

氣體混合物 分離手冊

И. И. 蓋彼令
Г. М. 傑利克松 編著
Л. Л. 拉波波特

高等教育出版社

氣體混合物分離手冊

深度冷凍法

И. И. 蓋彼令
Г. М. 傑利克松 編著
Л. Л. 拉波波特
Н. И. 蓋彼令 主編
藥 蒨 譯



電子學研究所

高等教育出版社

本手冊係根據蘇聯國立化學科技書籍出版社 (Государственное научно-техническое издательство химической литературы) 出版的蓋彼令 (И. И. Гельперн), 傑利克松 (Г. М. Зеликсон) 和拉波波特 (Л. Л. Рапопорт) 所編“氣體混合物分離手冊” (Справочник по разделению газовых смесей) 一書 1953 年版譯出的。

本手冊採列基本物理化學常數、相平衡數據、各種物質在低溫下的性態、以及為設計深度冷凍設備所需的生產參數。

本手冊敘述了分離空氣、天然氣、焦爐氣、熱解和裂化氣體的工業裝置的最重要的流程，並敘述了基本冷凍循環及其熱力學特性。

本手冊係供服務於深度冷凍法氣體分離業務範圍的工程師和技術員使用。

本手冊也是深度冷凍工學專業學生的參考書。

本手冊由太原工學院樊鼎翻譯。

本手冊於翻譯期間承太原工學院殷開元副院長勉勵；校對期間承大連化學廠專家工作組同志們將所譯部份譯稿寄來供譯者參考，並承劉春陽、鄒樂年、郭安貞、延登琳、梁允照及石興華等同志關心與協助，譯者特在此致謝。

氣體混合物分離手冊

И. И. 蓋彼令等編著

樊 鼎 譯

高等教育出版社出版

北京琉璃廠一七〇號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇五四號)

商務印書館上海廠印刷 新華書店總經售

書號 433(技 5) 開本 850×1168 1/32 印張 12 14/16 插頁 6 字數 332,000

一九五五年十二月上海第一版

一九五六年五月上海第二次印刷

印數 1,001—3,000

定價 2.41

目 錄

原序	5
凡例	6
國際原子量表(1952年)	7
I. 工業氣體的物理性質	9
壓力、密度和氣化熱	16
氣體的狀態方程式,可壓縮性和微分節流效應	45
熱容	68
導熱率	75
粘度和表面張力	86
II. 相的平衡組成	107
二組份物系	107
三組份物系	160
液-固兩相物系的平衡	187
溶解度	194
III. 深度冷凍的基本循環,這些循環在 $T-S$ 圖中的表示法及 熱力學特性	207
具有一次節流的循環	208
具有一次節流與氨預冷的循環	210
具有節流與中壓循環氣的循環	211
具有兩種壓力的循環	213
具有在膨脹機內中溫膨脹的循環	215
具有在膨脹機內兩次膨脹的循環	215
具有在膨脹機內高溫膨脹的循環	216
具有回流在膨脹機內膨脹的循環	218
具有在膨脹機內低溫膨脹的卡皮查低壓循環	219
具有在膨脹機內膨脹的蓋爾西和烏修金循環	220

IV. 工業裝置的流程	227
由空氣中製取氧和氮	227
由空氣中製取氮	272
由空氣中製取氫	281
由天然氣中製取氫	284
焦爐氣的分離	290
水煤氣的分離	311
氫化氣體的分離	312
乙烷熱解氣體的分離	320
煤油熱解氣體的分離	322
裂化氣體的分離	330
氣態碳氫化合物的分離	334
V. 製備深度冷凍器械的材料	339
金屬與合金的物理性質	340
金屬及合金在低溫下的機械性質	350
製備深度冷凍器械的金屬、合金與焊料	374
VI. 液化氣體及壓縮氣體의 儲存與輸送	379
氣化裝置	383
容器、儲氣瓶與容量	383
VII. 附錄(輔助圖表)	388
參考書刊	403
中俄名詞對照表	405

氣體混合物分離手冊

深度冷凍法

И. И. 蓋彼令
Г. М. 傑利克松 編著
Л. Л. 拉波波特
Н. И. 蓋彼令 主編
藥 蒨 譯



電子學研究所

高等教育出版社

本手冊係根據蘇聯國立化學科技書籍出版社 (Государственное научно-техническое издательство химической литературы) 出版的蓋彼令 (И. И. Гельперин), 傑利克松 (Г. М. Зеликсон) 和拉波波特 (Л. Л. Рапопорт) 所編“氣體混合物分離手冊” (Справочник по разделению газовых смесей) 一書 1953 年版譯出的。

本手冊採列基本物理化學常數、相平衡數據、各種物質在低溫下的性態、以及為設計深度冷凍設備所需的生產參數。

本手冊敘述了分離空氣、天然氣、焦爐氣、熱解和裂化氣體的工業裝置的最重要的流程，並敘述了基本冷凍循環及其熱力學特性。

本手冊係供服務於深度冷凍法氣體分離業務範圍的工程師和技術員使用。

本手冊也是深度冷凍工學專業學生的參考書。

本手冊由太原工學院樊鼎翻譯。

本手冊於翻譯期間承太原工學院殷開元副院長勉勵；校對期間承大連化學廠專家工作組同志們將所譯部份譯稿寄來供譯者參考，並承劉春陽、鄒樂年、郭安貞、延登琳、梁允照及石興華等同志關心與協助，譯者特此致謝。

氣體混合物分離手冊

И. И. 蓋彼令等編著

樊 鼎 譯

高等教育出版社出版

北京琉璃廠一七〇號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇五四號)

商務印書館上海廠印刷 新華書店總經售

書號 433(技 5) 開本 850×1168 1/32 印張 12 14/16 插頁 6 字數 332,000

一九五五年十二月上海第一版

一九五六年五月上海第二次印刷

印數 1,001—3,000

定價 2.41

目 錄

原序	5
凡例	6
國際原子量表(1952年)	7
I. 工業氣體的物理性質	9
壓力、密度和氣化熱	16
氣體的狀態方程式,可壓縮性和微分節流效應	45
熱容	68
導熱率	75
粘度和表面張力	86
II. 相的平衡組成	107
二組份物系	107
三組份物系	160
液-固兩相物系的平衡	187
溶解度	194
III. 深度冷凍的基本循環,這些循環在 $T-S$ 圖中的表示法及 熱力學特性	207
具有一次節流的循環	208
具有一次節流與氨預冷的循環	210
具有節流與中壓循環氣的循環	211
具有兩種壓力的循環	213
具有在膨脹機內中溫膨脹的循環	215
具有在膨脹機內兩次膨脹的循環	215
具有在膨脹機內高溫膨脹的循環	216
具有回流在膨脹機內膨脹的循環	218
具有在膨脹機內低溫膨脹的卡皮查低壓循環	219
具有在膨脹機內膨脹的蓋爾西和烏修金循環	220

IV. 工業裝置的流程	227
由空氣中製取氧和氮	227
由空氣中製取氮	272
由空氣中製取氫	281
由天然氣中製取氫	284
焦爐氣的分離	290
水煤氣的分離	311
氫化氣體的分離	312
乙烷熱解氣體的分離	320
煤油熱解氣體的分離	322
裂化氣體的分離	330
氣態碳氫化合物的分離	334
V. 製備深度冷凍器械的材料	339
金屬與合金的物理性質	340
金屬及合金在低溫下的機械性質	350
製備深度冷凍器械的金屬、合金與焊料	374
VI. 液化氣體及壓縮氣體의 儲存與輸送	379
氣化裝置	383
容器、儲氣瓶與容量	383
VII. 附錄(輔助圖表)	388
參考書刊	403
中俄名詞對照表	405

原 序

在關於深度冷凍的理論與實際應用方面的參考材料中，多半是研究空氣分離的過程。但是在近 20~25 年間，用深度冷凍的方法來分離各種氣體混合物已有了很廣泛的發展。煤油熱解氣體、煤的氫化氣體、乙烷熱解氣體以及焦爐氣的分離都有着鉅大的意義。

然而，文獻中關於各種氣體混合物的物理化學性質方面的資料是不夠系統的，致使研究與設計工作難於進行。

在本手冊中，這些取自不同來源的（為計算用深度冷凍法分離氣體混合物的過程所必需的）資料，被用一定的次序與圖表的型式編排，表達了出來。

開始援引了最重要的工業氣體的物理常數，然後列出（低溫下）在二組份與三組份物系中關於相的平衡組成的資料以及深度冷凍基本循環的熱力學特性。其次在手冊中提供了氣體分離的工業裝置流程，並且主要地敘述了獲得實際應用的工藝流程。在本書的最後，對於某些金屬及合金在低溫下的物理與機械性質作了簡單的敘述。

手冊中的文字部分是由工藝流程的簡述與使用圖表所必需的說明所組成的。

編者遠不認為本身工作已詳盡無遺，並對一切指教與修正預致謝忱。

編 者

凡 例

- c —比熱
 c_p —恆壓比熱, [卡/克·度]、
 [仟卡/仟克·度]
 c_v —恆容比熱, [卡/克·度]、
 [仟卡/仟克·度]
 d —比重, (對於空氣 $d=1$)
 f —逸度, [大氣壓(標準)], [仟克/厘米²]
 G —重量, [克], [仟克]
 I —焓, [卡/克], [仟卡/仟克]
 K —壓縮的熱力係數, [厘米²/仟克(力)]
 P —壓力, [大氣壓(標準)], [毫米]汞柱、
 [仟克(力)/厘米²]
 P_K —臨界壓力, [大氣壓(標準)]
 R —氣體常數, [卡/度·摩爾]
 r —氣化潛熱, [仟卡/仟克]
 T —絕對溫度, [°K]
 T_K —臨界溫度, [°K]
 t —溫度, [°C]
 S —熵, [卡/度]
 V —體積, [厘米³], [米³]
 v —比容, [厘米³/克], [米³/仟克]
 α —線膨脹係數
 α —氣體的逸度係數
 μ —微分節流效應, [度/大氣壓(標準)]
- β —體積膨脹係數
 γ —重度
 φ —對比體積
 λ —導熱係數, [卡/厘米·秒·度]、
 [仟卡/米·小時·度]
 ν —運動粘度係數, [厘米²/秒], [米²/秒]
 π —對比壓力
 ρ —密度, [克/厘米³], [仟克/米³]
 ρ —壓縮度, $\left(\frac{P_1 V_1}{P_0 V_0}\right)$
 ρ_K —臨界密度, [克/厘米³]
 σ —表面張力, [達因/厘米]
 τ —對比溫度
 η —動力粘度係數, [達因·秒/厘米²],
 [克/厘米·秒], [仟克·秒/米²]
 ama —絕對氣壓, [仟克(力)/厘米²]
 amu —標準氣壓、物理氣壓, 760 [毫米]汞柱
 am —工業氣壓, [仟克(力)/厘米²], 735.53
 [毫米]汞柱
 amu —表壓, [仟克(力)/厘米²]
 κl —仟克·力
 κ —仟克·質量
 絕對零度 = 273.165 [°C]

國際原子量

(1952 年)

元 素 名 稱		化學符號	原子序數	原子量	元 素 名 稱		化學符號	原子序數	原子量
中	俄				中	俄			
氮	Азот	N	7	14.008	碘	Иод	I	53	126.91
銅	Актиний	Ac	89	227	銩	Иридий	Ir	77	193.1
鋁	Алюминий	Al	13	26.97	鐳	Иттербий	Yb	70	173.04
鋇	Америций	Am	95	[243]*	釷	Иттрий	Y	39	88.92
氬	Аргон	Ar	18	39.944	鎘	Кадмий	Cd	48	112.41
釷	Астатин	At	85	[210]*	鉀	Калий	K	19	39.100
鈾	Афиний	Ap	99	[247]	鐳	Калифорний	Cf	98	[246]*
銀	Барий	Ba	56	137.36	鈣	Кальций	Ca	20	40.08
鉍	Бериллий	Be	4	9.013	氧	Кислород	O	8	16
鉛	Беркелий	Bk	97	[245]*	鈷	Кобальт	Co	27	58.94
硼	Бор	B	5	10.82	矽	Кремний	Si	14	28.06
溴	Бром	Br	35	79.916	氬	Криптон	Kr	36	83.80
鈳	Ванадий	V	23	50.95	氙	Ксенон	Xe	54	131.3
鉍	Висмут	Bi	83	209.00	錒	Кюрий	Cm	96	[243]
氫	Водород	H	1	1.0080	鐳	Лантан	La	57	138.92
鎢	Вольфрам	W	74	183.92	鋰	Литий	Li	3	6.940
釷	Гадолиний	Gd	64	156.9	銻	Лютеций	Lu	71	174.99
鋅	Галлий	Ga	31	69.72	鎂	Магний	Mg	12	24.32
鉛	Гафний	Hf	72	178.6	錳	Марганец	Mn	25	54.93
氮	Гелий	He	2	4.003	銅	Медь	Cu	29	63.54
銻	Германий	Ge	32	72.60	鉬	Молибден	Mo	42	95.95
鈾	Гольмий	Ho	67	164.94	砷	Мышьяк	As	33	74.91
鐳	Диспрозий	Dy	66	162.46	鈉	Натрий	Na	11	22.997
銻	Европий	Eu	63	152.0	釷	Неодим	Nd	60	144.27
鐵	Железо	Fe	26	55.85	氖	Неон	Ne	10	20.183
金	Золото	Au	79	197.2	鐳	Нептуний	Np	93	[237]*
銻	Индий	In	49	114.76	鎳	Никель	Ni	28	58.69

(續前)

元素名稱		化學符號	原子序數	原子量	元素名稱		化學符號	原子序數	原子量
中	俄				中	俄			
鈮	Ниобий	Nb	41	92.91	銻	Сурьма	Sb	51	121.76
錫	Олово	Sn	50	118.70	鉍	Таллий	Tl	81	204.39
鐵	Осний	Os	76	190.2	鉭	Тантал	Ta	73	180.88
鈳	Палладий	Pd	46	106.7	碲	Теллур	Te	52	127.61
鉑	Платина	Pt	78	195.23	鐳	Тербий	Tb	65	159.2
釷	Плутоний	Pu	94	[242]*	錒	Технеций	Tc	43	[99]*
釷	Полоний	Po	84	210	鈦	Титан	Ti	22	47.90
鐳	Празеодим	Pr	59	140.92	釷	Торий	Th	90	232.12
鐳	Протактиний	Pa	91	231	錒	Тулий	Tu	69	169.4
鐳	Радий	Ra	88	226.05	碳	Углерод	C	6	12.010
氮	Радон	Rn	86	222	鈾	Уран	U	92	238.07
銻	Рений	Re	75	186.31	磷	Фосфор	P	15	30.975
銻	Родий	Rh	45	102.91	鈣	Франций	Fr	87	[223]*
汞	Ртуть	Hg	80	200.61	氟	Фтор	F	9	19.00
銣	Рубидий	Rb	37	85.48	氯	Хлор	Cl	17	35.457
鈳	Рутений	Ru	44	101.7	鉻	Хром	Cr	24	52.01
釷	Самарий	Sm	62	150.43	銻	Цезий	Cs	55	132.91
鉛	Свинец	Pb	82	207.21	釷	Центрий	Ct	100	[248]
硒	Селен	Se	34	78.96	銻	Церий	Ce	58	140.13
硫	Сера	S	16	32.066	鋅	Цинк	Zn	30	65.38
銀	Серебро	Ag	47	107.880	鋯	Цирконий	Zr	40	91.22
銦	Скандий	Sc	21	44.96	鉺	Эрбий	Er	68	167.2
鋇	Стронций	Sr	38	87.63					

註：方括弧內的數字是元素的最穩定的同位素的質量數。星形符號表示人工製得的元素。

I. 工業氣體的物理性質

在表 1 中列出了各種溫度計的標度換算表,在表 2 中的是某些氣體的基本物理化學常數。

常數與溫度及壓力的關係列於相應的各節中。

在表 3~6 中列出了關於飽和蒸氣壓方面的數據。

當需要確定經驗數據以外的飽和蒸氣壓時,可以利用下列方程式

$$\lg P = -\frac{A}{T} + B.$$

係數 A 及 B 的數值列於表 8 及 9。

在表 7 中介紹了飽和蒸氣壓與溫度的關係曲線的比較準確的方程式。

溫度按照絕對溫標以凱氏度數 [$^{\circ}\text{K}$] 或以攝氏度數 [$^{\circ}\text{C}$] 量度之。

絕對零度取其等於 $273.165[^{\circ}\text{C}]$ 。

表 1. 各種溫度計標度的換算

國際溫標(攝氏)[$^{\circ}\text{C}$]	列氏溫標	華氏溫標	絕對溫標(凱氏)
n	$\frac{4}{5}n$	$\frac{9}{5}n+32$	$n+273.2$
$\frac{5}{4}n$	n	$\frac{9}{4}n+32$	$\frac{5}{4}n+273.2$
$\frac{5}{9}(n-32)$	$\frac{4}{9}(n-32)$	n	$\frac{5}{9}(n-32)+273.2$
$n-273.2$	$\frac{4}{5}(n-273.2)$	$\frac{9}{5}(n-273.2)+32$	n

此外,也按照華氏溫標 $[^{\circ}\text{F}]$ 與列氏溫標 $[^{\circ}\text{R}]$ 來量度溫度。

壓力以工業氣壓(1[大氣壓(工業)]=1[仟克(力)/厘米²]=735.53[毫米]汞柱)、物理氣壓(1[大氣壓(標準)]=1.033[仟克(力)/厘米²]=760[毫米]汞柱)、皮茲(пьеза, 1[皮茲]=1[斯坦/米²]=101.97[仟克(力)/米²])以及巴(бар, 1[巴]=1[達因/厘米²], 1[皮茲]=10⁴[巴])量度之。

表 12~14 列出了液化氣體的密度及與之平衡的飽和蒸氣的密度,還有氣化熱與溫度的關係。

密度之值是以物理單位表示的,而氣化熱則以[卡/克分子]表示之。

在圖 3~7 上是以工業單位表示的氣體重度之值,而在圖 9~13 上則是以工業單位[仟卡/仟克]表示的氣化熱之值。

密度(ρ)是任何物體的單位體積的質量。

在物理單位中,密度的因次為[仟克/米³],在工業單位中其因次為[仟克(力)·秒²/米⁴]。

重度(γ)是物體單位體積的重量。

當適當地選擇量度單位時,以物理單位表示的密度與以工業單位表示的重度在數值上是一致的:

$$\rho [\text{仟克-質量/米}^3] = \gamma [\text{仟克/米}^3]。$$

飽和蒸氣的重度與平衡液體重度之間存在着下列與溫度的關係:

$$y = \frac{\gamma_{\text{н}} + \gamma_{\text{ж}}}{2} = a + bt,$$

式中 $\gamma_{\text{н}}$ 及 $\gamma_{\text{ж}}$ —飽和蒸氣與平衡液體的重度, [克/厘米³];

t —溫度, $[^{\circ}\text{C}]$;

a 及 b —常數。

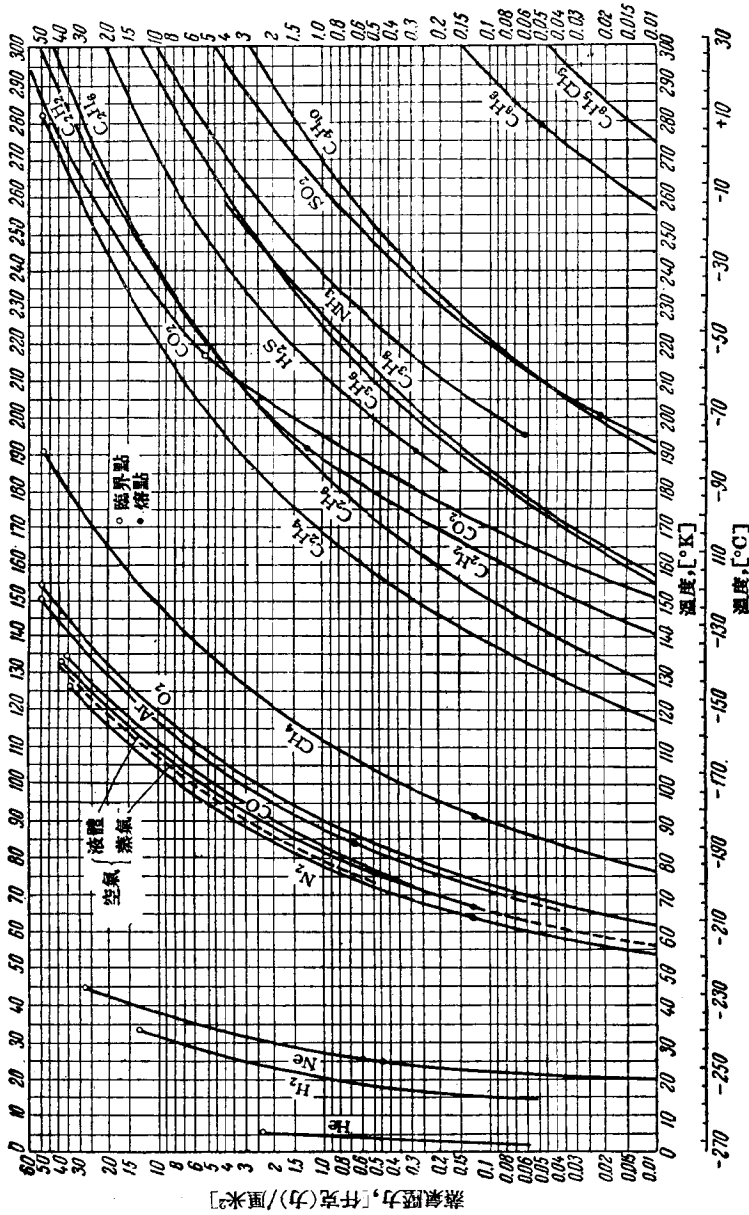


圖 1. 液化空氣的飽和蒸氣壓(參看表 3 及表 4)。

茲介紹某些氣體的 $y = a + bt$ 的關係如下:

氮
氫
氫
氫
氧
氮

$$\begin{aligned} y &= 0.022904 - 0.0019577t \\ y &= 0.20956 - 0.0026235t \\ y &= -0.06351 - 0.0003940t \\ y &= -0.40263 - 0.001762t \\ y &= 0.1608 - 0.002265t \\ y &= 1.6156 - 0.003377t \end{aligned}$$

表 2. 某些氣體的

氣 體	分 子 式	分 子 量	在 0 [°C] 及 760 [毫米] 汞 柱下的密度, [仟克/立升]	比 重
氮.....	N ₂	28.016	1.2507	0.9673
氨.....	NH ₃	17.032	0.771	0.5976
氫.....	Ar	39.944	1.784	1.3799
乙炔.....	C ₂ H ₂	26.036	1.173	0.9057
苯.....	C ₆ H ₆	78.11	—	—
正-丁烷.....	C ₄ H ₁₀	58.12	2.703	2.091
異丁烷.....	C ₄ H ₁₀	58.12	2.668	2.064
1-丁烯.....	C ₄ H ₈	56.10	—	—
反-2-丁烯.....	C ₄ H ₈	56.10	—	—
順-2-丁烯.....	C ₄ H ₈	56.10	—	—
氫.....	H ₂	2.016	0.0899	0.06952
水蒸汽.....	H ₂ O	18.02	0.805	0.5941
空氣.....	—	28.95	1.293	1
氦.....	He	4.003	0.1785	0.1381
氧.....	O ₂	32.000	1.429	1.1053
氪.....	Kr	83.7	3.708	2.89
氙.....	Xe	131.3	5.851	4.51
甲烷.....	CH ₄	16.042	0.7168	0.5545
氖.....	Ne	20.183	0.9002	0.695
一氧化氮.....	NO	30.008	1.3402	1.037
一氧化碳.....	CO	28.010	1.2504	0.9669
正-戊烷.....	C ₅ H ₁₂	72.15	—	—
丙烷.....	C ₃ H ₈	44.094	2.019	1.562
丙烯.....	C ₃ H ₆	42.078	1.915	1.481
二氧化硫.....	SO ₂	64.06	2.926	2.2635
硫化氫.....	H ₂ S	34.08	1.539	1.1906
二氧化碳.....	CO ₂	44.010	1.9769	1.5291
弗立安-11.....	CFCl ₃	137.4	6.14	4.748
弗立安-12.....	CF ₂ Cl ₂	120.9	5.39	4.168
弗立安-13.....	CF ₃ Cl	114.47	5.12	3.959
氯.....	Cl ₂	70.914	3.214	2.486
氯甲烷.....	CH ₃ Cl	50.49	2.3076	1.784
氯乙烷.....	C ₂ H ₅ Cl	64.5	—	—
乙烷.....	C ₂ H ₆	30.068	1.357	1.049
乙烯.....	C ₂ H ₄	28.052	1.260	0.9750