k^3} \left(\frac{T_k}{T}\right)^{16/3} p^3 \frac{\text{kcal}}{\text{kmol}^\circ\text{C}} \quad (55)$$

3) Tõeline isobaarne mahuline erisoojus

$$c_p' \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3^\circ\text{C}}$$

Jagamisel kilomoolmahuga normaalingimustel tuleneb võrrandist (55):

$$c_p' = c_{p_0}' + 0,227 \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T}\right)^3 p - 0,0486 \frac{1}{p_k^2} \left(\frac{T_k}{T}\right)^{13/3} p^2 + \\ + 0,00345 \frac{1}{p_k^3} \left(\frac{T_k}{T}\right)^{16/3} p^3 \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3^\circ\text{C}} \quad (56)$$

Rõhul 1 atm ja temperatuuril T tõeline mahuline erisoojus

$$c_{p_1}' = c_{p_0}' + 0,227 \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T}\right)^3 \cdot 1 - 0,0486 \frac{1}{p_k^2} \left(\frac{T_k}{T}\right)^{13/3} \cdot 1 + \\ + 0,00345 \frac{1}{p_k^3} \left(\frac{T_k}{T}\right)^{16/3} \cdot 1 \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3^\circ\text{C}} \quad (57)$$

Lahutades võrrandi (56) võrdsetest võrrandi (57) võrdsed, saame:

$$c_p' = c_{p_1}' + 0,227 \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T}\right)^3 (p-1) - 0,0486 \frac{1}{p_k^2} \left(\frac{T_k}{T}\right)^{13/3} (p^2-1) + \\ + 0,00345 \frac{1}{p_k^3} \left(\frac{T_k}{T}\right)^{16/3} (p^3-1) \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3^\circ\text{C}} \quad (58)$$

kus p_k ja p on füüsikalistes atmosfäärides.

Analoogiliselt võib teisendada ka kaalulisi (54) ja molekulaarseid (55) erisoojuse võrrandeid c_{p_1} ja c_{p_1} abil.

§ 5. Keskmised isobaarsed erisoojused

Wohli võrrandi järgi

1) Keskmine molekulaarne erisoojus $\bar{C}_p$ $\frac{\text{kcal}}{\text{kmol}^\circ\text{C}}$

Asetades keskmise molekulaarse, erisoojuse avaldisse

$$\bar{C}_p = \frac{1}{T} \int_{273}^T C_p dT$$

võrrandist (55) tõelise erisoojuse C_p , saame

$$\begin{aligned} \bar{C}_p = & \frac{1}{T} \int_{273}^T C_{p_0} dT + 5,084 \frac{T_k^3}{p_k} \frac{p}{T} \int_{273}^T \frac{dT}{T^3} - \\ & - 1,088 \frac{T_k^{43/3}}{p_k^2} \frac{p^2}{T} \int_{273}^T \frac{dT}{T^{43/3}} + 0,07737 \frac{T_k^{46/3}}{p_k^3} \frac{p^3}{T} \int_{273}^T \frac{dT}{T^{46/3}} \quad \frac{\text{kcal}}{\text{kmol}^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

mis p rast integreerimist ja m ningaid teisendusi saab kuju:

$$\begin{aligned} \bar{C}_p = & \bar{C}_{p_0} + \frac{2,542}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 \frac{T}{T} \left[\left(\frac{T}{273} \right)^2 - 1 \right] p - \\ & - \frac{0,3264}{p_k^2} \left(\frac{T_k}{T} \right)^{43/3} \frac{T}{T} \left[\left(\frac{T}{273} \right)^{40/3} - 1 \right] p^2 + \\ & + \frac{0,017854}{p_k^3} \left(\frac{T_k}{T} \right)^{46/3} \frac{T}{T} \left[\left(\frac{T}{273} \right)^{43/3} - 1 \right] p^3 \quad \frac{\text{kcal}}{\text{kmol}^\circ\text{C}} \end{aligned} \quad (59)$$

2) Keskmine mahuline erisoojus $\bar{c}_p'$ $\frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3^\circ\text{C}}$

Jagades võrrandi (59) liikmed kilomoolmahuga normaaltin-
gimustel, saame:

$$\begin{aligned} \bar{c}_p' = & \bar{c}_{p_0}' + \frac{0,1135}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 \frac{T}{T} \left[\left(\frac{T}{273} \right)^2 - 1 \right] p - \\ & - \frac{0,01457}{p_k^2} \left(\frac{T_k}{T} \right)^{43/3} \frac{T}{T} \left[\left(\frac{T}{273} \right)^{40/3} - 1 \right] p^2 + \\ & + \frac{0,000797}{p_k^3} \left(\frac{T_k}{T} \right)^{46/3} \frac{T}{T} \left[\left(\frac{T}{273} \right)^{43/3} - 1 \right] p^3 \quad \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3^\circ\text{C}} \end{aligned} \quad (60)$$

Analoogiliselt võrrandile (58) avaldub ka keskmise erisoojuse võrrand (60) erisoojuse $\bar{c}_{p_4}$ kaudu kujul:

$$\begin{aligned}\bar{c}_p' = & \bar{c}_{p_4}' + \frac{0,1135}{p_k} \left(\frac{T_k}{T}\right)^3 \frac{T}{t} \left[\left(\frac{T}{273}\right)^2 - 1\right] (p - 1) - \\ & - \frac{0,01457}{p_k^2} \left(\frac{T_k}{T}\right)^{13/3} \frac{T}{t} \left[\left(\frac{T}{273}\right)^{10/3} - 1\right] (p^2 - 1) + \\ & + \frac{0,000797}{p_k^3} \left(\frac{T_k}{T}\right)^{16/3} \frac{T}{t} \left[\left(\frac{T}{273}\right)^{13/3} - 1\right] (p^3 - 1) \quad \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3\text{OC}} \quad (61)\end{aligned}$$

Anname võrrandile lihtsama kuju. Selleks märgime:

$$A = \frac{0,1135}{p_k} \left(\frac{T_k}{T}\right)^3 \frac{T}{t} \left[\left(\frac{T}{273}\right)^2 - 1\right] \quad (62)$$

$$B = \frac{0,01457}{p_k^2} \left(\frac{T_k}{T}\right)^{13/3} \frac{T}{t} \left[\left(\frac{T}{273}\right)^{10/3} - 1\right] \quad (63)$$

$$D = \frac{0,000797}{p_k^3} \left(\frac{T_k}{T}\right)^{16/3} \frac{T}{t} \left[\left(\frac{T}{273}\right)^{13/3} - 1\right] \quad (64)$$

Siis

$$\bar{c}_p' = \bar{c}_{p_4}' + A(p-1) - B(p^2-1) + D(p^3-1) \quad (65)$$

kus rõhust tingitud korrektsioonliikmeks on

$$\Delta \bar{c}_p' = A(p-1) - B(p^2-1) + D(p^3-1) \quad (66)$$

Koefitsientide A, B ja D väärtused sõltuvad vaid temperatuurist, mis tehniliste gaaside jaoks on antud tabelis V. Samade gaaside keskmised erisoojused $\bar{c}_{p_4}'$ on esitatud tabelis II.

Näide 3. Arvutame CO₂ keskmised erisoojused $\bar{c}_p'$ $\frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3\text{OC}}$ temperatuuril 0°C kuni 200°C vastavalt rõhkudele 10, 20, 30, 40, 50, jne. Berthelot' ja Wohli karaktervõrrandite põhjal tuletatud erisoojuste võrrandite (44) ja (65) järgi.

Tabelist I leiame, et süsihappugaasi kriitilised parameetrid ja gaasi konstant on $p_k = 73,08 \text{ atm}$; $t_k = 31,04^\circ\text{C}$;

$v_k = 2,143 \cdot 10^{-3}$ ja $R = 19,27$. Seega CO_2 kriitiline koefitsient on

$$\frac{R \cdot T_k}{p_k v_k} = \frac{19,27 \cdot 304,04}{73,08 \cdot 10^4 \cdot 2,143 \cdot 10^{-3}} = 3,744$$

mis on samane Wohli olekuvõrrandiga, kuid erineb Berthelot' võrrandi omast. Arvestades temperatuuride suhtega $\frac{T}{T_k} = \frac{473}{304} = 1,55$, on võrrand (44) kasutatav kuni CO_2 kriitilise rõhuni s.o. rõhuni 73 atm. Kuni selle rõhuni arvutusandmed ei peaks suuremal määral erinema võrrandiga (65) tehtud arvutuste tulemustest.

Lahendus

Tabelist II: temperatuurile 200°C vastab keskmine erisoojus

$$\bar{c}'_{p,\text{CO}_2} = 0,431 \text{ kcal/nm}^3\text{C}$$

Tabelist V : temperatuurile 200°C vastavad koefitsiendid $A = 2,0 \cdot 10^{-3}$, $B = 5,4 \cdot 10^{-6}$ ja $D = 4,8 \cdot 10^{-9}$. Võrrandi (65) põhjal

$$\begin{aligned} \bar{c}'_p = 0,431 + 2,0 \cdot 10^{-3}(p-1) - 5,4 \cdot 10^{-6}(p^2-1) + \\ + 4,8 \cdot 10^{-9}(p^3-1) \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3\text{C}} \end{aligned}$$

Võrrandi (44) järgi temperatuuri juures 200°C

$$\begin{aligned} \bar{c}'_p = 0,431 + 0,2244 \cdot \frac{1}{73} \left(\frac{304}{473} \right)^3 \frac{473}{400} \left[\left(\frac{473}{273} \right)^2 - 1 \right] (p-1) = \\ = 0,431 + 0,00193(p-1) \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3\text{C}} \end{aligned}$$

Võrrandite (44) ja (65) järgi tehtud arvutused on koondatud tabelisse A.

T a b e l A

CO₂ keskmised isobaarsed mahulised erisoojused $\bar{c}_p$ $\frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3\text{OC}}$ 0°C kuni 200°C, arvutatuna võrrandite (44) ja (65) järgi.

Rõhk atm	10	20	30	40	50	60	70	100	200
Võrrandi (44) järgi $\bar{c}_p$ $\frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3\text{OC}}$	0,4484	0,4677	0,4870	0,5063	0,5256	0,5449	0,5642	0,6221	0,8151
Võrrandi (65) järgi $\bar{c}_p$ $\frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3\text{OC}}$	0,4485	0,4668	0,4842	0,5007	0,5161	0,5306	0,5441	0,580	0,645
Δ $\frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3\text{OC}}$	-0,0001	0,0009	0,0028	0,0056	0,0095	0,0143	0,0201	0,0421	0,170
Erisoojuste erinevus % %	-	0,19	0,57	1,12	1,84	2,70	3,69	7,25	26,37

Erinevus % on antud võrrandi (44) järgi arvutatud erisoojuste suhtes. Õigemaks tuleb pidada võrrandiga (65) arvutatud erisoojust, sest Wohli karaktervõrrandi kriitiline koefitsient ühtub CO₂ kriitilise koefitsiendiga.

Näide 4. Arvutame CO keskmise isobaarse erisoojuse võrrandite (44) ja (65) järgi rõhkudel 25, 100 ja 200 atm temperatuuri intervallis 0°C kuni 400°C.

Lahendus.

Vingugaasi kriitilised parameetrid tabeli I järgi on $T_k = 133^\circ\text{K}$, $p_k = 34,56 \text{ atm}$, $v_k = 3,322 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$, $R = 30,29 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$
Kriitiline koefitsient on

$$\frac{RT_k}{p_k v_k} = \frac{30,29 \cdot 133}{34,56 \cdot 10^4 \cdot 3,322 \cdot 10^{-3}} = 3,51$$

Seega CO kriitiline koefitsient haarab nii võrrandi (44) kui ka (65) piirkonda. Võrrandi (44) järgi erisoojus on

$$\begin{aligned} \bar{c}_p' &= \bar{c}_{p_i}' + 0,2244 \frac{1}{p_k} \left(\frac{T_k}{T} \right)^3 \frac{T}{2\epsilon} \left[\left(\frac{T}{273} \right)^2 - 1 \right] (p-1) = \\ &= \bar{c}_{p_i}' + 0,2244 \frac{1}{34,56} \left(\frac{133}{273} \right)^3 \frac{673}{800} \left[\left(\frac{673}{273} \right)^2 - 1 \right] (p-1) \end{aligned}$$

Tabeli II järgi $\bar{c}_{p_i}' \Big|_0^{400} = 0,318 \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3^\circ\text{C}}$. Seega

$$\bar{c}_p' = 0,318 + 0,000213 (p-1) \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3^\circ\text{C}} \quad (a)$$

Rõhk 25 atm

$$\begin{aligned} \bar{c}_p' &= 0,3180 + 0,000213(25-1) = \\ &= 0,3180 + 0,0051 = 0,3231 \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

Rõhk 100 atm

$$\begin{aligned} \bar{c}_p' &= 0,3180 + 0,000312 (100-1) = \\ &= 0,3180 + 0,0211 = 0,3391 \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

Rõhk 200 atm

$$\begin{aligned} \bar{c}_p' &= 0,3180 + 0,000312 (200-1) = \\ &= 0,3180 + 0,0424 = 0,3604 \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

Võrrandi (65) koefitsiendid tabeli V järgi vastavalt temperatuuri intervallile $0 - 400^{\circ}\text{C}$ on $A = 2,25 \cdot 10^{-3}$; $B = 3,65 \cdot 10^{-7}$; $D = 3,25 \cdot 10^{-10}$. Seega

$$\begin{aligned}\bar{c}_p' &= \bar{c}_{p_1}' + A(p-1) - B(p^2-1) + D(p^3-1) = \\ &= 0,3180 + 2,25 \cdot 10^{-3}(p-1) - 3,65 \cdot 10^{-7}(p^2-1) + \\ &\quad + 3,25 \cdot 10^{-10}(p^3-1)\end{aligned}$$

Rõhk 25 atm

$$\begin{aligned}\bar{c}_p' &= 0,3180 + 2,25 \cdot 24 \cdot 10^{-3} - 3,65 \cdot 624 \cdot 10^{-7} + 3,25 \cdot 15624 \cdot 10^{-10} = \\ &= 0,3180 + 0,0054 - 0,0002 + 0,0000 = 0,3180 + 0,0052 = \\ &= 0,3232 \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3 \text{ } ^{\circ}\text{C}}\end{aligned}$$

Rõhk 100 atm

$$\begin{aligned}\bar{c}_p' &= 0,3280 + 2,25 \cdot 99 \cdot 10^{-3} - 3,65 \cdot 9999 \cdot 10^{-7} + 3,25 \cdot 999999 \cdot 10^{-10} = \\ &= 0,3280 + 0,0223 - 0,0036 + 0,0003 = 0,3280 + 0,0190 = \\ &= 0,3270 \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3 \text{ } ^{\circ}\text{C}}\end{aligned}$$

Rõhk 200 atm

$$\begin{aligned}\bar{c}_p' &= 0,3180 + 2,25 \cdot 199 \cdot 10^{-3} - 3,65 \cdot 39999 \cdot 10^{-7} + \\ &\quad + 3,25 \cdot 79999999 \cdot 10^{-10} = \\ &= 0,3180 + 0,0448 - 0,0146 + 0,0026 = 0,3180 + 0,0328 = \\ &= 0,3508 \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3 \text{ } ^{\circ}\text{C}}\end{aligned}$$

Arvutatud erisoojuste võrdlus on antud järgnevas tabelis B.

Kõrgemate rõhkude erisoojuste arvutamisel annab täpsemaid tulemusi võrrand (65), kuid tõelistest väärtustest siiski suuremaid.

Täpsemad reaalseste gaaside erisoojuste c_p ja c_v võrrandid on antud professor dr. M.P.Vukalovitsi poolt ^{x)}. Tavaliseks praktiliseks käsitlemiseks on need võrrandid siiski

x) Термодинамические свойства воды и водяного пара, 6-е издание.

liiga keerukad ning on samuti kehtivad gaaside suhtes kaugel küllastusolekust, kus ei tarvitse eriti arvestada gaasimolekulide assotsiatsioone.

T a b e l l B

CO keskmised isobaarsed mahulised erisoojused $\frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3\text{ }^{\circ}\text{C}}$ 0°C kuni 400°C arvutatuna võrrandite (44) ja (65) järgi:

Rõhk atm	25	100	200
Võrrandi (44) järgi $\bar{c}_p' \quad \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3\text{ }^{\circ}\text{C}}$	0,3231	0,3391	0,3604
Võrrandi (65) järgi $\bar{c}_p' \quad \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3\text{ }^{\circ}\text{C}}$	0,3232	0,3370	0,3508
$\Delta \quad \frac{\text{kcal}}{\text{nm}^3\text{ }^{\circ}\text{C}}$	-0,0001	0,0021	0,0096
Erisoojuste erinevus % võrrandi (65) suhtes	- 0,03	0,62	2,73

T a b e l I

Tehniliste gaaside karaktereerd suurused

Gaasi nimetus	Valem	Molekulaar-kaal $\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$	Moolimaht $\frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}}$	Eri-kaal $\frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3}$	Gaasikons- tant R $\frac{\text{kgm}}{\text{kgOC}}$	Sula- mis- tapp $^{\circ}\text{C}$	Sula- mis- jus $\frac{\text{keel}}{\text{kg}}$	Kee- mis- tapp 760 torri $^{\circ}\text{C}$	Aurus- tumis- soojus 760 torri $\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$	Kriitilised para- meetrid			
										t_k	p_k	$v_k \cdot 10^3$ $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	$\frac{R^{\text{RT}}_k}{p_k v_k}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Vesinik	H ₂	2,016	22,432	0,089	421,0	-259,2	13,9	-252,8	107,9	-239,9	12,78	32,27	3,37
Heelium	He	4,003	22,43	0,178	212,0	-271,0	1,0	-268,9	4,9	-267,9	2,26	14,50	3,22
Argoon	Ar	39,944	22,391	1,784	21,26	-189,3	7,03	-185,9	38,99	-122,4	48,01	1,92	3,48
Hapnik	O ₂	32,000	22,394	1,429	26,50	-218,8	3,33	-183,0	50,96	-118,2	49,76	2,325	3,53
Lämmastik	N ₂	28,016	22,404	1,250	30,26	-210,0	6,15	-195,8	47,58	-147,1	33,49	3,218	3,54
Ohk (O ₂ +N ₂)		28,966	22,402	1,293	29,27	-213,0	-	-192,2	49,0	-140,7	37,17	3,227	3,22
Kloor	Cl ₂	70,914	22,06	3,214	11,97	-103,0	45,0	-34,1	68,8	+143,9	75,99	1,745	3,77
Kloor- vesinik	HCl	36,465	22,246	1,639	23,25	-115,5	13,4	-85,0	107	+51,4	83,05	1,64	5,54
Lämmastik- hapend	NO	30,008	22,391	1,340	28,20	-163,7	18,31	-151,8	109,7	-94	63,98	1,923	4,10
Ammoniaak	NH ₃	17,032	22,079	0,771	49,79	-77,7	79,36	-33,4	327,7	+132,4	111,51	4,255	4,25
Veeaur	H ₂ O	18,016	(22,4)	(0,804)	47,07	0,0	79,4	+100,0	538,9	+374,23	218,43	3,26	4,27
Vingugaas	CO	28,010	22,408	1,250	30,29	-205,1	7,13	-191,5	51,55	-140,2	34,56	3,322	3,51
Süsihapu- gaas	CO ₂	44,010	22,262	1,977	19,27	-56,6	43,2	-78,4	137	+31,04	73,08	2,143	3,74

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Väävliis- hapend	SO ₂	64,06	21,89	2,927	13,24	- 75,7	27,61	(subl.) - 10,0	93,4	+157,5	77,83	1,91	3,84
Väävliis- vesinik	H ₂ S	34,08	22,15	1,538	24,60	- 85,5	16,67	-60,5	130,8	+100,4	89,01	-	-
Metaan	CH ₄	16,042	22,379	0,717	52,90	-182,6	14,0	-161,4	131	-82,9	45,83	6,176	6,65
Etaan	C ₂ H ₆	30,068	22,168	1,356	28,21	-183,2	22,73	-89,0	129	+35,27	48,98	4,93	3,60
Propaan	C ₃ H ₈	44,094	21,840	2,019	18,74	-187,1	16,7	-42,2	107,0	+96,81	42,01	4,42	3,73
Etüleen	C ₂ H ₄	28,052	22,257	1,260	30,25	-169,2	28,55	-103,7	125,4	+9,5	50,72	4,628	3,64
Atsetü- leen	C ₂ H ₂	26,036	22,236	1,171	32,59	-81,8	-	-83,6 (subl.)	198	+35,9	62,63	4,330	3,71
Bensool	C ₆ H ₆	78,108	22,0	3,55	10,65	+5,45	30,40	+80,0	94,4	+288,5	48,01	3,290	3,79

T a b e l II ^{x)}

Keskmisel mahulised isobaarsed erisoojused
 $c_p \frac{\text{kcal}}{\text{nm } ^\circ\text{C}}$ arvates 0°C kuni temperatuurini $t^\circ\text{C}$
 vastavalt rõhule 760 torri spektroskoopiliste
 uurimuste järgi

$t^\circ\text{C}$	H_2	He	Ar	O_2	N_2	Ohk	Cl_2
0	0,306	0,222	0,222	0,313	0,311	0,310	0,370
100	0,309	0,222	0,222	0,3145	0,311	0,311	0,374
200	0,310	0,222	0,222	0,319	0,312	0,313	0,378
300	0,311	0,222	0,222	0,324	0,314	0,315	0,381
400	0,3115	0,222	0,222	0,329	0,3165	0,318	0,385
500	0,312	0,222	0,222	0,334	0,319	0,321	0,387
600	0,313	0,222	0,222	0,339	0,322	0,324	0,390
700	0,314	0,222	0,222	0,343	0,325	0,327	0,392
800	0,315	0,222	0,222	0,347	0,328	0,331	0,394
900	0,316	0,222	0,222	0,350	0,331	0,334	0,396
1000	0,3175	0,222	0,222	0,353	0,334	0,337	0,397
1200	0,321			0,359	0,340	0,343	
1500	0,3266			0,366	0,347	0,350	
2000	0,336			0,375	0,356	0,358	
2500	0,345			0,383	0,363		
3000	0,353			0,390	0,3685		

x)

H.Faltini raamatust "Technische Wärmelehre".

$^{\circ}\text{C}$	HCl	NO	CH_3	H_2O	CO	CO_2	SO_2
0	0,309	0,320	0,380	0,356	0,311	0,388	0,419
100	0,311	0,320	0,391	0,358	0,311	0,409	0,435
200	0,312	0,320	0,406	0,362	0,312	0,431	0,453
300	0,314	0,322	0,424	0,368	0,315	0,449	0,469
400	0,316	0,326	0,438	0,372	0,318	0,464	0,484
500	0,318	0,329	0,454	0,378	0,321	0,480	0,497
600	0,320	0,333	0,469	0,384	0,3245	0,492	0,506
700	0,322	0,337	0,484	0,390	0,328	0,503	0,515
800	0,324	0,340	0,499	0,397	0,331	0,513	0,523
900	0,326	0,343	0,514	0,403	0,335	0,522	0,530
1000	0,329	0,3464	0,530	0,410	0,338	0,530	0,536
1200		0,352	0,558	0,422	0,344	0,544	0,544
1500		0,358	0,594	0,439	0,350	0,560	0,557
2000		0,367		0,464	0,359	0,580	0,570
2500		0,373		0,485	0,366	0,594	0,578
3000		0,377		0,501	0,371	0,603	0,584

$^{\circ}\text{C}$	H_2S	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_2H_4	C_2H_2	C_6H_6
0	0,372	0,369	0,536	0,726	0,452	0,457	0,775
100	0,374	0,386	0,592	0,824	0,503	0,491	0,940
200	0,378	0,420	0,659	0,922	0,556	0,522	1,10
300	0,384	0,451	0,710	1,020	0,605	0,547	1,24
400	0,392	0,481	0,790	1,118	0,650	0,567	1,38
500	0,402	0,509	0,842	1,216	0,691	0,584	1,47
600	0,411	0,537			0,728	0,601	1,57
700	0,419	0,557			0,762	0,616	1,66
800	0,428	0,588			0,798	0,630	1,73
900	0,436	0,615			0,823	0,642	1,80
1000	0,444	0,632			0,851	0,655	1,86
1200	0,459						
1500	0,476						
2000	0,500						
2500	0,517						
3000	0,531						

T a b e l I I I

Keskmised molekulaarsed isobaarsed erisoojused
(kcal/kmol^oC), arvates 0^oC kuni temperatuurini t^oC,
spektroskoopiliste uurimuste järgi (Raamatust A.C.Дс-
тержемский, "Техническая термодинамика", Госэнер-
гоиздат, 1960 г.

°C	O ₂	N ₂	H ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	Өhk
0	6,993	6,975	6,841	6,958	8,614	2,979	6,960
100	7,058	6,978	6,909	6,972	9,142	8,034	6,962
200	7,152	6,996	6,946	7,005	9,610	8,118	6,996
300	7,265	7,030	6,963	7,056	9,997	8,224	7,051
400	7,380	7,081	6,976	7,121	10,332	8,342	7,117
500	7,490	7,143	6,989	7,196	10,650	8,469	7,190
600	7,593	7,212	7,007	7,274	10,945	8,602	7,266
700	7,686	7,283	7,029	7,353	11,205	8,740	7,342
800	7,771	7,354	7,005	7,430	11,438	8,881	7,415
900	7,843	7,423	7,086	7,503	11,774	9,023	7,486
1000	7,916	7,490	7,120	7,572	11,837	9,166	7,553
1100	7,979	7,554	7,158	7,637	12,010	9,307	7,616
1200	8,036	7,614	7,198	7,698	12,166	9,445	7,675
1300	8,090	7,670	7,240	7,755	12,310	9,581	7,731
1400	8,142	7,724	7,283	7,808	12,442	9,711	7,784
1500	8,191	7,774	7,326	7,857	12,564	9,838	7,833
1600	8,237	7,821	7,370	7,904	12,677	9,961	7,879
1700	8,281	7,865	7,414	7,947	12,780	10,079	7,923
1800	8,323	7,906	7,458	7,987	12,877	10,193	7,965
1900	8,364	7,945	7,501	8,025	12,967	10,300	8,004
2000	8,404	7,982	7,544	8,061	13,051	10,404	8,041
2100	8,443	8,017	7,585	8,094	13,130	10,503	8,076
2200	8,480	8,050	7,626	8,126	13,203	10,599	8,110
2300	8,517	8,081	7,666	8,156	13,273	10,691	8,142
2400	8,552	8,110	7,705	8,184	13,340	10,779	8,172
2500	8,587	8,139	7,754	8,211	13,402	10,863	8,202
2600	8,620	8,165	7,708	8,236	13,461	10,943	8,230
2700	8,652	8,191	7,817	8,260	13,516	11,021	8,256
2800	8,684	8,215	7,852	8,283	13,573	-	8,282
2900	8,714	8,238	7,886	8,305	13,624	-	8,306
3000	8,745	8,260	7,920	8,326	13,670	-	8,330
	32,00	28,016	2,0154	28,010	44,010	18,016	28,966
	22,394	22,404	22,432	22,408	22,262	22,41	22,402

T a b e l I V

Gaaside keskmised kaalulised isobaarsed erisoojused (kcal/kg^oC), arvates 0^oC kuni temperatuurini t^oC spektroskoopiliste uurimuste järgi. (Raamatust A.С.Дистержембский, "Техническая термодинамика", Госэнергоиздат, 1960)

t ^o C	O ₂	N ₂	H ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	Ohk
0	0,219	0,243	3,394	0,249	0,196	0,443	0,240
100	0,221	0,249	3,428	0,249	0,208	0,446	0,240
200	0,224	0,250	3,447	0,250	0,218	0,451	0,242
300	0,227	0,251	3,455	0,252	0,227	0,457	0,243
400	0,231	0,253	3,461	0,254	0,235	0,463	0,246
500	0,234	0,255	3,468	0,257	0,242	0,470	0,248
600	0,237	0,257	3,477	0,260	0,249	0,478	0,251
700	0,240	0,260	3,488	0,263	0,255	0,485	0,254
800	0,243	0,263	3,501	0,265	0,260	0,493	0,256
900	0,245	0,265	3,516	0,268	0,265	0,501	0,259
1000	0,247	0,267	3,533	0,270	0,269	0,509	0,261
1100	0,249	0,270	3,552	0,273	0,273	0,517	0,263
1200	0,251	0,272	3,572	0,275	0,277	0,524	0,265
1300	0,253	0,274	3,592	0,277	0,280	0,532	0,267
1400	0,254	0,276	3,614	0,279	0,283	0,539	0,269
1500	0,256	0,278	3,635	0,281	0,286	0,546	0,270
1600	0,257	0,279	3,657	0,282	0,288	0,553	0,272
1700	0,259	0,281	3,679	0,284	0,291	0,560	0,274
1800	0,260	0,282	3,701	0,255	0,293	0,566	0,275
1900	0,261	0,284	3,722	0,287	0,295	0,572	0,276
2000	0,263	0,285	3,743	0,288	0,297	0,578	0,278
2100	0,264	0,286	3,764	0,289	0,298	0,583	0,279
2200	0,265	0,287	3,784	0,290	0,300	0,588	0,280
2300	0,266	0,288	3,804	0,291	0,302	0,593	0,281
2400	0,267	0,290	3,823	0,292	0,303	0,598	0,282
2500	0,268	0,291	3,847	0,293	0,305	0,603	0,283
2600	0,269	0,291	3,860	0,294	0,306	0,607	0,284
2700	0,270	0,292	3,879	0,295	0,307	0,611	0,285
2800	0,271	0,293	3,896	0,296	0,309	-	0,286
2900	0,272	0,294	3,913	0,297	0,310	-	0,287
3000	0,273	0,285	3,930	0,297	0,311	-	0,288

T a b e l V

Keskmise mahulise isobaarse erisoojuse korrekt-siooni liikme (vt.võrrand 65) koefitsientide A, B ja D väärtused vastavalt Wohli olekuvõrrandile,

$$\begin{aligned} \text{s.o.} \quad \bar{c}'_p &= \bar{c}'_p + \Delta \bar{c}'_p \\ \Delta \bar{c}'_p &= A(p-1) - B(p^2-1) + D(p^3-1) \end{aligned}$$

Tabeli andmete kasutamisel tuleb rõhk võtta füüsi-kalistes atmosfäärides (H.Faltin, Technische Wärme-lehre).

$^{\circ}\text{C}$	H_2	He	Ar	O_2	N_2	õhk	Cl_2
A 0	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{-7}$	$8,0 \cdot 10^{-4}$	$8,3 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$7,0 \cdot 10^{-4}$	$10,7 \cdot 10^{-3}$
20	2,9	6,6	7,2	7,5	6,1	6,3	9,6
50	2,5	5,9	6,2	6,5	5,2	5,4	8,3
100	2,0	4,7	5,0	5,3	4,2	4,4	6,8
200	1,5	3,3	3,6	3,7	3,0	3,2	4,8
300	1,1	2,6	2,8	2,9	2,4	2,5	3,7
500	0,8	1,8	1,9	2,0	1,6	1,7	2,5
B 0	$34,0 \cdot 10^{-3}$	$37,7 \cdot 10^{-11}$	$15,6 \cdot 10^{-7}$	$17,4 \cdot 10^{-7}$	$15,7 \cdot 10^{-7}$	$16,0 \cdot 10^{-7}$	$55,2 \cdot 10^{-6}$
20	27,8	30,8	12,4	14,3	12,9	13,1	45,1
50	23,1	25,6	11,3	11,8	10,7	10,9	37,4
100	17,5	19,4	8,6	9,0	8,1	8,2	28,4
200	11,6	12,9	5,7	6,0	5,4	5,5	18,9
300	8,2	9,1	4,0	4,2	3,8	3,9	13,3
500	5,0	5,6	2,5	2,6	2,3	2,4	8,1
D 0	$22,6 \cdot 10^{-10}$	$22,3 \cdot 10^{-10}$	$12,8 \cdot 10^{-10}$	$13,8 \cdot 10^{-10}$	$15,2 \cdot 10^{-10}$	$14,2 \cdot 10^{-10}$	$7,9 \cdot 10^{-8}$
20	18,4	10,4	11,3	12,4	11,6	11,6	6,4
50	14,6	14,4	8,2	8,9	9,8	9,2	5,1
100	10,9	10,7	6,1	6,7	7,3	6,8	3,8
200	6,4	6,3	3,6	3,9	4,3	4,0	2,2
300	4,8	4,8	2,7	2,9	3,2	3,0	1,7
500	2,8	2,8	1,6	1,7	1,9	1,8	1,0

°C	HCl	NO	NH ₃	H ₂ O	CO	CO ₂	SO ₂
A 0	4,6·10 ⁻³	10,1·10 ⁻⁴	6,7·10 ⁻³	13,8·10 ⁻³	7,6·10 ⁻⁴	4,8·10 ⁻³	11,4·10 ⁻³
20	4,1	9,1	6,0	12,5	6,9	3,9	10,3
50	3,6	7,8	5,2	10,8	5,9	3,4	8,9
100	2,9	6,4	4,2	8,8	4,8	2,7	7,2
200	2,1	4,6	3,0	6,3	3,4	2,0	5,2
300	1,6	3,5	2,4	4,9	2,7	1,5	4,0
500	1,1	2,4	1,6	3,3	1,8	1,0	2,7
B 0	15,3·10 ⁻⁶	19,4·10 ⁻⁷	22,4·10 ⁻⁶	43,8·10 ⁻⁶	18,7·10 ⁻⁷	5,7·10 ⁻⁶	57,9·10 ⁻⁶
20	12,5	15,8	18,3	35,8	15,3	12,8	47,4
50	10,4	13,1	15,2	29,7	12,7	10,6	39,3
100	7,9	10,0	11,5	22,5	9,6	8,1	29,8
200	5,2	6,6	7,7	15,0	6,4	5,4	19,8
300	3,7	4,7	5,4	10,5	4,5	3,8	13,9
500	2,3	2,9	3,3	6,4	2,8	2,3	8,5
D 0	15,3·10 ⁻⁹	14,3·10 ⁻¹⁰	20,6·10 ⁻⁹	34,4·10 ⁻⁹	19,3·10 ⁻¹⁰	17,1·10 ⁻⁹	8,5·10 ⁻⁸
20	12,5	11,6	16,8	28,1	15,7	13,9	6,9
50	9,9	9,2	13,3	22,2	12,4	11,0	5,5
100	7,3	6,9	9,9	16,5	9,3	8,2	4,1
200	4,3	4,0	5,8	9,7	5,4	4,8	2,4
300	3,3	3,0	4,4	7,3	4,1	3,6	1,8
500	1,9	1,8	2,6	4,3	2,4	2,1	1,1

°C	H ₂ S	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₆ H ₆
A 0	6,5·10 ⁻³	16,8·10 ⁻⁴	6,7·10 ⁻³	13,5·10 ⁻³	5,0·10 ⁻³	5,3·10 ⁻³	4,1·10 ⁻²
20	5,9	15,2	6,1	12,2	4,5	4,8	3,7
50	5,1	13,1	5,2	10,5	3,9	4,1	3,2
100	4,1	10,6	4,2	8,5	3,1	3,3	2,6
200	3,0	7,6	3,0	6,1	2,2	2,4	1,9
300	2,3	5,9	2,4	4,7	1,7	1,8	1,5
500	1,6	4,0	1,6	3,2	1,2	1,3	1,0
B 0	24,4·10 ⁻⁶	50,1·10 ⁻⁷	35,8·10 ⁻⁶	10,2·10 ⁻⁵	22,3·10 ⁻⁶	22,4·10 ⁻⁶	48,2·10 ⁻⁵
20	19,9	41,0	29,3	8,3	18,2	18,3	39,4
50	16,5	34,0	24,3	6,9	15,1	15,2	32,7
100	12,5	25,8	18,4	5,2	11,5	11,5	24,8
200	8,4	17,2	12,3	3,5	7,6	7,7	16,5
300	5,9	12,1	8,6	2,4	5,4	5,4	11,6
500	3,6	7,4	5,3	1,5	3,3	3,3	7,1
D 0	25,4·10 ⁻⁹	53,0·10 ⁻¹⁰	59,0·10 ⁻⁹	24,2·10 ⁻⁸	33,0·10 ⁻⁹	28,6·10 ⁻⁹	15,1·10 ⁻⁷
20	20,8	43,2	48,2	19,7	26,9	23,4	12,3
50	16,4	34,2	38,1	15,6	21,2	18,5	9,8
100	12,2	25,4	28,4	11,6	15,8	13,8	7,3
200	7,2	14,9	16,7	6,8	9,3	8,1	4,3
300	5,4	11,3	12,6	5,1	7,0	6,1	3,2
500	3,2	6,6	7,3	3,0	4,1	3,6	1,9

T a b e l' VI

Õelised mahulised erisoojused ($\text{kcal}/\text{nm}^3\text{C}^\circ$) vastavalt temperatuurile $^\circ\text{C}$ ja rõhule atm.

Vesinik (H_2)

(Demingi ja Shupe järgi)

$^\circ\text{C}$ atm	-75°	-50°	-25°	0°	50°	100°	200°	300°	400°	500°
1	0,290	0,297	0,302	0,305	0,309	0,311	0,312	0,312	0,313	0,315
25	0,294	0,300	0,304	0,307	0,310	0,312	0,312	0,313	0,314	0,315
50	0,297	0,302	0,306	0,308	0,311	0,313	0,313	0,313	0,314	0,316
75	0,300	0,305	0,308	0,310	0,312	0,314	0,313	0,313	0,314	0,316
100	0,303	0,307	0,309	0,311	0,313	0,315	0,314	0,314	0,314	0,316
150	0,308	0,310	0,312	0,314	0,315	0,316	0,315	0,314	0,314	0,316
200	0,312	0,314	0,315	0,316	0,316	0,318	0,316	0,315	0,315	0,316
300	0,319	0,319	0,319	0,319	0,318	0,319	0,316	0,315	0,316	0,317
400	0,323	0,322	0,321	0,320	0,320	0,320	0,317	0,316	0,316	0,317
500	0,325	0,324	0,323	0,323	0,321	0,321	0,318	0,316	0,317	0,317
600	0,326	0,325	0,324	0,324	0,322	0,322	0,319	0,317	0,317	0,317
800	0,329	0,328	0,326	0,326	0,323	0,323	0,319	0,317	0,318	0,318
1000	0,331	0,329	0,327	0,327	0,324	0,323	0,319	0,318	0,318	0,318
1100	0,332	0,330	0,328	0,328	0,324	0,323	0,319	0,318	0,318	0,318
1200	0,332	0,330	0,328	0,328	0,324	0,323	0,319	0,318	0,318	0,318

Lämmastik (N_2)
(Deningi ja Shupe järgi)

$^{\circ}C$ atm	-70°	-50°	-25°	0°	50°	100°	200°	300°	400°	500°
1	0,311	0,311	0,311	0,311	0,311	0,312	0,315	0,320	0,326	0,334
20	0,334	0,331	0,327	0,324	0,320	0,317	0,318	0,321	0,328	0,334
40	0,361	0,352	0,344	0,338	0,328	0,322	0,321	0,324	0,330	0,335
60	0,391	0,375	0,362	0,352	0,335	0,327	0,324	0,326	0,331	0,336
80	0,421	0,396	0,379	0,366	0,343	0,332	0,327	0,328	0,332	0,337
100	0,490	0,419	0,396	0,379	0,350	0,337	0,330	0,329	0,333	0,338
200	0,541	0,479	0,442	0,415	0,376	0,357	0,341	0,337	0,339	0,341
300	0,542	0,482	0,449	0,425	0,390	0,371	0,350	0,343	0,344	0,344
400	0,538	0,481	0,445	0,421	0,395	0,380	0,357	0,348	0,346	0,346
500	0,536	0,480	0,441	0,416	0,396	0,385	0,362	0,352	0,349	0,349
600	0,534	0,476	0,436	0,413	0,395	0,386	0,366	0,356	0,352	0,351
800	0,532	0,474	0,432	0,409	0,393	0,387	0,373	0,360	0,355	0,353
1000	0,531	0,471	0,430	0,406	0,391	0,391	0,378	0,363	0,356	0,355
1100	0,529	0,470	0,428	0,404	0,390	0,395	0,380	0,364	0,357	0,356
1200	0,525	0,466	0,424	0,401	0,389	0,400	0,382	0,365	0,358	0,356

Õhk

(Roebucki järgi)

°C atm	-100°	-75°	-50°	-25°	0°	25°	50°
1	0,3084	0,3090	0,3095	0,3102	0,3110	0,3116	0,3123
20	0,3570	0,340	0,331	0,325	0,322	0,322	0,321
60		0,412	0,373	0,355	0,343	0,340	0,337
100		0,509	0,422	0,385	0,367	0,357	0,351
140		0,572	0,460	0,410	0,386	0,372	0,364
180			0,485	0,429	0,400	0,383	0,375
220			0,489	0,439	0,412	0,391	0,382

°C atm	75°	100°	150°	200°	250°	280°	
1	0,3128	0,3134	0,3147	0,3159	0,3172	0,3178	
20	0,320	0,319	0,319	0,318	0,319	0,320	
60	0,334	0,331	0,327	0,325	0,325	0,322	
100	0,347	0,343	0,336	0,332	0,328	0,326	
140	0,358	0,352	0,344	0,337	0,332	0,329	
180	0,367	0,361	0,350	0,342	0,336	0,332	
220	0,374	0,367	0,355	0,346	0,339	0,335	

Metaan

/Eucken'i ja Bergeri järgi/

°C atm	-120°	-100°	-80°	-60°	-40°	-20°	0°	20°	30°
1	0,356	0,356	0,357	0,359	0,362	0,367	0,373	0,382	0,384
2	0,368	0,368	0,369	0,372	0,375	0,379	0,383	0,392	0,396
4	0,381	0,381	0,382	0,384	0,387	0,392	0,395	0,405	0,409
6	0,393	0,393	0,394	0,396	0,399	0,404	0,407	0,417	0,421
8	0,405	0,406	0,407	0,409	0,411	0,416	0,420	0,429	0,433
10	0,418	0,418	0,419	0,421	0,424	0,429	0,432	0,441	0,446

Vingugaas

/Demingi ja Shupe järgi/

°C	-70	-50	-25	0	50	100	150	200	300	400
I	0,3107	0,3107	0,3107	0,3108	0,3112	0,3112	0,3139	0,3162	0,3225	0,330
25	0,339	0,334	0,329	0,326	0,322	0,320	0,320	0,321	0,326	0,333
50	0,372	0,359	0,348	0,341	0,332	0,328	0,326	0,326	0,330	0,335
75	0,410	0,386	0,368	0,356	0,342	0,335	0,332	0,330	0,332	0,337
100	0,450	0,413	0,386	0,370	0,351	0,341	0,337	0,334	0,334	0,339
150	0,516	0,458	0,416	0,393	0,366	0,352	0,344	0,341	0,339	0,342
200	0,552	0,485	0,435	0,407	0,376	0,359	0,351	0,346	0,343	0,345
300	0,569	0,497	0,445	0,417	0,385	0,368	0,359	0,354	0,349	0,350
400	0,558	0,490	0,442	0,416	0,387	0,372	0,364	0,359	0,354	0,354
500	0,546	0,484	0,438	0,415	0,387	0,373	0,366	0,361	0,357	0,358
600	0,548	0,485	0,438	0,413	0,385	0,372	0,367	0,362	0,360	0,362
800	0,557	0,490	0,439	0,410	0,382	0,370	0,366	0,364	0,364	0,367
1000	0,561	0,493	0,440	0,408	0,379	0,367	0,365	0,365	0,367	0,373
1100	0,564	0,494	0,440	0,408	0,377	0,365	0,364	0,365	0,368	0,374
1200	0,566	0,495	0,440	0,407	0,375	0,364	0,364	0,365	0,369	0,375

T a b e l VII^{x)}

Tõelised isobaarsed molekulaarsed erisoojused
kcal/kmol^oC spektroskoopiliste uurimuste järgi

^o C	O ₂	N ₂	H ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	õhk
0	6,993	6,975	6,841	6,958	8,614	7,978	6,960
100	7,138	6,989	6,962	6,996	9,640	8,104	6,980
200	7,370	7,045	6,991	7,088	10,482	8,313	7,094
300	7,610	7,160	7,003	7,232	11,059	8,564	7,234
400	7,836	7,313	7,027	7,408	11,607	8,835	7,401
500	8,024	7,472	7,065	7,582	12,204	9,120	7,564
600	8,179	7,635	7,123	7,750	12,605	9,416	7,724
700	8,308	7,783	7,198	7,899	12,925	9,718	7,867
800	8,411	7,916	7,284	8,029	13,204	10,018	7,992
900	8,499	8,036	7,380	8,143	13,44	10,306	8,104
1000	8,574	8,143	7,485	8,244	13,64	10,585	8,204
1100	8,638	8,236	7,589	8,331	13,82	10,847	8,290
1200	8,690	8,315	7,691	8,405	13,96	11,091	8,362
1300	8,785	8,383	7,791	8,468	14,10	11,31	8,435
1400	8,844	8,446	7,889	8,524	14,22	11,52	8,497
1500	8,901	8,501	7,984	8,575	14,32	11,71	8,552
1600	8,958	8,551	8,074	8,620	14,40	11,89	8,602
1700	9,013	8,594	8,159	8,658	14,48	12,05	8,648
1800	9,073	8,630	8,239	8,690	14,55	12,18	8,687
1900	9,133	8,664	8,315	8,721	14,62	12,30	8,728
2000	9,190	8,696	8,386	8,749	14,68	12,43	8,765
2100	9,244	8,726	8,453	8,776	14,74	12,55	8,799
2200	9,296	8,754	8,515	8,801	14,79	12,67	8,832
2300	9,344	8,779	8,574	8,824	14,83	12,76	8,862
2400	9,400	8,802	8,630	8,844	14,87	12,84	8,889
2500	9,434	8,824	8,684	8,864	14,91	12,92	8,916
2600	9,474	8,842	8,735	8,881	14,95	13,00	8,938
2700	9,512	8,859	8,783	8,896	14,99	13,08	8,959
2800	9,553	8,875	8,829	8,910	15,03		8,990
2900	9,594	8,890	8,873	8,924	15,07		9,001
3000	9,634	8,904	8,912	8,936	15,11		9,020

^{x)} Д.О.Чернобаев и Животовский, "Теплоемкость газов",
Издательство Академии наук УССР, Киев, 1938

Sisukord

Sissejuhatus	lk. 3
§ 1. Reaalsete gaaside erisoojused ja oleku- ehk karaktervõrrandid	" 3
§ 2. Tõelised erisoojused Berthelot' võrrandi järgi	
1) Tõeline isobaarne kaaluline erisoojus c_p kcal/kg ⁰ C	" 7
2) Tõeline isobaarne molekulaarne eri- soojus C_p kcal/kmol ⁰ C	" 8
3) Tõeline mahuline isobaarne erisoojus c_p' kcal/nm ³⁰ C	" 9
4) Tõeline kaaluline isohoorne erisoojus c_v kcal/kg ⁰ C	" 11
5) Tõeline molekulaarne isohoorne eri- soojus C_v kcal/kmol ⁰ C	" 13
6) Tõeline mahuline isohoorne erisoojus c_v' kcal/nm ³⁰ C	" 13
7) Tõeliste isobaarsete ja isohoorsete erisoojuste vahe	" 14
§ 3. Keskmised erisoojused Berthelot' võrrandi järgi	
1) Keskmised isobaarsed erisoojused ...	" 14
2) Keskmised isohoorsete erisoojused ...	" 15
3) Keskmiste isobaarsete ja isohoorsete erisoojuste vahe	" 16

§ 4. Tõelised erisoojused Wohli karakter-
võrrandi järgi.

- 1) Tõeline isobaarne kaaluline erisoojus lk. 17
- 2) Tõeline isobaarne molekulaarne eri-
soojus C_p kcal/kmol⁰C " 18
- 3) Tõeline isobaarne mahuline erisoojus
 c_p' kcal/nm³0C " 19

§ 5. Keskmised isobaarsed erisoojused Wohli
võrrandi järgi

- 1) Keskmise molekulaarne erisoojus
 $\bar{C}_p$ kcal/kmol⁰C " 20
- 2) Keskmise mahuline erisoojus $\bar{c}_p'$ kcal/nm³0C 20

L i s a

Tabel I. Tehniliste gaaside karakterised

suurused lk. 27

Tabel II. Keskmised mahulised isobaarsed eri-

soojused c_p' arvates ⁰C kuni tempe-
ratuurini ⁰C vastavalt rõhmle-
760 torri spektroskoopiliste uurimuste
järgi lk. 29

Tabel III. Keskmised molekulaarsed isobaarsed

erisoojused (kcal/kmol⁰C) arvates ⁰C
kuni temperatuurini ⁰C, spektroskoo-
piliste uurimust järgi lk. 31

Tabel IV. Gaaside keskmised kaalulised iso-

baarsed erisoojused (kcal/kg⁰C), arva-
tes ⁰C kuni temperatuurini ⁰C spekt-
roskoopiliste uurimuste järgilk. 32

Tabel V. Keskmise mahulise isobaarse erisoo-
juse korrektsiooni liikme koefitsien-
tide A, B ja D väärtused vastavalt
Wohli olekuvõrrandile lk. 33

Tabel VI. Tõelised mahulised erisoojused
(kcal/nm³°C) vastavalt temperatuurile
°C ja rõhule atm. lk. 35

Tabel VII. Tõelised isobaarsed molekulaar-
sed erisoojused kcal/kmol°C spektros-
koopiliste uurimuste järgi lk. 39

Vastutav toimetaja A. Kull

TPI rotaprint, 1961. Trükipoognaid 2,75.
Tiraaž 500 eks. MB-05446. Tellimise nr. 79.
Hind rbl. -.10.

Hind rbl. -.10

A

24763

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 01129627 6