ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 8.999— 2021

Государственная система обеспечения единства измерений

СТАНДАРТНЫЕ СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

Моноксид углерода жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия, энтропия, изохорная и изобарная теплоемкости при температурах от 70 К до 500 К и давлениях до 100 МПа

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2021

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Главным научным метрологическим центром «Стандартные справочные данные о физических константах и свойствах веществ и материалов» (ГНМЦ «ССД»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 180 «Стандартные справочные данные о физических константах и свойствах веществ и материалов»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 25 мая 2021 г. № 433-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Стандартинформ, оформление, 2021

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Общие положения 1
4 Расширенные неопределенности расчетных значений стандартных справочных данных по свойствам моноксида углерода 3
Приложение А (обязательное) Основные физические параметры и коэффициенты уравнений для определения значений стандартных справочных данных по свойствам моноксида углерода 5
Приложение Б (обязательное) Таблицы контрольных стандартных значений термодинамических свойств моноксида углерода на кривой насыщения 6
Приложение В (обязательное) Таблицы контрольных стандартных значений термодинамических свойств моноксида углерода в однофазной области 8
Библиография 10

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Государственная система обеспечения единства измерений

СТАНДАРТНЫЕ СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

Моноксид углерода жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия, энтропия, изохорная и изобарная теплоемкости при температурах от 70 К до 500 К и давлениях до 100 МПа

State system for ensuring the uniformity of measurements. Standard reference data. Carbon monoxide, liquid and gaseous. Density, enthalpy, entropy, isochoric and isobaric heat capacities at temperatures from 70 K up to 500 K and pressures up to 100 MPa

Дата введения — 2021—12—01

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на жидкий и газообразный моноксид углерода и устанавливает методы расчетного определения значений стандартных справочных данных по плотности ρ, энтальпии h, энтропии s, изобарной теплоемкости c_p, изохорной теплоемкости c_v как в однофазных областях (газ, жидкость и флюид), так и на линии фазового перехода газ — жидкость (линии насыщения), а также значений давления на линии насыщения p_s.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 8.566 Государственная система обеспечения единства измерений. Межгосударственная система данных о физических константах и свойствах веществ и материалов. Основные положения

ГОСТ Р 8.614 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная служба стандартных справочных данных. Основные положения

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Общие положения

Стандартные справочные значения (ГОСТ Р 8.614, ГОСТ 8.566) ρ, h, s, c_p, c_v и p_s рассчитаны по единому для жидкой и газовой фаз фундаментальному уравнению состояния (ФУС) — зависимости свободной энергии (функции Гельмгольца) F от плотности ρ и температуры T:

$$\frac{F(\rho,T)}{RT} - f(\omega,\tau) = f_0(\omega,\tau) + f_r(\omega,\tau), \qquad (1)$$

Издание официальное

где f, f_0 и f_r — безразмерные полная свободная энергия, идеально-газовая и неидеальная составляющие свободной энергии соответственно;

ω — относительная плотность, $\omega = \rho/\rho_{кр}$;

τ — относительная температура, $\tau = T/T_{кр}$.

Значения плотности ($\rho_{кр}$) и температуры ($T_{кр}$) моноксида углерода в критической точке приведены в таблице А.1 приложения А.

Уравнение для идеально-газовой составляющей свободной энергии имеет следующий вид

$$f_0 = \ln(\omega) + a_1 + a_2\tau^{-1} + a_3\ln\left(\tau^{-1}\right) - \frac{a_4 T^{a_5}}{a_5(a_5+1)} + a_6\ln\left[1-\exp\left(-\delta_6 T^{-1}\right)\right]. \quad (2)$$

Коэффициенты $\{\alpha_i\}$ и параметры $\{\delta_i\}$ уравнения (2) приведены в таблице А.3 приложения А.

Уравнение для неидеальной составляющей свободной энергии имеет следующий вид

$$f_r = \sum_{j=1}^{12} b_j\varphi_j, \quad (3)$$

где

$$\varphi_j = \omega^{r_j}\tau^{t_j}\exp\left[g_j\omega^{l_j}\right]. \quad (4)$$

В формулах (3) и (4) b_j — коэффициенты уравнения состояния, значения которых вместе с показателями степеней r_j, t_j, l_j и параметрами g_j приведены в таблице А.2 приложения А.

Плотность ω в однофазных областях при заданных значениях давления p и температуры T определяют из решения следующего уравнения

$$\pi = \omega\tau(1 + A_0)/Z_{кр}, \quad (5)$$

где $\pi = p/p_{кр}$;

$z_{кр} = 10^3 p_{кр}/(\rho_{кр} R T_{кр})$.

Значения давления $p_{кр}$ и фактора сжимаемости $z_{кр}$ в критической точке, а также газовой постоянной R моноксида углерода приведены в таблице А1 приложения А.

Плотности газовой ω'' и жидкой ω' фаз на линии насыщения при заданной температуре T определяют из условий фазового равновесия в результате решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \pi(\tau,\omega') - \pi(\tau,\omega'') = 0; \\ \varphi_r(\tau,\omega') - \varphi_r(\tau,\omega'') = 0, \end{cases} \quad (6)$$

где $\varphi_r(\tau, \omega)$ — безразмерная неидеальная составляющая изобарно-изотермического потенциала (потенциала Гиббса)

$$\varphi_r = f_r + A_0 + \ln(\omega). \quad (7)$$

Давление на линии насыщения p_s определяют по формуле (5) для переменной ω''.

Энтальпию, энтропию, изобарную и изохорную теплоемкости как в однофазных областях (для T и ω), так и на линии насыщения (для T, ω' или T, ω''), вычисляют по следующим по формулам:

$$h = h_0 + A_3 RT; \quad (8)$$

$$s = s_0 + RA_4; \quad (9)$$

$$c_p = c_v + R(1 + A_2)^2/(1 + A_1); \quad (10)$$

$$c_v = c_{v0} + A_5 R, \quad (11)$$

где h_0, s_0, c_{v0} — энтальпия, энтропия и изохорная теплоемкость в идеально-газовом состоянии.

Термодинамические свойства в идеально-газовом состоянии определяют по формулам, полученным из $f_0(\tau, \omega)$ с привлечением табличных данных (см. [1]):

$$c_{v0} = R\left[a_3 + a_4 T^{a_5} + a_6 \Theta_6^2 E_6 D_6^{\,2}\right]; \tag{12}$$

$$h_0 = RT\left[1 + a_3 + a_2\tau^{-1} + \frac{a_4 T^{a_5}}{a_5 + 1} + a_6 \Theta_6 D_6^{-1} + \frac{\Delta h_0}{RT}\right], \tag{13}$$

$$s_0 = R\left\{a_3\left(1 - \ln\tau^{-1}\right) - a_1 + \frac{a_4 T^{a_5}}{a_5} + a_6\left[\Theta_6 D^{-1}{}_6 - \ln(D_6) + \Theta_6\right] + \frac{\Delta s_0}{R} - \ln\omega\right\}. \tag{14}$$

где $\Theta_6 = \delta_6\ T^{-1}$; E_6 и D_6 — функции от Θ_6, имеющие следующий вид

$$E_6 = \exp(\Theta_6),\ D_6 = E_6 - 1. \tag{15}$$

Коэффициенты $\{\alpha_j\}$ в формулах (12)—(14) и параметры $\{\delta_j\}$, а также значения энтальпии Δh_0 и энтропии Δs_0 приведены в таблице А.3 приложения А. Значения Δh_0 и Δs_0 введены для удобства сравнения с разработанными ранее таблицами стандартных справочных данных по моноксиду углерода (см. [1]).

Энтальпия и энтропия идеального газа при $T = 0$ К равны нулю. Для энтальпии учитывают также дополнительное значение $h_0^0 = 162{,}62$ кДж/кг, полученное в результате выполнения условия для внутренней энергии жидкой фазы в тройной точке $U(T_t) = 0$.

Комплексы A_0—A_5 в формулах (5)—(11) определяют по следующим соотношениям, полученным из уравнения (3) для f_r с использованием известных дифференциальных уравнений термодинамики

$$A_0 = \sum_{j=1}^{12} b_j \varphi_j X_j; \tag{16}$$

$$A_1 = \sum_{j=1}^{12} b_j \varphi_j \left[X_j\left(X_j + 1\right) + U_j\right]; \tag{17}$$

$$A_2 = \sum_{j=1}^{12} b_j \varphi_j \left[X_j\left(1 - t_j\right)\right]; \tag{18}$$

$$A_3 = \sum_{j=1}^{12} b_j \varphi_j \left[X_j - t_j\right]; \tag{19}$$

$$A_4 = -\sum_{j=1}^{12} b_j \varphi_j \left[t_j - 1\right]; \tag{20}$$

$$A_5 = -\sum_{j=1}^{12} b_j \varphi_j \left[t_j\left(1 - t_j\right)\right], \tag{21}$$

где

$$X_j = r_j + g_j l_j \omega^{l_j}; \tag{22}$$

$$U_j = g_j l_j^2 \omega^{l_j}. \tag{23}$$

Рассчитанные стандартные справочные данные контрольных значений термодинамических свойств моноксида углерода на линии насыщения и в однофазной области приведены в таблицах Б.2 и В.1 (приложения Б и В).

4 Расширенные неопределенности расчетных значений стандартных справочных данных по свойствам моноксида углерода

Расширенные неопределенности с доверительной вероятностью 95 % расчетных значений термодинамических свойств: плотности $\delta\rho = \Delta\rho/\rho$, изохорной $\delta c_v = \Delta c_v/c_v$ и изобарной $\delta c_p = \Delta c_p/c_p$ теплоемкостей, а также давления на линии насыщения δp_s определяют в соответствии с оценками, приведенными в [1].

Расширенные неопределенности расчетных значений энтальпии Δh и энтропии $\delta s = \Delta s/s$ определяют в соответствии с теорией переноса ошибок через $\delta\rho$ по следующим выражениям:

$$\Delta h = 0{,}1 + RT\left|\left(\frac{\partial A_3}{\partial \omega}\right)_\tau\right|\omega\delta\rho / 100,\ \text{кДж/кг};\tag{24}$$

$$\delta s = \left\{0{,}01\cdot s_0(\tau) + R\left|\omega\left\{\left(\frac{\partial A_4}{\partial \omega}\right)_\tau - 1\right|\delta\rho\right\}s^{-1},\%.\right.\tag{25}$$

В формулах (24)—(25) A_3 и A_4 — расчетные комплексы (19)—(20); $s_0(\tau)$ рассчитывают по формуле (14), но без учета $\ln(\omega)$.

Расширенные неопределенности контрольных значений стандартных справочных данных монооксида углерода представлены в таблицах Б.2 и В.1 (приложения Б и В), где для всех термодинамических свойств, кроме энтальпии, приведены относительные величины неопределенностей $\delta A = 100\cdot\Delta A/A$, %; для энтальпии приведена абсолютная величина Δh, кДж/кг.

Приложение А
(обязательное)

Основные физические параметры и коэффициенты уравнений для определения значений стандартных справочных данных по свойствам моноксида углерода

Таблица А.1 — Основные физические параметры моноксида углерода

Физический параметр, размерность	Значение
Молярная масса M, кг/кмоль	28,0101
Газовая постоянная R, кДж/(кг · К)	0,2968384
Параметры в тройной точке:	
давление p_t, МПа	0,0154
температура T_t, К	68,16
Параметры в критической точке:	
давление $p_{кр}$, МПа	3,494
температура $T_{кр}$, К	132,86
плотность $\rho_{кр}$, кг/м^3	303,91
фактор сжимаемости $z_{кр}$	0,291516795

Таблица А.2 — Коэффициенты, показатели степеней и параметры уравнения для неидеальной составляющей ФУС моноксида углерода [см. уравнения (3) и (4)]

J	b_j	r_j	t_j	g_j	l_j
1	0,90554	1	0,25	0	0
2	-2,4515	1	1,125	0	0
3	0,53149	1	1,50	0	0
4	$0,24173 \cdot 10^{-1}$	2	1,375	0	0
5	$0,72156 \cdot 10^{-1}$	3	0,25	0	0
6	$0,18818 \cdot 10^{-3}$	7	0,875	0	0
7	0,19405	2	0,625	–1	1
8	$–0,43268 \cdot 10^{-1}$	5	1,75	–1	1
9	–0,12778	1	3,625	–1	2
10	$–0,27896 \cdot 10^{-1}$	4	3,625	–1	2
11	$–0,34154 \cdot 10^{-1}$	3	14,5	–1	3
12	$0,16329 \cdot 10^{-1}$	4	12,0	–1	3

Таблица А.3 — Коэффициенты уравнений (2) и (12) — (15) для термодинамических свойств моноксида углерода в идеально-газовом состоянии, энтальпия Δh_0 и энтропия Δs_0

i	α_i	δ_i
1	-3,3728318564	0
2	3,3683460039	0
3	2,500000000	0
4	$0,22311 \cdot 10^{-6}$	0
5	1,5	0
6	1,0128	3089,0
$\Delta h_0 = 29,3645$ кДж/кг; $\Delta s_0 = 3,050696$ кДж/(кг · К)		

Приложение Б
(обязательное)

Таблицы контрольных стандартных значений термодинамических свойств монооксида углерода на кривой насыщения

Таблица Б.1 — Обозначения и размерности термодинамических свойств и их неопределенностей, представленных в таблицах Б.2 и В.1 приложений Б, В

Наименование показателя	Обозначение	Размерность
Температура	T	К
Давление	p	МПа
Давление насыщения	p_s	МПа
Плотность	ρ	кг/м^3
Энтальпия	h	кДж/кг
Энтропия	s	кДж/(кг · К)
Изохорная теплоемкость	c_v	кДж/(кг · К)
Изобарная теплоемкость	c_p	кДж/(кг · К)
Относительная неопределенность термодинамических свойств, исключая энтальпию	δA	%
Абсолютное значение неопределенности энтальпии	Δh	кДж/кг
Примечание — В таблице Б.2, где представлены контрольные стандартные значения термодинамических свойств (A) монооксида углерода на линии насыщения, обозначения A' и A'' — свойства насыщенной жидкости и насыщенного пара, соответственно.		

Таблица Б.2 — Контрольные стандартные значения термодинамических свойств монооксида углерода на кривой насыщения

T	p_s	ρ'	ρ''	h'	h''	s'	s''
	δp_s	$\delta\rho'$	$\delta\rho''$	$\Delta h'$	$\Delta h''$	$\delta s'$	$\delta s''$
70,00	0,21053E-01	842,10	0,10267E+01	4,4	234,1	2,7217	6,0034
	0,20	0,30	0,30	1,2	0,1	0,31	0,02
80,00	0,83738E-01	800,32	0,36580E+01	25,8	242,8	3,0074	5,7190
	0,20	0,30	0,30	0,8	0,1	0,24	0,02
90,00	0,23852E+00	755,35	0,96596E+01	47,5	249,8	3,2606	5,5074
	0,20	0,30	0,30	0,5	0,1	0,19	0,03
100,00	0,54438E+00	705,41	0,21204E+02	70,1	254,3	3,4934	5,3358
	0,20	0,30	0,30	0,2	0,1	0,15	0,03
110,00	0,10666E+01	647,44	0,41743E+02	94,3	255,3	3,7164	5,1808
	0,20	0,30	0,30	0,2	0,2	0,12	0,03
120,00	0,18765E+01	574,58	0,78772E+02	121,7	250,6	3,9431	5,0173
	0,20	0,30	0,30	0,3	0,2	0,09	0,03
132,00	0,33617E+01	402,98	0,21207E+03	172,0	217,7	4,3164	4,6630
	0,20	0,30	0,30	0,3	0,3	0,05	0,04

Окончание таблицы Б.2

T	c_v'	c_v''	c_p'	c_p''
	$\delta c_v'$	$\delta c_v''$	$\delta c_p'$	$\delta c_p''$
70,00	1,243	0,755	2,15	1,069
	2,0	2,0	2,0	2,0
80,00	1,154	0,775	2,142	1,12
	2,0	2,0	2,0	2,0
90,00	1,088	0,807	2,188	1,216
	2,0	2,0	2,0	2,0
100,00	1,037	0,854	2,306	1,389
	2,0	2,0	2,0	2,0
110,00	1,002	0,919	2,558	1,725
	2,0	2,0	2,0	2,0
120,00	0,995	1,016	3,202	2,601
	2,0	2,0	2,0	2,0
132,00	1,229	1,351	24,014	32,497
	2,0	2,0	2,0	2,0

Примечание — Запись уЕ±*n* в таблице Б.2 нужно интерпретировать как у 10±*n*.

Приложение В
(обязательное)

Таблицы контрольных стандартных значений термодинамических свойств моноксида углерода в однофазной области

Таблица В.1 — Контрольные стандартные значения термодинамических свойств моноксида углерода в однофазной области

p	ρ	h	s	c_v	c_p
	$\delta\rho$	Δh	δs	δc_v	δc_p
T = 70,0 K					
0,1	842,24	4,4	2,7213	1,243	2,150
	0,30	1,2	0,31	2,0	2,0
5,0	850,67	8,3	2,6942	1,253	2,124
	0,30	1,3	0,32	2,0	2,0
T = 100,0 K					
0,1	3,4446	264,2	5,9073	0,754	1,076
	0,30	0,1	0,02	2,0	2,0
5,0	724,47	71,8	3,4489	1,045	2,175
	0,30	0,4	0,16	2,0	2,0
50,0	824,11	104,0	3,1944	1,121	1,860
	0,30	1,5	0,23	2,0	2,0
100,0	881,59	146,2	3,0315	1,179	1,804
	0,30	2,5	0,27	2,0	2,0
T = 130,0 K					
0,1	2,6182	296,1	6,1864	0,746	1,055
	0,30	0,1	0,02	2,0	2,0
5,0	531,61	146,6	4,0975	0,969	3,237
	0,30	0,3	0,08	2,0	2,0
50,0	744,35	158,6	3,6721	1,014	1,785
	0,30	0,9	0,15	2,0	2,0
100,0	820,49	198,7	3,4909	1,070	1,702
	0,30	1,9	0,19	2,0	2,0
T = 200,0 K					
0,1	1,6888	369,5	6,6378	0,743	1,044
	0,30	0,1	0,02	2,0	2,0
5,0	95,599	341,1	5,3711	0,781	1,357
	0,30	0,2	0,03	2,0	2,0
50,0	576,75	278,2	4,4108	0,894	1,626
	0,30	0,3	0,08	2,0	2,0

Окончание таблицы В.1

p	ρ	h	s	c_v	c_p
	$\delta\rho$	Δh	δs	δc_v	δc_p
100,0	697,11	312,1	4,1914	0,944	1,548
	0,30	1,1	0,11	2,0	2,0
T = 300,0 K					
0,1	1,1233	473,7	7,0605	0,744	1,042
	0,30	0,1	0,02	2,0	2,0
5,0	56,670	461,6	5,8628	0,756	1,131
	0,30	0,1	0,03	2,0	2,0
50,0	413,59	428,5	5,0235	0,829	1,395
	0,30	0,2	0,05	2,0	2,0
100,0	565,80	458,2	4,7861	0,870	1,385
	0,30	0,7	0,07	2,0	2,0
T = 400,0 K					
0,1	0,84203	578,1	7,3609	0,751	1,048
	0,30	0,1	0,02	2,0	2,0
5,0	41,522	572,3	6,1814	0,758	1,092
	0,30	0,1	0,02	2,0	2,0
50,0	320,42	560,9	5,4052	0,808	1,268
	0,30	0,2	0,04	2,0	2,0
100,0	475,33	591,4	5,1697	0,841	1,287
	0,30	0,6	0,05	2,0	2,0
T = 500,0 K					
0,1	0,67351	683,7	7,5964	0,767	1,064
	0,30	0,1	0,02	2,0	2,0
5,0	33,013	681,2	6,4244	0,772	1,090
	0,30	0,1	0,02	2,0	2,0
50,0	262,92	684,5	5,6812	0,809	1,212
	0,30	0,2	0,03	2,0	2,0
100,0	410,67	717,3	5,4509	0,837	1,238
	0,30	0,5	0,04	2,0	2,0

Библиография

[1] ГСССД 394—2021. Моноксид углерода жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия, энтропия, изохорная и изобарная теплоемкости при температурах от 70 К до 500 К и давлениях до 100 МПа. — М: ФГУП «ВНИИМС», 2021. — 33 с.

УДК 661.974:006.354 ОКС 07.030

Ключевые слова: государственная система обеспечения единства измерений, стандартные справочные данные, жидкий и газообразный моноксид углерода, термодинамические свойства, энтальпия, энтропия, изохорная и изобарная теплоемкости

Редактор *Н.А. Аргунова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *О.В. Лазарева*
Компьютерная верстка *Е.О. Асташина*

Сдано в набор 27.05.2021. Подписано в печать 15.06.2021. Формат 60×84¼. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л 1,86. Уч.-изд. л 1.70.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru