ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И СЕРТИФИКАЦИИ

(ГОССТАНДАРТ РОССИИ)

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ (ГСССД)



Разрешаю на депонирование
Директор ВНИЦСМВ
Госстандарта России
А.Д. Козлов
06 "июня 1993 г.

УДК 662.767 : 536.7 (08)

ТАБЛИЦЫ СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ

Козлов А.Д., Кузнецов В.М., Мамонов Ю.В., Степанов С.А.

ГАЗ ПРИРОДНЫЙ РАСЧЕТНЫЙ. ПЛОТНОСТЬ, ФАКТОР СЖИМАЕМОСТИ, ЭНТАЛЬПИЯ, ЭНТРОПИЯ, ИЗОБАРНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ, СКОРОСТЬ ЗВУКА, ПОКАЗАТЕЛЬ АДИАБАТЫ И КОЭФФИЦИЕНТ ОБЪЕМНОГО РАСШИРЕНИЯ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 250 … 450 К И ДАВЛЕНИЯХ 0,1…12 МПА

ГСССД 160 – 93

Авторы: А.Д. Козлов
В.М. Кузнецов
Ю.В. Мамонов
С.А. Степанов

Москва - 1993

gost.e-ecolog.ru

ТАБЛИЦЫ СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ

ГАЗ ПРИРОДНЫЙ РАСЧЕТНЫЙ. ПЛОТНОСТЬ, ФАКТОР СЖИМАЕМОСТИ, ЭНТАЛЬПИЯ, ЭНТРОПИЯ, ИЗОБАРНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ, СКОРОСТЬ ЗВУКА, ПОКАЗАТЕЛЬ АДИАБАТЫ И КОЭФФИЦИЕНТ ОБЪЕМНОГО РАСШИРЕНИЯ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 250 ... 450 К И ДАВЛЕНИЯХ 0,1...12 МПА

ГСССД 160 – 93

Издание официальное

КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И СЕРТИФИКАЦИИ

МОСКВА - 1993

РАЗРАБОТАНЫ Всероссийским научно – исследовательским центром по стандартизации, информации и сертификации сырья, материалов и веществ Госстандарта России

АВТОРЫ : д-р техн. наук А.Д. Козлов, канд. техн. наук В.М. Кузнецов, канд. техн. наук Ю.В. Мамонов, канд. техн. наук С.А.Степанов

РЕКОМЕНДОВАНЫ К УТВЕРЖДЕНИЮ Научно – производственным объединением по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова; Всероссийским научно – исследовательским центром по стандартизации, информации и сертификации сырья, материалов и веществ Госстандарта России

ОДОБРЕНЫ экспертной комиссией в составе :
д-ра техн. наук В.Н. Зубарева, д-ра техн. наук Б.А. Григорьева, д-ра техн. наук В.В. Пугача, канд. техн. наук В.А. Айрапетова, канд. техн. наук П.В. Попова

ПОДГОТОВЛЕНЫ К УТВЕРЖДЕНИЮ
Всероссийским научноисследовательским центром стандартизации, информации и сертификации сырья, материалов и веществ Госстандарта России

УТВЕРЖДЕНЫ Государственным комитетом Российской Федерации по стандартизации ,метрологии и сертификации "06" июля 1993 г. (протокол № 7).

Дет. во ВНИЦСМВ 06.06.1994г., № 741-94кк

УДК 662.767:536.7(08)

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ

Таблицы стандартных справочных данных

ГАЗ ПРИРОДНЫЙ РАСЧЕТНЫЙ

ПЛОТНОСТЬ, ФАКТОР СЖИМАЕМОСТИ, ЭНТАЛЬПИЯ, ЭНТРОПИЯ, ИЗОБАРНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ, СКОРОСТЬ ЗВУКА, ПОКАЗАТЕЛЬ АДИАБАТЫ И КОЭФФИЦИЕНТ ОБЪЕМНОГО РАСШИРЕНИЯ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 250...450 К И ДАВЛЕНИЯХ 0,1...12 МПА

Г С С С Д
160-93
Вместо ГСССД 81-84

Tables of standard reference data

Natural gas rated. Density, compressibility factor, entalpy, entropy, isobaric specific heat, velocity of sound, index of adiabate and coefficient of volume thermal expansion in the temperature range 250...450 K and pressure range 0,1...12 MPa

GSSSD
160-93

Применение стандартных справочных данных обязательно во всех отраслях народного хозяйства

Настоящие таблицы стандартных справочных данных вводятся вместо ГСССД 81-84 [1]. Разработка новых таблиц обусловлена появлением многочисленных новых экспериментальных данных о термических свойствах природного газа [2] и разработкой более совершенной методики получения уравнений и оценки погрешностей вычисленных по нему значений [3].

Таблицы стандартных справочных данных содержат значения плотности, фактора сжимаемости, энтальпии, энтропии, изобарной теплоемкости, скорости звука, показателя адиабаты и коэффициента объемного расширения сухого природного газа, состав которого (объемные доли в процентах) регламентируется ГОСТ 23194-83: метан 98,63, этан 0,12, пропан 0,02, н-бутан 0,10, диоксид углерода 1,01, азот 0,12. Параметры состояния, при которых рассчитаны таблицы, относятся к области изменения температур и давлений, наиболее важной для практических расчетов центробежных нагнетателей для транспортирования природного газа.

Таблицы рассчитаны на основании известных термодинамических соотношений по уравнению состояния, построенному в виде зависимос-

ти свободной энергии от приведенных плотности и температуры:

$$f^r/RT = \sum_{j=1}^{10} b_j \omega_m^{r_j}/\tau_m^{t_j} + \exp(-\omega_m^2) \sum_{j=11}^{14} b_j \omega_m^{r_j}/\tau_m^{t_j};$$

где f^r/RT - избыточная по отношению к идеальному газу свободная энергия; R = 506,781 Дж/(кг К) - газовая постоянная,

$$\omega_m = A*\omega^n; \qquad \tau_m = B*\omega^k \tau^l ;$$

$\omega = \rho/\rho_c$ и $\tau = T/T_c$ - приведенные плотность и температура; T - температура, К; ρ - плотность, кг/м^3; T_c = 192,014 К и ρ_c = 166,695 кг/м^3 - плотность и температура природного газа в псевдокритической точке. Значения параметров уравнения b_j, r_j, t_j, A, n, B, k и l представлены в таблице 1.

При заданных давлении p [МПа] и температуре T [К] плотность определяется в итерационном цикле методом Ньютона.

Фактор сжимаемости, энтальпия, энтропия, изобарная теплоемкость, скорость звука, показатель адиабаты и коэффициент объемного расширения рассчитывались, соответственно, по формулам:

$$z = 1 + A_0;$$

$$h = RT(h^o/RT + A_3);$$

$$s = R[s^o/R + A_4 - \ln(\omega/\omega_o)], \quad \omega_o = 0{,}101325/(\rho_c RT);$$

$$c_p = R[c_v + (1 + A_2)^2/(1 + A_1)];$$

$$w = [RTc_p(1 + A_1)/c_v]^{1/2};$$

$$k = c_p(1 + A_1)/[c_v(1 + A_2)];$$

$$\alpha/\alpha_o = (1 + A_2)/(1 + A_1), \quad \alpha_o = 1/T;$$

где $c_v = R(c_p^o/R - 1 + A_5)$, а комплексы $A_0 - A_5$ имеют вид:

$$A_0 = \sum_{j=1}^{10} R_j b_j \omega_m^{r_j}/\tau_m^{t_j} + E \sum_{j=11}^{14} (U+R_j) b_j \omega_m^{r_j}/\tau_m^{t_j};$$

$$A_1 = \sum_{j=1}^{10} R_j(R_j+1) b_j \omega_m^{r_j}/\tau_m^{t_j} + E \sum_{j=11}^{14} [(U+R_j)(U+R_j+1)+2nU] b_j \omega_m^{r_j}/\tau_m^{t_j};$$

$$A_2 = \sum_{j=1}^{10} R_j(1-T_j)b_j\omega_m^{r_j}/\tau_m^{t_j} + E\sum_{j=11}^{14}(U+R_j)(1-T_j)b_j\omega_m^{r_j}/\tau_m^{t_j};$$

$$A_3 = \sum_{j=1}^{10} (R_j+T_j)b_j\omega_m^{r_j}/\tau_m^{t_j} + E\sum_{j=11}^{14}(U+R_j+T_j)b_j\omega_m^{r_j}/\tau_m^{t_j};$$

$$A_4 = \sum_{j=1}^{10} (T_j-1)b_j\omega_m^{r_j}/\tau_m^{t_j} + E\sum_{j=11}^{14}(T_j-1)b_j\omega_m^{r_j}/\tau_m^{t_j};$$

$$A_5 = \sum_{j=1}^{10} T_j(1-T_j)b_j\omega_m^{r_j}/\tau_m^{t_j} + E\sum_{j=11}^{14}T_j(1-T_j)b_j\omega_m^{r_j}/\tau_m^{t_j};$$

причем $R_j = r_jn - t_jk$, $T_j = t_jl$, $E = \exp(-\omega_m^2)$, $U = -2n\omega_m^2$.

Термодинамические свойства в идеально-газовом состоянии вычисляются по формулам

$$c_p^\circ/R = a_{-4}/\zeta^4 + a_{-3}/\zeta^3 + a_{-2}/\zeta^2 + a_{-1}/\zeta + a_0 + a_1\zeta;$$

$$h^\circ/RT = [-a_{-4}(\zeta^{-3}-1)/3 - a_{-3}(\zeta^{-2}-1)/2 - a_{-2}(\zeta^{-1}-1) + a_{-1}\ln\zeta + a_0(\zeta-1) + a_1(\zeta-1)/2]/\zeta;$$

$$s^\circ/T = -a_{-4}(\zeta^{-4}-1)/4 - a_{-3}(\zeta^{-3}-1)/3 - a_{-2}(\zeta^{-2}-1)/2 - a_{-1}(\zeta^{-1}-1) + a_0\ln\zeta + a_1(\zeta-1);$$

где $\zeta = T/300$; $a_{-4} = 1{,}75332$; $a_{-1} = -21{,}0041$; $a_{-3} = -9{,}91864$; $a_0 = 11{,}4131$; $a_{-2} = 21{,}4841$; $a_1 = 0{,}587275$.

Расчетные данные о термодинамических свойств природного газа, вычисленные по вышеприведенным соотношениям, приведены в таблице 2

Погрешности табличных значений определялись в соответствии с рекомендациями [3], согласно которым абсолютная погрешность любого термодинамического свойства A вычисляется по формуле:

$$\Delta A = \pm t\,(\mathbf{r}^T\mathbf{G}\,\mathbf{r})^{1/2};$$

где t_c - квантиль Стьюдента при выбранной вероятности, $\mathbf{G} = s^2K^{-1} + \mathbf{Q} + \mathbf{B}$ - обобщенная матрица ошибок, s^2K^{-1}, $\mathbf{Q}$ и $\mathbf{B}$ - ковариационные

матрицы, учитывающие соответственно случайные, систематические погрешности в данных и вычислительную погрешность.

Так как независимыми переменными при расчете плотности выступают давление p и температура T, то вектор $\mathbf{r}_\rho$ определяется, как производная неявной функции:

$$\mathbf{r}_\rho = -(\partial p/\partial \mathbf{b})/(\partial p/\partial \rho)_T.$$

Поскольку все прочие термодинамические функции определяются не только коэффициентами b, но и плотностью, которая сама зависит от b, то при расчете погрешностей этих функций производные также вычислялись, как производные неявной функции:

$$\mathbf{r}_A = -(\partial A/\partial \mathbf{b})/(\partial A/\partial \rho)_T,$$

При расчете калорических функций дополнительно учитывалась погрешность в идеально-газовых значениях изобарной теплоемкости расчетного природного газа, которая, с учетом погрешности аппроксимации, составляет 0,03 %.

Погрешности стандартных справочных данных представлены в таблице 3, при этом для энтальпии приведены абсолютные погрешности, для других свойств - относительные погрешности $\delta A = 100\Delta A/A$, %.

Таблица 1. Коэффициенты уравнения состояния расчетного природного газа

j	b_j	r_j	t_j	Δb_j
1	0,440650	1	0	0,0045
2	-0,949291	1	1	0,0230
3	-0,614260	1	2	0,0411
4	-0,0704016	1	3	0,0243
5	0,123434	2	0	0,0044
6	-0,263016	2	1	0,0142
7	0,447854	2	2	0,0137
8	0,0471118	4	0	0,0016
9	-0,0998656	4	1	0,0042
10	0,0177158	5	1	0,0008
11	-0,142940	2	4	0,0215
12	0,102466	2	5	0,0209
13	0,0572862	4	4	0,0076
14	-0,0887139	4	5	0,0088

A = 1,000286, B = 0,9998366,
n = 0,9999503, k = 0,0000387,
l = 1,002073

Примечание: Δb_j - абсолютные погрешности коэффициентов b_j

Таблица 2. Стандартные справочные данные о термодинамических свойствах расчетного природного газа

T, K	ρ, кг/м^3	z	h, кДж/кг	s, кДж/(кг К)	c_p, кДж/(кг К)	w, м/с	k	α/α_o
			p = 0,1 МПа					
250	0,7919	0,9968	1079,8	11,053	2,103	408,2	1,32	1,01
260	0,7611	0,9972	1100,9	11,136	2,117	415,9	1,32	1,01
270	0,7327	0,9975	1122,1	11,216	2,133	423,4	1,31	1,01
280	0,7063	0,9978	1143,6	11,294	2,151	430,6	1,31	1,01
288,15	0,6862	0,9980	1161,2	11,356	2,167	436,4	1,31	1,01
293,15	0,6744	0,9981	1172,0	11,393	2,178	439,9	1,30	1,01
300	0,6589	0,9983	1187,0	11,444	2,193	444,5	1,30	1,01
320	0,6175	0,9987	1231,3	11,587	2,241	457,7	1,29	1,01
340	0,5810	0,9989	1276,7	11,724	2,295	470,2	1,28	1,00
360	0,5486	0,9992	1323,2	11,857	2,355	482,1	1,28	1,00
380	0,5196	0,9994	1370,9	11,986	2,418	493,6	1,27	1,00
400	0,4935	0,9995	1419,9	12,112	2,485	504,7	1,26	1,00
450	0,4386	0,9998	1548,5	12,415	2,661	530,8	1,24	1,00
			p = 0,25 МПа					
250	1,9894	0,9919	1077,8	10,583	2,118	407,2	1,32	1,03
260	1,9109	0,9929	1099,0	10,666	2,131	415,0	1,32	1,02
270	1,8386	0,9937	1120,4	10,747	2,145	422,6	1,31	1,02
280	1,7716	0,9945	1141,9	10,825	2,162	430,0	1,31	1,02
288,15	1,7206	0,9950	1159,6	10,888	2,177	435,8	1,31	1,02
293,15	1,6907	0,9953	1170,5	10,925	2,187	439,3	1,31	1,02
300	1,6515	0,9957	1185,5	10,976	2,202	444,0	1,30	1,02
320	1,5468	0,9966	1230,0	11,119	2,249	457,3	1,29	1,01
340	1,4547	0,9974	1275,5	11,257	2,302	469,9	1,29	1,01
360	1,3731	0,9980	1322,1	11,391	2,360	482,0	1,28	1,01
380	1,3002	0,9984	1370,0	11,520	2,423	493,5	1,27	1,01
400	1,2348	0,9988	1419,1	11,646	2,489	504,6	1,26	1,01
450	1,0968	0,9995	1547,9	11,949	2,664	530,9	1,24	1,00
			p = 0,5 МПа					
250	4,0116	0,9838	1074,4	10,222	2,144	405,6	1,32	1,05
260	3,8495	0,9858	1095,8	10,307	2,153	413,6	1,32	1,05
270	3,7004	0,9875	1117,4	10,388	2,166	421,4	1,31	1,04
280	3,5629	0,9890	1139,2	10,467	2,180	428,9	1,31	1,04
288,15	3,4584	0,9901	1157,0	10,530	2,194	434,9	1,31	1,04
293,15	3,3973	0,9907	1168,0	10,568	2,203	438,4	1,31	1,03
300	3,3172	0,9914	1183,1	10,619	2,217	443,2	1,30	1,03
320	3,1040	0,9933	1227,9	10,763	2,261	456,8	1,30	1,03
340	2,9171	0,9948	1273,6	10,902	2,313	469,5	1,29	1,02
360	2,7518	0,9959	1320,4	11,036	2,370	481,7	1,28	1,02
380	2,6045	0,9969	1368,4	11,165	2,431	493,4	1,27	1,02
400	2,4724	0,9976	1417,7	11,292	2,496	504,6	1,26	1,01
450	2,1948	0,9990	1546,8	11,596	2,670	531,1	1,24	1,01

Продолжение табл. 2

T, K	ρ, кг/м^3	z	h, кДж/кг	s, кДж/(кг К)	c_p,	w, м/с	k	α/α_o
			p = 1,0 МПа					
250	8,1591	0,9674	1067,5	9,852	2,197	402,3	1,32	1,11
260	7,8124	0,9715	1089,4	9,938	2,201	410,8	1,32	1,10
270	7,4960	0,9750	1111,5	10,021	2,208	419,0	1,32	1,09
280	7,2060	0,9780	1133,6	10,102	2,219	426,8	1,31	1,08
288,15	6,9867	0,9801	1151,7	10,165	2,229	433,0	1,31	1,07
293,15	6,8591	0,9814	1162,9	10,204	2,237	436,7	1,31	1,07
300	6,6920	0,9829	1178,3	10,256	2,248	441,7	1,31	1,07
320	6,2498	0,9867	1223,6	10,402	2,287	455,7	1,30	1,05
340	5,8646	0,9896	1269,8	10,542	2,335	468,8	1,29	1,04
360	5,5258	0,9919	1317,0	10,677	2,388	481,3	1,28	1,04
380	5,2251	0,9938	1365,4	10,808	2,447	493,2	1,27	1,03
400	4,9564	0,9953	1414,9	10,935	2,510	504,6	1,26	1,03
450	4,3938	0,9980	1544,6	11,240	2,680	531,4	1,24	1,02
			p = 1,5 МПа					
250	12,452	0,9508	1060,4	9,626	2,255	399,1	1,32	1,18
260	11,895	0,9571	1082,9	9,715	2,252	408,1	1,32	1,16
270	11,391	0,9624	1105,5	9,800	2,253	416,7	1,32	1,14
280	10,932	0,9670	1128,0	9,882	2,258	424,8	1,32	1,12
288,15	10,587	0,9703	1146,4	9,947	2,266	431,3	1,31	1,11
293,15	10,386	0,9721	1157,8	9,986	2,271	435,1	1,31	1,11
300	10,125	0,9744	1173,4	10,038	2,280	440,3	1,31	1,10
320	9,4373	0,9801	1219,3	10,186	2,314	454,7	1,30	1,08
340	8,8423	0,9845	1266,0	10,328	2,357	468,1	1,29	1,07
360	8,3215	0,9880	1313,6	10,464	2,407	480,9	1,28	1,06
380	7,8613	0,9908	1362,3	10,596	2,464	493,0	1,27	1,05
400	7,4512	0,9931	1412,2	10,723	2,525	504,6	1,26	1,04
450	6,5967	0,9971	1542,5	11,030	2,690	531,8	1,24	1,03
			p = 2,0 МПа					
250	16,898	0,9342	1053,2	9,460	2,317	396,1	1,33	1,25
260	16,102	0,9426	1076,3	9,551	2,306	405,5	1,32	1,22
270	15,388	0,9499	1099,3	9,638	2,300	414,4	1,32	1,19
280	14,743	0,9560	1122,3	9,721	2,300	423,0	1,32	1,17
288,15	14,260	0,9605	1141,1	9,787	2,304	429,6	1,32	1,15
293,15	13,981	0,9629	1152,6	9,827	2,307	433,6	1,31	1,14
300	13,618	0,9660	1168,4	9,880	2,314	439,0	1,31	1,13
320	12,667	0,9736	1215,0	10,030	2,341	453,8	1,30	1,11
340	11,850	0,9795	1262,2	10,173	2,380	467,6	1,30	1,09
360	11,138	0,9842	1310,2	10,311	2,427	480,6	1,29	1,08
380	10,512	0,9879	1359,3	10,443	2,480	492,9	1,28	1,06
400	9,9566	0,9909	1409,5	10,572	2,539	504,7	1,27	1,05
450	8,8031	0,9962	1540,4	10,880	2,701	532,2	1,25	1,04

Продолжение табл. 2

T, K	ρ, кг/м^3	z	h, кДж/кг	s, кДж/(кг К)	c_p,	w, м/с	k	α/α_o
			p = 2,5 МПа					
250	21,510	0,9174	1045,8	9,326	2,385	393,1	1,33	1,32
260	20,442	0,9282	1069,6	9,419	2,363	403,0	1,33	1,28
270	19,493	0,9373	1093,1	9,508	2,350	412,3	1,33	1,24
280	18,641	0,9451	1116,6	9,593	2,344	421,2	1,32	1,21
288,15	18,008	0,9507	1135,7	9,660	2,343	428,1	1,32	1,19
293,15	17,643	0,9538	1147,4	9,701	2,345	432,2	1,32	1,18
300	17,170	0,9577	1163,5	9,755	2,348	437,7	1,32	1,17
320	15,938	0,9673	1210,6	9,907	2,369	452,9	1,31	1,14
340	14,886	0,9747	1258,3	10,052	2,403	467,1	1,30	1,11
360	13,976	0,9805	1306,8	10,190	2,446	480,3	1,29	1,09
380	13,178	0,9851	1356,2	10,324	2,497	492,9	1,28	1,08
400	12,472	0,9888	1406,7	10,453	2,553	504,8	1,27	1,07
450	11,013	0,9954	1538,3	10,763	2,711	532,7	1,25	1,05
			p = 3,0 МПа					
250	26,297	0,9005	1038,3	9,212	2,458	390,2	1,33	1,40
260	24,920	0,9137	1062,7	9,307	2,425	400,6	1,33	1,34
270	23,708	0,9248	1086,9	9,399	2,403	410,3	1,33	1,30
280	22,629	0,9343	1110,8	9,486	2,390	419,5	1,33	1,26
288,15	21,831	0,9410	1130,3	9,554	2,385	426,7	1,32	1,24
293,15	21,374	0,9448	1142,2	9,595	2,383	430,9	1,32	1,22
300	20,782	0,9495	1158,5	9,650	2,384	436,6	1,32	1,21
320	19,250	0,9610	1206,3	9,804	2,398	452,2	1,31	1,17
340	17,952	0,9699	1254,5	9,951	2,426	466,7	1,30	1,14
360	16,834	0,9768	1303,4	10,090	2,466	480,2	1,29	1,11
380	15,858	0,9824	1353,2	10,225	2,514	492,9	1,28	1,10
400	14,997	0,9868	1404,0	10,355	2,568	505,1	1,28	1,08
450	13,225	0,9947	1536,2	10,666	2,722	533,2	1,25	1,06
			p = 4,0 МПа					
250	36,442	0,8664	1022,8	9,021	2,622	384,9	1,35	1,58
260	34,316	0,8846	1048,7	9,122	2,560	396,2	1,35	1,49
270	32,484	0,8999	1074,1	9,218	2,517	406,7	1,34	1,42
280	30,880	0,9129	1099,1	9,309	2,488	416,6	1,34	1,37
288,15	29,710	0,9220	1119,3	9,380	2,472	424,2	1,34	1,33
293,15	29,044	0,9270	1131,6	9,423	2,465	428,7	1,33	1,31
300	28,187	0,9334	1148,5	9,479	2,459	434,7	1,33	1,28
320	25,996	0,9488	1197,6	9,638	2,457	451,1	1,32	1,23
340	24,166	0,9606	1246,9	9,787	2,474	466,2	1,31	1,18
360	22,606	0,9699	1296,7	9,930	2,506	480,1	1,30	1,15
380	21,255	0,9772	1347,2	10,066	2,548	493,3	1,29	1,13
400	20,072	0,9831	1398,6	10,198	2,597	505,7	1,28	1,11
450	17,655	0,9935	1532,0	10,512	2,742	534,4	1,26	1,07

Продолжение табл. 2

T, K	ρ, кг/м³	z	h, кДж/кг	s, кДж/(кг К)	c_p,	w, м/с	k	α/α_o
			p = 5,0 МПа					
250	47,427	0,8321	1006,6	8,860	2,815	380,5	1,37	1,79
260	44,341	0,8558	1034,2	8,968	2,715	392,7	1,37	1,65
270	41,742	0,8754	1061,0	9,069	2,644	403,9	1,36	1,55
280	39,509	0,8919	1087,2	9,164	2,594	414,3	1,36	1,47
288,15	37,900	0,9034	1108,2	9,238	2,565	422,4	1,35	1,42
293,15	36,992	0,9098	1121,0	9,282	2,552	427,1	1,35	1,40
300	35,833	0,9178	1138,4	9,341	2,538	433,4	1,35	1,36
320	32,901	0,9371	1188,9	9,504	2,518	450,5	1,34	1,29
340	30,486	0,9519	1239,3	9,657	2,524	466,0	1,32	1,23
360	28,449	0,9633	1290,0	9,802	2,547	480,4	1,31	1,19
380	26,700	0,9724	1341,2	9,940	2,582	493,9	1,30	1,16
400	25,177	0,9797	1393,3	10,074	2,626	506,6	1,29	1,13
450	22,092	0,9925	1527,9	10,391	2,763	535,8	1,27	1,09
			p = 6,0 МПа					
250	59,339	0,7981	989,7	8,717	3,041	377,2	1,41	2,02
260	55,033	0,8274	1019,3	8,833	2,888	390,1	1,40	1,83
270	51,498	0,8515	1047,6	8,940	2,783	401,9	1,39	1,69
280	48,517	0,8715	1075,1	9,040	2,709	412,8	1,38	1,59
288,15	46,401	0,8855	1097,0	9,117	2,665	421,2	1,37	1,52
293,15	45,215	0,8932	1110,2	9,162	2,644	426,1	1,37	1,49
300	43,712	0,9028	1128,3	9,223	2,621	432,7	1,36	1,44
320	39,955	0,9260	1180,2	9,391	2,582	450,3	1,35	1,35
340	36,903	0,9436	1231,7	9,547	2,574	466,3	1,34	1,28
360	34,356	0,9572	1283,3	9,695	2,588	481,1	1,33	1,23
380	32,186	0,9680	1335,4	9,835	2,616	494,9	1,31	1,19
400	30,307	0,9766	1388,1	9,970	2,655	507,8	1,30	1,16
450	26,530	0,9917	1523,9	10,290	2,784	537,4	1,28	1,11
			p = 7,0 МПа					
250	72,237	0,7649	972,2	8,586	3,301	375,6	1,46	2,28
260	66,410	0,8000	1004,0	8,711	3,081	388,8	1,43	2,02
270	61,752	0,8284	1034,1	8,824	2,934	401,0	1,42	1,84
280	57,899	0,8520	1062,9	8,929	2,832	412,3	1,41	1,71
288,15	55,200	0,8684	1085,7	9,009	2,770	420,9	1,40	1,62
293,15	53,701	0,8774	1099,5	9,057	2,740	425,9	1,39	1,58
300	51,812	0,8886	1118,1	9,119	2,707	432,6	1,39	1,52
320	47,147	0,9155	1171,6	9,292	2,647	450,7	1,37	1,41
340	43,408	0,9359	1224,3	9,452	2,626	467,1	1,35	1,32
360	40,318	0,9516	1276,8	9,602	2,629	482,2	1,34	1,26
380	37,705	0,9640	1329,5	9,744	2,651	496,1	1,33	1,22
400	35,456	0,9739	1382,9	9,881	2,685	509,3	1,31	1,18
450	30,967	0,9912	1519,9	10,204	2,804	539,3	1,29	1,12

Продолжение табл. 2

T, K	ρ, кг/м^3	z	h, кДж/кг	s, кДж/(кг К)	c_p,	w, м/с	k	α/α_o
			p = 8,0 МПа					
250	86,112	0,7333	954,3	8,463	3,588	376,2	1,52	2,55
260	78,452	0,7739	988,6	8,598	3,290	389,2	1,49	2,22
270	72,479	0,8067	1020,4	8,718	3,094	401,4	1,46	1,99
280	67,629	0,8336	1050,6	8,828	2,960	412,8	1,44	1,83
288,15	64,276	0,8523	1074,4	8,912	2,879	421,5	1,43	1,72
293,15	62,429	0,8626	1088,7	8,961	2,840	426,6	1,42	1,67
300	60,114	0,8753	1108,0	9,026	2,796	433,4	1,41	1,60
320	54,460	0,9058	1163,0	9,204	2,713	451,8	1,39	1,46
340	49,988	0,9288	1216,9	9,367	2,677	468,4	1,37	1,37
360	46,326	0,9466	1270,3	9,520	2,671	483,6	1,35	1,30
380	43,250	0,9605	1323,8	9,664	2,685	497,8	1,34	1,25
400	40,618	0,9716	1377,8	9,803	2,714	511,0	1,33	1,20
450	35,398	0,9910	1516,1	10,128	2,824	541,3	1,30	1,14
			p = 10,0 МПа					
250	116,14	0,6796	918,6	8,241	4,162	386,2	1,73	3,02
260	104,14	0,7288	957,8	8,395	3,714	396,3	1,64	2,57
270	95,090	0,7686	993,3	8,529	3,421	407,0	1,58	2,26
280	87,941	0,8014	1026,5	8,649	3,220	417,6	1,53	2,04
288,15	83,101	0,8241	1052,2	8,740	3,100	425,9	1,51	1,91
293,15	80,469	0,8365	1067,6	8,793	3,041	430,9	1,49	1,84
300	77,203	0,8520	1088,2	8,862	2,974	437,6	1,48	1,75
320	69,373	0,8889	1146,2	9,050	2,845	455,8	1,44	1,57
340	63,314	0,9166	1202,4	9,220	2,780	472,5	1,41	1,45
360	58,434	0,9380	1257,7	9,378	2,753	487,8	1,39	1,36
380	54,386	0,9548	1312,7	9,527	2,753	502,1	1,37	1,30
400	50,954	0,9681	1367,9	9,668	2,771	515,5	1,35	1,25
450	44,231	0,9914	1508,6	9,999	2,864	546,0	1,32	1,16
			p = 12,0 МПа					
250	146,64	0,6459	886,2	8,050	4,531	409,9	2,05	3,15
260	130,61	0,6973	929,0	8,218	4,053	413,4	1,86	2,76
270	118,42	0,7405	967,7	8,364	3,706	420,2	1,74	2,44
280	108,85	0,7769	1003,5	8,494	3,457	428,4	1,66	2,20
288,15	102,42	0,8024	1031,0	8,591	3,305	435,4	1,62	2,05
293,15	98,940	0,8164	1047,3	8,647	3,230	439,8	1,59	1,97
300	94,652	0,8339	1069,2	8,721	3,143	445,8	1,57	1,87
320	84,490	0,8758	1130,1	8,918	2,971	462,8	1,51	1,66
340	76,746	0,9075	1188,5	9,095	2,878	478,8	1,47	1,52
360	70,582	0,9319	1245,6	9,258	2,833	493,8	1,43	1,42
380	65,519	0,9511	1302,0	9,411	2,819	507,9	1,41	1,34
400	61,260	0,9663	1358,5	9,555	2,826	521,2	1,39	1,28
450	52,997	0,9929	1501,4	9,892	2,902	551,6	1,34	1,18

Таблица 3. Погрешности стандартных справочных данных о термодинамических свойствах расчетного природного газа

T,K	$\delta\rho$, %	Δh, кДж/кг	δs, %	δc_p,%	δw, %	δk, %	$\delta(\alpha/\alpha_o)$, %
			p = 0,1 МПа				
250	0,01	0,44	0,04	0,05	0,04	0,07	0,01
300	0,01	0,48	0,04	0,04	0,04	0,07	0,01
350	0,01	0,52	0,04	0,04	0,04	0,07	0,01
400	0,01	0,57	0,04	0,04	0,04	0,07	0,01
450	0,01	0,62	0,04	0,04	0,04	0,07	0,01
			p = 1,0 МПа				
250	0,02	0,47	0,05	0,13	0,05	0,09	0,04
300	0,02	0,52	0,04	0,06	0,05	0,09	0,04
350	0,02	0,56	0,04	0,05	0,05	0,08	0,03
400	0,02	0,60	0,04	0,05	0,05	0,08	0,03
450	0,02	0,65	0,04	0,05	0,05	0,08	0,02
			p = 5,0 МПа				
250	0,05	0,59	0,05	0,29	0,11	0,24	0,09
300	0,03	0,67	0,05	0,11	0,07	0,15	0,10
350	0,03	0,70	0,05	0,09	0,07	0,12	0,09
400	0,03	0,72	0,05	0,09	0,07	0,11	0,08
450	0,03	0,76	0,05	0,08	0,07	0,11	0,06
			p = 8,0 МПа				
250	0,05	0,65	0,06	0,31	0,21	0,45	0,31
300	0,04	0,74	0,06	0,16	0,10	0,20	0,09
350	0,03	0,79	0,06	0,12	0,08	0,14	0,11
400	0,03	0,81	0,05	0,11	0,07	0,13	0,11
450	0,03	0,84	0,05	0,10	0,07	0,12	0,10
			p = 12,0 МПа				
250	0,15	0,94	0,08	0,30	0,41	0,88	0,28
300	0,04	0,77	0,06	0,30	0,13	0,24	0,21
350	0,06	0,87	0,06	0,15	0,09	0,16	0,09
400	0,04	0,91	0,06	0,13	0,09	0,16	0,14
450	0,04	0,94	0,06	0,12	0,09	0,16	0,14

ПРИЛОЖЕНИЕ

Уравнение состояния природного газа

Уравнение состояния расчетного природного газа выведено из полного уравнения состояния, предназначенного для расчета термодинамических свойств природного газа широкого компонентного состава в области температур 250...475 К (приведенные температуры должны быть в пределах 1,1...3,1) и давлений до 12 МПа (приведенные давления должны быть не выше 2,6). Последнее уравнение построено на основе уравнения состояния метана в виде зависимости свободной энергии от приведенных плотности и температуры:

$$f_м^r/RT = \sum_{j=1}^{12} b_j \omega_м^{r_j}/\tau_м^{t_j} + \exp(-\omega_м^2) \sum_{j=13}^{17} b_j \omega_м^{r_j}/\tau_м^{t_j};$$

которое отображает его термодинамические свойства в области температур 210...600 К, давлений до 20 МПа и конформально согласовано с термодинамическими свойствами других веществ и их смесей с помощью факторов формы:

$$h_{ij} = \omega_м/\omega_{ij} = A*\omega_{ij}^{n-1}\tau_{ij}^{m}; \qquad f_{ij} = \tau_м/\tau_{ij} = B*\omega_{ij}^{k}\tau_{ij}^{l-1};$$

где индекс "м" относится к уравнению состояния и приведенным параметрам метана, а индекс "ij" - соответственно к смеси.

Псевдокритические параметры смеси - удельный объем v_{cij} и температура T_{cij}, вычисляются по формулам:

$$v_{cij} = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} x_i x_j v_{ij}; \qquad v_{cij}T_{cij} = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} x_i x_j v_{ij}T_{ij};$$

причем $v_{ij} = \beta_{ij}(v_{ci}^{1/3} + v_{cj}^{1/3})^3/8; \qquad T_{ij} = \alpha_{ij}(T_{ci}T_{cj})^{1/2}.$

где α_{ij} и β_{ij} - параметры бинарного взаимодействия, N - число компонентов в смеси, x_i - молярная концентрация i-ого компонента.

В уравнения входят параметры A,B,n,m,k,l, которые для смесей и их компонентов выражаются через псевдофактор Питцера Ω_{ij} и псевдофактор Стилла ζ_{ij}:

$$A = 1 + A_1(\Omega_{ij} - \Omega_м) + A_2(\zeta_{ij} - \zeta_м);$$

$$B = 1 + B_1(\Omega_{ij} - \Omega_M) + B_2(\zeta_{ij} - \zeta_M);$$
$$n = 1 + n_1(\Omega_{ij} - \Omega_M) + n_2(\zeta_{ij} - \zeta_M);$$
$$m = m_1(\Omega_{ij} - \Omega_M) + m_2(\zeta_{ij} - \zeta_M);$$
$$k = k_1(\Omega_{ij} - \Omega_M) + k_2(\zeta_{ij} - \zeta_M);$$
$$l = 1 + l_1(\Omega_{ij} - \Omega_M) + l_2(\zeta_{ij} - \zeta_M);$$

причем псевдофакторы Питцера и Стилла для смесей рассчитываются по формулам:

$$\Omega_{ij} = \sum_{i=1}^{N} x_i\Omega_i; \qquad \zeta_{ij} = \sum_{i=1}^{N} x_i\zeta_i.$$

Уравнение состояния природного газа получено следующим образом:

1. При обработке табличных данных о факторе сжимаемости метана [4,5] в интервале температур от 210 до 600 К и давлений до 20 МПа получено уравнение состояния с оптимальной структурой, содержащее 17 коэффициентов b_j.

2. При обработке данных о плотности индивидуальных веществ (этана, пропана, н-бутана, водорода, азота, кислорода, диоксида углерода, сероводорода, водяного пара) и действительных значениях факторов Питцера и Стилла получено обобщенное уравнение состояния, после чего рассчитаны псевдофакторы Питцера и Стилла, при приближении данных о плотности индивидуальных веществ к полученным из обобщенного уравнения; далее, обобщенное уравнение состояния уточнено с новыми значениями псевдофакторов Питцера и Стилла.

3. Используя нелинейный метод наименьших квадратов при обработке данных о плотности метана и природного газа [2] (всего n = 4931 точек) получена окончательная структура уравнения состояния с 14 коэффициентами, определены значения коэффициентов b_j и параметров бинарного взаимодействия α_{ij} и β_{ij}. Используя данные о плотности природного газа с сероводородом (всего 128 точек) при фиксированных ранее определенных параметрах, рассчитаны соответствующие параметры бинарного взаимодействия.

4. По всем экспериментальным данным определена ковариационная матрица s^2K^{-1}.

5. Искажая термодинамическую поверхность в соответствии с

возможными систематическими погрешностями в исходных данных, получена ковариационная матрица систематических погрешностей Q.

В процессе обработки определены N = 28 коэффициентов уравнения и параметров бинарного взаимодействия, а также установлено, что полученная регрессия существенно значима, что следует из сравнения квантилей Фишера [3]: $F^{расч} >> F^{табл}(n-N,N)$, все коэффициенты уравнения также существенно значимы, т.к. $F_j^{расч} >> F^{табл}(n,1)$.

Полученное уравнение с высокой точностью отображает исходные данные: средние квадратические погрешности описания данных о метане составляют 0,039 %, указанных выше компонентов природного газа - 0,112 %, природного газа без сероводорода - 0,042 %, с сероводородом - 0,078 %. Оценка дисперсии составляет 0,193.

Для проверки адекватности использовался метод "скользящего экзамена". При этом вся область данных была разбита на 4 подобласти. Последовательно по данным, находящимся в 3-х подобластях определялись коэффициенты уравнения, а по данным из 4-ой подобласти вычислялась оценка дисперсии $s^2_{ск}$. Суммарная оценка диссперсии "скользящего экзамена" равна 0,287 и ненамного отличается от исходной оценки дисперсии, что говорит об адекватности модели.

В таблице П1 приведены сравнения расчитанных по уравнению состояния природного газа значений фактора сжимаемости смесей, приближающихся по составу к расчетному природному газу, с экспериментальными данными. Результаты сравнения подтверждают высокое качество полученного уравнения и подтверждают реалистичность оценок погрешности расчетных значений плотности в таблице 3.

В последние годы получены несколько систем уравнений для описания фактора сжимаемости природного газа с высокой точностью. В таблице П2 сравниваются значения фактора сжимаемости, вычисленного по рекомендуемому уравнению состояния, с полученными по уравнениям [2], предназначенным для расчета в области температур от -8,15 °С до 61,85 °С и давления до 12 МПа с погрешностью не более 0,1 % и по уравнениям [6], предназначенным для расчета в той же области параметров с погрешностью 0,1 % и до -50 °С с погрешностью 0,2 %. Видно их хорошее согласование. Отметим, что уравнения [2,6] несколько хуже отображают экспериментальные данные, приведенные в [2]: соответствующие средние квадратические отклонения составляют 0,056 и 0,050 %.

Таблица П1. Сравнение расчетных и экспериментальных [2,7] значений фактора сжимаемости для смеси (молярные проценты): 98,2722CH_4+0,5159C_2H_6+0,1607C_3H_8+0,0334nC_4H_{10}+0,0258iC_4H_{10}+ 0,8858N_2+0,0668CO_2+0,0064nC_5H_{12}+0,0077iC_5H_{12}+0,0012neoC_5H_{12}+ 0,0055C_6H_{14}+0,0004C_6H_6+0,0016C_7H_{16}+0,0009C_8H_{18}+0,0157He (погрешность данных - не более 0,1 %)

T,K	p, МПа	$z^{расч}$	δz, %	T,K	p, МПа	$z^{расч}$	δz, %
270	0,4967	0,9876	0,005	270	7,0006	0,8297	-0,018
270	0,9978	0,9751	0,005	270	8,0007	0,8081	-0,024
270	1,4973	0,9627	0,006	270	9,0003	0,7883	-0,024
270	2,0014	0,9501	0,006	270	9,9989	0,7706	-0,029
270	2,9972	0,9253	0,006	270	10,5000	0,7626	-0,043
270	4,0003	0,9005	-0,003	270	10,9990	0,7554	-0,046
270	4,9987	0,8762	-0,004	270	11,4970	0,7489	-0,049
270	6,0005	0,8525	-0,011	270	11,9970	0,7431	-0,048
310	0,2095	0,9968	0,005	310	1,8330	0,9727	-0,005
310	0,2599	0,9961	-0,005	310	2,2615	0,9665	-0,005
310	0,2753	0,9958	-0,001	310	2,3911	0,9646	-0,013
310	0,3415	0,9948	0,001	310	2,9449	0,9567	-0,008
310	0,3616	0,9945	-0,002	310	3,1121	0,9543	-0,012
310	0,4485	0,9932	0,004	310	3,8242	0,9444	-0,011
310	0,4749	0,9928	-0,004	310	4,0388	0,9415	-0,012
310	0,5887	0,9911	0,002	310	4,9502	0,9293	-0,008
310	0,6233	0,9906	-0,006	310	5,2238	0,9257	-0,017
310	0,7723	0,9884	-0,002	310	6,3847	0,9112	-0,009
310	0,8176	0,9877	-0,003	310	6,7327	0,9070	-0,013
310	1,0123	0,9848	0,001	310	8,2076	0,8904	-0,003
310	1,3254	0,9802	-0,003	310	8,6506	0,8858	-0,001
310	1,4025	0,9790	-0,005	310	10,5333	0,8685	0,018
310	1,7329	0,9742	-0,003	310	11,1017	0,8640	0,013
270	0,4967	0,9876	0,005	290	4,4896	0,9155	-0,018
270	0,9978	0,9751	0,005	290	4,9985	0,9065	-0,017
270	1,4973	0,9627	0,006	290	5,4961	0,8978	-0,018
270	2,0015	0,9501	0,006	290	5,5818	0,8963	-0,017
270	2,4990	0,9377	0,009	290	5,9980	0,8892	-0,022
270	2,9972	0,9253	0,006	290	6,4975	0,8809	-0,023
270	3,4986	0,9129	0,003	290	7,0015	0,8727	-0,025
270	4,0003	0,9005	-0,003	290	7,4943	0,8650	-0,026
270	4,5019	0,8883	-0,000	290	7,9997	0,8573	-0,024
270	4,9987	0,8762	-0,004	290	8,5003	0,8501	-0,018
270	5,4994	0,8643	-0,007	290	8,9992	0,8431	-0,017
270	6,0005	0,8525	-0,011	290	9,4988	0,8365	-0,016
270	6,4869	0,8412	-0,015	290	10,0006	0,8303	-0,016
270	7,0007	0,8297	-0,018	290	10,4975	0,8245	-0,014
270	7,5008	0,8187	-0,020	290	10,9963	0,8191	-0,011
270	8,0008	0,8081	-0,024	290	11,4960	0,8141	-0,010

Продолжение табл. П1

T,K	p, МПа	$z^{расч}$	δz, %	T,K	p, МПа	$z^{расч}$	δz, %
270	8,4940	0,7981	-0,022	290	11,9957	0,8096	-0,010
270	9,0003	0,7883	-0,024	310	0,5959	0,9910	-0,002
270	9,4994	0,7791	-0,026	310	0,9935	0,9851	0,001
270	9,9989	0,7706	-0,029	310	1,4961	0,9776	-0,005
270	10,5001	0,7626	-0,043	310	1,9995	0,9703	-0,008
270	10,9992	0,7554	-0,046	310	2,4977	0,9631	-0,012
270	11,4972	0,7489	-0,049	310	2,9973	0,9560	-0,009
270	11,9976	0,7431	-0,047	310	4,0002	0,9420	-0,015
280	0,4959	0,9891	0,004	310	5,0007	0,9286	-0,015
280	0,9955	0,9782	-0,001	310	5,9998	0,9159	-0,014
280	1,4990	0,9672	-0,001	310	7,0020	0,9038	-0,013
280	1,9962	0,9564	-0,004	310	8,0035	0,8926	-0,007
280	2,4937	0,9456	-0,008	310	9,0045	0,8822	-0,001
280	3,0017	0,9346	-0,009	310	9,8125	0,8746	0,008
280	3,4973	0,9240	-0,010	310	11,0008	0,8648	0,016
280	3,9998	0,9134	-0,011	330	0,4988	0,9941	-0,005
280	4,5008	0,9029	-0,013	330	0,8991	0,9895	-0,001
280	5,0050	0,8925	-0,016	330	1,4983	0,9826	-0,014
280	5,5009	0,8824	-0,018	330	1,9992	0,9769	-0,008
280	6,0019	0,8724	-0,018	330	2,4997	0,9714	-0,014
280	6,5010	0,8626	-0,021	330	2,9953	0,9660	-0,013
280	7,0035	0,8530	-0,005	330	3,4961	0,9607	-0,017
280	7,5015	0,8438	-0,009	330	3,9988	0,9554	-0,018
280	8,0037	0,8349	-0,009	330	4,5025	0,9503	-0,017
280	8,5011	0,8263	-0,010	330	5,0007	0,9454	-0,015
280	9,0001	0,8181	-0,013	330	5,5007	0,9406	-0,015
280	9,5029	0,8103	-0,013	330	6,0025	0,9359	-0,013
280	9,9998	0,8031	-0,016	330	6,5042	0,9314	-0,013
280	10,4961	0,7963	-0,013	330	6,9900	0,9271	-0,010
280	10,9976	0,7900	-0,015	330	7,5027	0,9228	-0,006
280	11,4979	0,7843	-0,016	330	8,0035	0,9188	-0,003
290	0,3962	0,9923	0,001	330	8,5060	0,9149	0,001
290	0,9004	0,9826	-0,005	330	9,0048	0,9113	0,004
290	1,4946	0,9712	-0,007	330	9,5071	0,9079	0,009
290	1,9955	0,9617	-0,011	330	10,0055	0,9046	0,013
290	2,4960	0,9522	-0,011	330	10,5055	0,9016	0,018
290	2,9966	0,9429	-0,015	330	11,0071	0,8988	0,030
290	3,4965	0,9336	-0,016	330	11,5043	0,8962	0,036
290	3,9973	0,9244	-0,016				

Примечание: $\delta z = 100(1 - z^{расч}/z^{эксп})$, %, где $z^{эксп}$ – экспериментальные значения фактора сжимаемости.

Таблица П3. Сравнение стандартных справочных данных о факторе сжимаемости с данными [2,6]

T,K	p,МПа	$z^{расч}$	z[6]	δz, %	z[2]	δz, %
250	0,1	0,9968	0,9968	0,001		
250	1,0	0,9674	0,9676	-0,016		
250	5,0	0,8321	0,8326	-0,054		
250	8,0	0,7333	0,7333	0,004		
250	12,0	0,6459	0,6450	0,138		
270	0,1	0,9975	0,9975	-0,001	0,9975	-0,001
270	1,0	0,9750	0,9750	-0,005	0,9751	-0,007
270	5,0	0,8754	0,8756	-0,024	0,8759	-0,054
270	8,0	0,8067	0,8068	-0,009	0,8074	-0,083
270	12,0	0,7405	0,7402	0,036	0,7410	-0,071
300	0,1	0,9983	0,9983	0,002	0,9983	0,002
300	1,0	0,9829	0,9829	-0,002	0,9829	0,002
300	5,0	0,9178	0,9178	-0,005	0,9179	-0,011
300	8,0	0,8753	0,8754	-0,013	0,8756	-0,038
300	12,0	0,8339	0,8341	-0,024	0,8340	-0,016
350	0,1	0,9991	0,9991	0,003	0,9990	0,006
350	1,0	0,9908	0,9908	-0,004	0,9906	0,024
350	5,0	0,9579	0,9580	-0,011	0,9568	0,114
350	8,0	0,9382	0,9384	-0,022	0,9367	0,161
350	12,0	0,9204	0,9209	-0,053	0,9183	0,223
400	0,1	0,9995	0,9995	-0,002		
400	1,0	0,9953	0,9953	-0,003		
400	5,0	0,9797	0,9798	-0,013		
400	8,0	0,9716	0,9719	-0,033		
400	12,0	0,9663	0,9669	-0,063		
450	0,1	0,9998	0,9998	0,001		
450	1,0	0,9980	0,9980	-0,002		
450	5,0	0,9925	0,9926	-0,014		
450	8,0	0,9910	0,9914	-0,038		
450	12,0	0,9929	0,9935	-0,060		

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГССД 81-84. Газ природный расчетный. Плотность, фактор сжимаемости, энтальпия, энтропия, изобарная теплоемкость, коэффициент объемного расширения и показатель адиабаты при температурах 250-450 К и давлениях 0,1-12 МПа: Табл. стандарт. справ. данных/ Госстандарт; ГССД.

2. Jaeschke M., Humphreys A.E. The GERG Databank of High Accuracy Compressibility Factor Measurement. GERG TM4 1990.- GERG Technical Monograph, 1990, 477 p.

3. МИ 404-85. Построение уравнений теплофизических свойств индивидуальных веществ и материалов. Основные положения: Методические указания/Госстандарт, ВНИЦПВ(Теплофизические свойства веществ и материалов/ГССД, 1988, вып. 24, с. 150).

4. ГССД 18-81. Метан жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость при температурах 100-1000 К и давлениях 0,1-100 МПа: Табл. стандарт. справ. данных/Госстандарт; ГССД.

5. Friend D.G., Ely J.F., Ingham H. Thermophysical Properties of Methane.-J. Phys. Chem. Ref. Data, 1989, v. 18, N 2, p. 583.

6.

7. Jaeschke M. Realgasverhalten Einheitliche Berechnungsmoglichkeiten von Erdgas L und H. - Gas und Wasserfach. Gas/Erdgas, 1988, v. 129, No. 1 s. 30.

gost.e-ecolog.ru