
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
СТАНДАРТ
РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р
8.1033—
2024

ГЕЛИЙ-4 ЖИДКИЙ И ГАЗООБРАЗНЫЙ

Плотность, энтальпия, энтропия, изохорная
и изобарная теплоемкости
при температурах от 2,5 К до 500 К
и давлениях до 100 МПа

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2024

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Федеральным государственным бюджетным учреждением «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (ФГБУ «ВНИИМС»)

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 14 февраля 2024 г. № 211-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 (www.rst.gov.ru)

© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2024

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 Общие положения	1
3 Расчет плотности на линии насыщения и давления насыщенного пара	2
4 Неопределенности рассчитанных значений термодинамических свойств	2
Приложение А (обязательное) Основные физические параметры и коэффициенты уравнений для определения значений стандартных справочных данных по свойствам гелия-4	3
Приложение Б (обязательное) Алгоритм расчета плотности гелия-4 в однофазных областях итерационным методом	5
Приложение В (обязательное) Алгоритм расчета энтальпии, энтропии, изохорной и изобарной теплоемкостей гелия-4	7
Приложение Г (обязательное) Стандартные справочные данные о плотности, энтальпии, энтропии, изохорной и изобарной теплоемкостях гелия-4 в однофазных областях	9
Приложение Д (обязательное) Алгоритм расчета плотности гелия-4 на линии насыщения и давления насыщенного пара гелия-4 итерационным методом	33
Приложение Е (обязательное) Стандартные справочные данные о плотности, энтальпии, энтропии, изохорной и изобарной теплоемкостей гелия-4 на линии насыщения	35
Библиография	37

ГЕЛИЙ-4 ЖИДКИЙ И ГАЗООБРАЗНЫЙ

Плотность, энтальпия, энтропия, изохорная и изобарная теплоемкости
при температурах от 2,5 К до 500 К и давлениях до 100 МПа

Helium-4 liquid and gaseous. Density, enthalpy, entropy, isochoric and isobaric heat capacities
at temperatures from 2.5 K to 500 K and pressures up to 100 MPa

Дата введения — 2024—12—01

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на гелий-4, параметры состояния которого соответствуют газообразной, жидкой и сверхкритической областям. Стандарт устанавливает методы расчетного определения значений стандартных справочных данных о плотности ρ , энтальпии h , энтропии s , изобарной теплоемкости c_p и 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 Общие положения

В настоящем стандарте приведена теоретическая основа метода определения термодинамических свойств гелия-4, параметры фундаментального уравнения состояния, а также рассчитанные по данному уравнению значения ниже перечисленных свойств.

Стандартные справочные данные значений плотности ρ , энтальпии h , энтропии s , изобарной c_p и изохорной теплоемкости c_v гелия-4 рассчитаны по единому для жидкой и газовой фаз фундаментальному уравнению состояния (ФУС) — зависимости свободной энергии (функции Гельмгольца) F от плотности ρ и температуры T (см. [1])

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

где f , f_0 , 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 $T_{кр}$ гелия-4 в критической точке приведены в таблице А.1. Уравнение для идеально-газовой составляющей свободной энергии имеет вид

$$f_0(\tau, \omega) = \ln \omega + (a_0 - 1) \ln \tau^{-1} + a_1 + a_2 \tau^{-1}. \quad (2)$$

Здесь коэффициенты a_i равны $a_0 = 2,5$; $a_1 = 0,173348642$; $a_2 = 0,467452364$.

Уравнение для неидеальной составляющей свободной энергии имеет следующий вид

$$f_r(\tau, \omega) = \sum_{i=1}^6 n_i \omega^{d_i} \tau^{-t_i} + \sum_{i=7}^{12} n_i \omega^{d_i} \tau^{-t_i} \exp(-\omega^{l_i}) + \sum_{i=13}^{23} n_i \omega^{d_i} \tau^{-t_i} \exp\left[-\eta_i (\omega - \varepsilon_i)^2 - \beta_i (\tau^{-1} - \gamma_i)^2\right]. \quad (3)$$

В формуле (3) n_i — коэффициенты уравнения состояния, значения которых вместе с показателями степеней d_i , t_i , l_i и параметрами η_i , ε_i , β_i , γ_i приведены в таблице А.2.

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

$$\pi = \frac{\omega \tau (1 + A_0)}{z_{кр}}, \quad (4)$$

где $z_{кр} = 10^3 \frac{p_{кр}}{p_{кр} R T_{кр}}$.

Значения давления $p_{кр}$ и фактора сжимаемости $z_{кр}$ в критической точке, а также индивидуальной газовой постоянной R гелия-4 приведены в таблице А.1. Вид комплекса A_0 и подробный алгоритм расчета плотности в однофазных областях приведены в приложении Б.

Алгоритм расчета энтальпии, энтропии, изорной и изобарной теплоемкостей в однофазных областях и на линии насыщения одинаков и приведен в приложении В.

Рассчитанные стандартные справочные данные о плотности, энтальпии, энтропии, изохорной и изобарной теплоемкостей гелия-4 в однофазных областях приведены в приложении Г.

3 Расчет плотности на линии насыщения и давления насыщенного пара

Относительные плотности жидкости и пара ω' и ω'' на линии насыщения определяют в результате итерационного решения системы уравнений, описывающих условие фазового равновесия:

$$\begin{aligned} F_1(\omega', \omega'') &= \omega' - \omega'' + \omega' A_0' - \omega'' A_0'' = 0, \\ F_2(\omega', \omega'') &= \ln\left(\frac{\omega'}{\omega''}\right) + f_r' + A_0' - f_r'' - A_0'' = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Алгоритм нахождения плотностей на основе уравнений (5) описан в приложении Д.

Давление насыщенного пара рассчитывают по уравнению (4) для относительной плотности насыщенного пара ω'' .

Рассчитанные стандартные справочные данные о плотности на линии насыщения, а также о давлении насыщенного пара гелия-4 приведены в приложении Е.

4 Неопределенности рассчитанных значений термодинамических свойств

Расширенная неопределенность значений плотности составляет: при температурах ниже 50 К и давлениях до 10 МПа с — 0,25 %; при температурах от 50 до 200 К и давлениях не более 50 МПа — 0,2 %; при температурах выше 200 К и давлениях до 50 МПа — 0,05 %; при температурах от 200 К до 500 К и давлениях до 40 МПа — 0,03 %; при температурах от 200 К до 500 К и давлениях от 40 до 100 МПа — 0,1 %. При остальных параметрах неопределенность расчета плотности составляет 0,5 %.

Расширенная неопределенность значений давления насыщенных паров составляет 0,05 %.

Расширенная неопределенность значений калорических свойств (изохорная и изобарная теплоемкости, энтальпия, энтропия) составляет 2 %.

Расширенная неопределенность значений термодинамических свойств гелия-4 получена путем умножения стандартной неопределенности на коэффициент охвата $k = 2$, соответствующий уровню доверия, равному 95 %. Оценивание неопределенности проведено в соответствии с [1].

Приложение А
(обязательное)

Основные физические параметры и коэффициенты уравнений для определения значений
стандартных справочных данных по свойствам гелия-4

Т а б л и ц а А.1 — Свойства и критические параметры гелия-4 (см. [1])

Свойства и критические параметры	Значения
Молярная масса M , г/моль	4,002602
Индивидуальная газовая постоянная R , Дж/(кг · К)	2077,264265
Критическая плотность $\rho_{кр}$, кг/м ³	69,580033
Критическая температура $T_{кр}$, К	5,1953
Критическое давление $p_{кр}$, МПа	0,22832
Критический коэффициент сжимаемости $z_{кр}$	0,304059

Т а б л и ц а А.2 — Коэффициенты для расчета формулы (3) (см. [1])

i	n_i	t_i	d_i	l_i	η_i	β_i	γ_i	ε_i
1	0,015559018	1	4	—	—	—	—	—
2	3,0638932	0,425	1	—	—	—	—	—
3	−4,2420844	0,63	1	—	—	—	—	—
4	0,054418088	0,69	2	—	—	—	—	—
5	−0,18971904	1,83	2	—	—	—	—	—
6	0,087856262	0,575	3	—	—	—	—	—
7	2,2833566	0,925	1	1	—	—	—	—
8	−0,53331595	1,585	1	2	—	—	—	—
9	−0,53296502	1,69	3	2	—	—	—	—
10	0,99444915	1,51	2	1	—	—	—	—
11	−0,30078896	2,9	2	2	—	—	—	—
12	−1,6432563	0,8	1	1	—	—	—	—
13	0,8029102	1,26	2	—	1,5497	0,2471	3,15	0,596
14	0,026838669	3,51	1	—	9,245	0,0983	2,54505	0,3423
15	0,04687678	2,785	2	—	4,76323	0,1556	1,2513	0,761
16	−0,14832766	1	1	—	6,3826	2,6782	1,9416	0,9747
17	0,03016211	4,22	1	—	8,7023	2,7077	0,5984	0,5868
18	−0,019986041	0,83	3	—	0,255	0,6621	2,2282	0,5627
19	0,14283514	1,575	2	—	0,3523	0,1775	1,606	2,5346
20	0,007418269	3,447	2	—	0,1492	0,4821	3,815	3,6763
21	−0,22989793	0,73	3	—	0,05	0,3069	1,61958	4,5245
22	0,79224829	1,634	2	—	0,1668	0,1758	0,6407	5,039
23	−0,049386338	6,13	2	—	42,2358	1357,6577	1,076	0,959

Таблица А.3 — Коэффициенты для расчета формулы (5) (см. [1])

i	n_i	t_i
1	2,697	0,44
2	−4,0115	0,72
3	5,5835	1
4	−4,7467	1,5
5	2,7509	2,5
6	−2,4711	5

Таблица А.4 — Коэффициенты для расчета формулы (6) (см. [1])

i	n_i	t_i
1	−1,8975	0,41
2	−6,9133	1,35
3	13,711	2
4	−14,644	2,5
5	−23,179	10

Таблица А.5 — Коэффициенты для расчета формулы (7) (см. [1])

i	n_i	t_i
1	−4,0558	1
2	0,69089	1,5
3	1,1982	2
4	0,79703	5
5	−9,0432	14

Приложение Б
(обязательное)

Алгоритм расчета плотности гелия-4 в однофазных областях итерационным методом

Определение относительной плотности ω в любой области параметров, определяющих состояние веществ (однофазная область, линия насыщения), используя уравнение

$$\pi = \frac{\omega(1 + A_0)}{\tau z_{кр}} \quad (\text{Б.1})$$

по методу Ньютона в следующем итерационном процессе:

1) Определяют ω на k -м итерационном шаге (начиная с $k = 1$) с помощью выражений:

$$\Delta\omega^{(k)} = \frac{\pi z_{кр} / \tau - \left(1 + A_0^{(k-1)}\right) \omega^{(k-1)}}{1 + A_1^{(k-1)}}; \quad (\text{Б.2})$$

$$\omega^{(k)} = \omega^{(k-1)} + \Delta\omega^{(k)}. \quad (\text{Б.3})$$

Комплексы $A_0^{(k-1)}$ и $A_1^{(k-1)}$ рассчитывают по формулам (Б.7) и (Б.8) при плотности на итерационном шаге $(k-1)$, т. е. при $\omega^{(k-1)}$:

$$X_i = \begin{cases} d_i, & 1 \leq i \leq 6; \\ d_i - l_i \omega^{l_i}, & 7 \leq i \leq 12; \\ d_i - 2\eta_i \omega(\omega - \varepsilon_i), & 13 \leq i \leq 23; \end{cases} \quad (\text{Б.4})$$

$$U_i = \begin{cases} 0, & 1 \leq i \leq 6; \\ -l_i^2 \omega^{l_i}, & 7 \leq i \leq 12; \\ -2\eta_i \omega(2\omega - \varepsilon_i), & 13 \leq i \leq 23; \end{cases} \quad (\text{Б.5})$$

$$\Phi_i = \begin{cases} \left(\omega^{(k-1)}\right)^{d_i} \tau^{-t_i}, & 1 \leq i \leq 6; \\ \left(\omega^{(k-1)}\right)^{d_i} \tau^{-t_i} \exp\left(-(\omega^{(k-1)})^{l_i}\right), & 7 \leq i \leq 12; \\ \left(\omega^{(k-1)}\right)^{d_i} \tau^{-t_i} \exp\left[-\eta_i \left(\omega^{(k-1)} - \varepsilon_i\right)^2 - \beta_i \left(\tau^{-1} - \gamma_i\right)^2\right], & 13 \leq i \leq 23; \end{cases} \quad (\text{Б.6})$$

$$A_0^{(k-1)} = \sum_{i=1}^{23} \eta_i \Phi_i X_i; \quad (\text{Б.7})$$

$$A_1^{(k-1)} = \sum_{i=1}^{23} \eta_i \Phi_i \left[X_i (X_i + 1) + U_i \right]. \quad (\text{Б.8})$$

Показатели степеней d_i , t_i , l_i и параметры η_i , ε_i , β_i , γ_i приведены в таблице А.2;

2) Критерий завершения итерационного процесса определяют следующим образом

$$\left| \frac{\Delta \omega^{(k)}}{\omega^{(k)}} \right| \leq 10^{-6}. \quad (\text{Б.9})$$

При невыполнении критерия (Б.9) необходимо продолжить итерационный процесс, начиная с пункта 1), в обратном случае перейти к пункту 3);

3) Вычисляют плотность ρ , кг/м³, по уравнению

$$\rho = \omega^{(k)} \rho_{\text{кр}}. \quad (\text{Б.10})$$

Приложение В
(обязательное)

Алгоритм расчета энтальпии, энтропии, изохорной и изобарной теплоемкостей гелия-4

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

$$h = h_0 + A_3 RT; \quad (\text{B.1})$$

$$s = s_0 + A_4 R; \quad (\text{B.2})$$

$$c_v = c_{v0} + A_5 R; \quad (\text{B.3})$$

$$c_p = c_v + \frac{(1 + A_2)^2}{1 + A_1} R. \quad (\text{B.4})$$

Энтальпию h_0 , энтропию s_0 и изохорную теплоемкость c_{v0} в идеально-газовом состоянии определяют по выражениям:

$$h_0 = RT(a_0 + a_2 \tau^{-1}); \quad (\text{B.5})$$

$$s_0 = R((a_0 - 1)(1 - \ln \tau^{-1}) - a_1 - \ln \omega); \quad (\text{B.6})$$

$$c_{v0} = R(a_0 - 1). \quad (\text{B.7})$$

Комплексы A_1 — A_5 в формулах (B.1)—(B.4) рассчитывают по выражениям:

$$Y_i = \begin{cases} -t_i, & 1 \leq i \leq 6; \\ -t_i, & 7 \leq i \leq 12; \\ 2\beta_i \tau^{-1} (\tau^{-1} - \gamma_i) - t_i, & 13 \leq i \leq 23; \end{cases} \quad (\text{B.8})$$

$$Q_i = \begin{cases} 0, & 1 \leq i \leq 6; \\ 0, & 7 \leq i \leq 12; \\ -2\beta_i \tau^{-1} (2\tau^{-1} - \gamma_i), & 13 \leq i \leq 23; \end{cases} \quad (\text{B.9})$$

$$\Phi_i = \begin{cases} \omega^{d_i} \tau^{-t_i}, & 1 \leq i \leq 6; \\ \omega^{d_i} \tau^{-t_i} \exp(-\omega^{t_i}), & 7 \leq i \leq 12; \\ \omega^{d_i} \tau^{-t_i} \exp\left[-\eta_i (\omega - \varepsilon_i)^2 - \beta_i (\tau^{-1} - \gamma_i)^2\right], & 13 \leq i \leq 23; \end{cases} \quad (\text{B.10})$$

$$A_1 = \sum_{i=1}^{23} n_i \varphi_i [X_i (X_i + 1) + U_i]; \quad (\text{B.11})$$

$$A_2 = \sum_{i=1}^{23} n_i \varphi_i [X_i (Y_i + 1)]; \quad (\text{B.12})$$

$$A_3 = \sum_{i=1}^{23} n_i \varphi_i [X_i - Y_i]; \quad (\text{B.13})$$

$$A_4 = -\sum_{i=1}^{23} n_i \varphi_i [Y_i + 1]; \quad (\text{B.14})$$

$$A_5 = -\sum_{i=1}^{23} n_i \varphi_i [Y_i (Y_i + 1) + Q_i]. \quad (\text{B.15})$$

Здесь X_i и U_i рассчитывают по формулам (Б.4) и (Б.5).

Приложение Г
(обязательное)

**Стандартные справочные данные о плотности, энтальпии, энтропии, изохорной
и изобарной теплоемкостях гелия-4 в однофазных областях**

Т а б л и ц а Г.1 — Термодинамические свойства гелия-4 при давлении 0,1 МПа

T , К	ρ , кг/м ³	h , кДж/кг	s , кДж/(кг · К)	c_v , кДж/(кг · К)	c_p , кДж/(кг · К)
2,5000	146,73	−5,4323	−1,5905	2,0568	2,2287
3,0000	143,07	−4,2722	−1,1683	2,0016	2,5103
4,0000	19,880	18,241	4,3204	3,2663	13,933
5,0000	11,757	26,627	6,2135	3,1593	6,7399
6,0000	9,0147	32,929	7,3646	3,1325	6,0031
7,0000	7,4210	38,770	8,2655	3,1234	5,7143
8,0000	6,3445	44,402	9,0178	3,1197	5,5632
9,0000	5,5576	49,916	9,6674	3,1180	5,4721
10,000	4,9528	55,357	10,240	3,1171	5,4122
25,000	1,9245	134,50	15,087	3,1170	5,2258
50,000	0,9608	264,74	18,699	3,1170	5,2012
75,000	0,64076	394,70	20,806	3,1167	5,1966
100,00	0,48072	524,59	22,301	3,1166	5,1949
125,00	0,38467	654,46	23,460	3,1164	5,1942
150,00	0,32062	784,31	24,407	3,1163	5,1938
175,00	0,27485	914,15	25,208	3,1163	5,1935
200,00	0,24052	1043,9	25,901	3,1162	5,1934
225,00	0,21381	1173,8	26,513	3,1162	5,1933
250,00	0,19244	1303,6	27,060	3,1161	5,1932
275,00	0,17496	1433,4	27,555	3,1161	5,1932
300,00	0,16039	1563,3	28,007	3,1161	5,1931
325,00	0,14805	1693,1	28,423	3,1161	5,1931
350,00	0,13748	1822,9	28,808	3,1161	5,1931
375,00	0,12832	1952,8	29,166	3,1160	5,1931
400,00	0,12030	2082,6	29,501	3,1160	5,1931
425,00	0,11323	2212,4	29,816	3,1160	5,1931
450,00	0,10694	2342,2	30,113	3,1160	5,1931
475,00	0,10131	2472,1	30,393	3,1160	5,1931
500,00	0,096254	2601,9	30,660	3,1160	5,1931

Таблица Г.2 — Термодинамические свойства гелия-4 при давлении 0,2 МПа

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_v, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$
2,5000	148,63	−4,8148	−1,6143	1,9738	2,1282
3,0000	145,31	−3,7024	−1,2095	1,9630	2,4061
4,0000	133,87	−0,69436	−0,35337	2,2924	3,7853
5,0000	101,60	5,6819	1,0356	2,8626	18,013
6,0000	21,299	28,738	5,4676	3,1486	7,7577
7,0000	16,288	35,757	6,5520	3,1261	6,5254
8,0000	13,469	42,021	7,3890	3,1208	6,0586
9,0000	11,582	47,946	8,0872	3,1186	5,8142
10,000	10,203	53,680	8,6915	3,1175	5,6659
25,000	3,8466	134,14	13,631	3,1180	5,2581
50,000	1,9176	264,78	17,255	3,1181	5,2092
75,000	1,2793	394,87	19,365	3,1176	5,2000
100,00	0,96011	524,83	20,861	3,1173	5,1967
125,00	0,76846	654,73	22,020	3,1170	5,1952
150,00	0,64061	784,60	22,967	3,1168	5,1944
175,00	0,54925	914,45	23,768	3,1167	5,1940
200,00	0,48069	1044,3	24,462	3,1166	5,1937
225,00	0,42735	1174,1	25,073	3,1165	5,1935
250,00	0,38467	1303,9	25,620	3,1164	5,1933
275,00	0,34974	1433,8	26,115	3,1164	5,1933
300,00	0,32063	1563,6	26,567	3,1163	5,1932
325,00	0,29599	1693,4	26,983	3,1163	5,1931
350,00	0,27486	1823,3	27,368	3,1163	5,1931
375,00	0,25655	1953,1	27,726	3,1162	5,1931
400,00	0,24053	2082,9	28,061	3,1162	5,1931
425,00	0,22639	2212,7	28,376	3,1162	5,1930
450,00	0,21382	2342,6	28,673	3,1162	5,1930
475,00	0,20258	2472,4	28,954	3,1161	5,1930
500,00	0,19245	2602,2	29,220	3,1161	5,1930

Таблица Г.3 — Термодинамические свойства гелия-4 при давлении 0,3 МПа

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_v, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$
2,5000	150,39	−4,1998	−1,6358	1,9009	2,0415
3,0000	147,33	−3,1277	−1,2457	1,9275	2,3205
4,0000	137,21	−0,27104	−0,43192	2,2652	3,5058
5,0000	117,26	4,4729	0,61396	2,5816	6,8473
6,0000	41,716	22,760	3,9031	3,189	13,058
7,0000	27,405	32,249	5,3750	3,1115	7,7939
8,0000	21,615	39,415	6,3335	3,1133	6,7118
9,0000	18,160	45,859	7,0931	3,1154	6,2290
10,000	15,785	51,941	7,7342	3,1161	5,9578
25,000	5,7656	133,79	12,774	3,1191	5,2901
50,000	2,8703	264,83	16,410	3,1192	5,2171
75,000	1,9156	395,05	18,522	3,1185	5,2034
100,00	1,4381	525,07	20,018	3,1180	5,1985
125,00	1,1513	655,00	21,178	3,1176	5,1963
150,00	0,95999	784,89	22,125	3,1173	5,1951
175,00	0,82318	914,76	22,926	3,1171	5,1944
200,00	0,72052	1044,6	23,619	3,1170	5,1939
225,00	0,64062	1174,4	24,231	3,1168	5,1937
250,00	0,57668	1304,3	24,778	3,1167	5,1935
275,00	0,52434	1434,1	25,273	3,1167	5,1933
300,00	0,48071	1563,9	25,725	3,1166	5,1932
325,00	0,44379	1693,8	26,141	3,1165	5,1931
350,00	0,41213	1823,6	26,526	3,1165	5,1931
375,00	0,38469	1953,4	26,884	3,1164	5,1931
400,00	0,36068	2083,2	27,219	3,1164	5,1930
425,00	0,33948	2213,1	27,534	3,1163	5,1930
450,00	0,32064	2342,9	27,831	3,1163	5,1930
475,00	0,30378	2472,7	28,112	3,1163	5,1930
500,00	0,28861	2602,5	28,378	3,1163	5,1930

Таблица Г.4 — Термодинамические свойства гелия-4 при давлении 0,4 МПа

T , К	ρ , кг/м ³	h , кДж/кг	s , кДж/(кг · К)	c_v , кДж/(кг · К)	c_p , кДж/(кг · К)
2,5000	152,03	−3,5877	−1,6555	1,8362	1,9658
3,0000	149,19	−2,5505	−1,2781	1,8948	2,2480
4,0000	140,04	0,18988	−0,49699	2,2414	3,3112
5,0000	123,99	4,4007	0,43402	2,5265	5,4747
6,0000	80,552	14,354	2,2122	3,0577	20,521
7,0000	41,582	28,333	4,3921	3,0782	9,5217
8,0000	30,986	36,634	5,5035	3,0918	7,4856
9,0000	25,360	43,680	6,3344	3,1055	6,7003
10,000	21,723	50,152	7,0166	3,1116	6,2806
25,000	7,6807	133,45	12,161	3,1202	5,3219
50,000	3,8191	264,87	15,809	3,1203	5,2249
75,000	2,5497	395,23	17,923	3,1194	5,2067
100,00	1,9148	525,30	19,420	3,1187	5,2003
125,00	1,5333	655,27	20,580	3,1182	5,1973
150,00	1,2787	785,18	21,527	3,1178	5,1957
175,00	1,0966	915,06	22,328	3,1176	5,1948
200,00	0,95999	1044,9	23,022	3,1173	5,1942
225,00	0,85361	1174,7	23,634	3,1172	5,1938
250,00	0,76846	1304,6	24,181	3,1170	5,1936
275,00	0,69876	1434,4	24,676	3,1169	5,1934
300,00	0,64065	1564,3	25,128	3,1168	5,1933
325,00	0,59146	1694,1	25,543	3,1167	5,1932
350,00	0,54929	1823,9	25,928	3,1167	5,1931
375,00	0,51273	1953,7	26,286	3,1166	5,1930
400,00	0,48074	2083,6	26,622	3,1166	5,1930
425,00	0,45250	2213,4	26,936	3,1165	5,1930
450,00	0,42740	2343,2	27,233	3,1165	5,1929
475,00	0,40493	2473,0	27,514	3,1164	5,1929
500,00	0,38471	2602,9	27,780	3,1164	5,1929

Таблица Г.5 — Термодинамические свойства гелия-4 при давлении 0,5 МПа

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_v, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$
2,5000	153,58	−2,9789	−1,6737	1,7784	1,8989
3,0000	150,92	−1,9721	−1,3075	1,8643	2,1853
4,0000	142,52	0,67404	−0,55287	2,2193	3,1639
5,0000	128,73	4,5688	0,30948	2,4958	4,8306
6,0000	102,21	11,334	1,5299	2,7878	9,8271
7,0000	58,442	24,404	3,5415	3,0406	11,402
8,0000	41,477	33,851	4,8076	3,0593	8,2281
9,0000	33,157	41,483	5,7076	3,0878	7,1683
10,000	28,005	48,347	6,4314	3,1030	6,6099
25,000	9,5915	133,11	11,682	3,1213	5,3533
50,000	4,7638	264,93	15,342	3,1214	5,2326
75,000	3,1817	395,40	17,458	3,1203	5,2100
100,00	2,3902	525,54	18,956	3,1194	5,2020
125,00	1,9145	655,54	20,116	3,1188	5,1983
150,00	1,5968	785,47	21,064	3,1183	5,1964
175,00	1,3696	915,37	21,865	3,1180	5,1952
200,00	1,1991	1045,2	22,558	3,1177	5,1945
225,00	1,0663	1175,1	23,170	3,1175	5,1940
250,00	0,96002	1304,9	23,717	3,1173	5,1937
275,00	0,87299	1434,7	24,212	3,1172	5,1935
300,00	0,80043	1564,6	24,664	3,1171	5,1933
325,00	0,73901	1694,4	25,080	3,1170	5,1932
350,00	0,68634	1824,2	25,465	3,1169	5,1931
375,00	0,64068	1954,1	25,823	3,1168	5,1930
400,00	0,60072	2083,9	26,158	3,1167	5,1930
425,00	0,56545	2213,7	26,473	3,1167	5,1929
450,00	0,53409	2343,5	26,770	3,1166	5,1929
475,00	0,50602	2473,4	27,051	3,1166	5,1929
500,00	0,48076	2603,2	27,317	3,1165	5,1929

Таблица Г.6 — Термодинамические свойства гелия-4 при давлении 0,6 МПа

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_v, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$
2,5000	155,04	−2,3732	−1,6907	1,7265	1,8394
3,0000	152,53	−1,3936	−1,3343	1,8358	2,1301
4,0000	144,75	1,1736	−0,602	2,1983	3,0464
5,0000	132,50	4,8485	0,21237	2,4727	4,4354
6,0000	111,89	10,564	1,2464	2,7093	7,4576
7,0000	76,375	20,865	2,8229	2,9735	12,333
8,0000	52,579	31,269	4,2176	3,0273	8,8568
9,0000	41,367	39,382	5,1746	3,0652	7,5574
10,000	34,561	46,586	5,9342	3,0905	6,9069
25,000	11,497	132,78	11,289	3,1224	5,3843
50,000	5,7044	264,98	14,960	3,1225	5,2401
75,000	3,8114	395,58	17,078	3,1212	5,2133
100,00	2,8643	525,78	18,576	3,1201	5,2038
125,00	2,2948	655,81	19,737	3,1194	5,1994
150,00	1,9144	785,77	20,685	3,1188	5,1970
175,00	1,6422	915,67	21,486	3,1184	5,1956
200,00	1,4378	1045,5	22,180	3,1181	5,1948
225,00	1,2787	1175,4	22,791	3,1178	5,1942
250,00	1,1513	1305,2	23,339	3,1176	5,1938
275,00	1,0470	1435,1	23,834	3,1175	5,1935
300,00	0,96007	1564,9	24,286	3,1173	5,1933
325,00	0,88643	1694,7	24,701	3,1172	5,1932
350,00	0,82328	1824,6	25,086	3,1171	5,1931
375,00	0,76854	1954,4	25,444	3,1170	5,1930
400,00	0,72062	2084,2	25,780	3,1169	5,1929
425,00	0,67832	2214,0	26,094	3,1168	5,1929
450,00	0,64071	2343,9	26,391	3,1168	5,1929
475,00	0,60706	2473,7	26,672	3,1167	5,1928
500,00	0,57676	2603,5	26,938	3,1167	5,1928

Таблица Г.7 — Термодинамические свойства гелия-4 при давлении 0,7 МПа

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_v, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$
2,5000	156,44	−1,7708	−1,7066	1,6796	1,7861
3,0000	154,06	−0,81539	−1,3590	1,8091	2,0809
4,0000	146,78	1,6838	−0,64594	2,1783	2,9493
5,0000	135,67	5,1927	0,13208	2,4527	4,1604
6,0000	118,36	10,327	1,0623	2,6720	6,3669
7,0000	90,930	18,542	2,3208	2,8877	10,249
8,0000	63,829	28,947	3,7119	2,9988	9,4200
9,0000	49,717	37,466	4,7171	3,0425	7,8581
10,000	41,263	44,932	5,5043	3,0755	7,1421
25,000	13,396	132,46	10,954	3,1235	5,4148
50,000	6,6410	265,03	14,636	3,1236	5,2476
75,000	4,4390	395,76	16,757	3,1221	5,2165
100,00	3,3370	526,02	18,256	3,1208	5,2055
125,00	2,6741	656,09	19,417	3,1200	5,2004
150,00	2,2313	786,06	20,365	3,1193	5,1977
175,00	1,9143	915,98	21,166	3,1188	5,1961
200,00	1,6763	1045,8	21,859	3,1185	5,1950
225,00	1,4909	1175,7	22,471	3,1182	5,1944
250,00	1,3424	1305,5	23,019	3,1179	5,1939
275,00	1,2209	1435,4	23,514	3,1177	5,1936
300,00	1,1195	1565,2	23,965	3,1176	5,1934
325,00	1,0337	1695,1	24,381	3,1174	5,1932
350,00	0,96012	1824,9	24,766	3,1173	5,1931
375,00	0,89630	1954,7	25,124	3,1172	5,1930
400,00	0,84043	2084,5	25,459	3,1171	5,1929
425,00	0,79112	2214,4	25,774	3,1170	5,1928
450,00	0,74728	2344,2	26,071	3,1169	5,1928
475,00	0,70804	2474,0	26,352	3,1169	5,1928
500,00	0,67271	2603,8	26,618	3,1168	5,1928

Таблица Г.8 — Термодинамические свойства гелия-4 при давлении 0,8 МПа

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_v, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$
2,5000	157,77	−1,1717	−1,7215	1,6371	1,7382
3,0000	155,50	−0,23815	−1,3819	1,7839	2,0365
4,0000	148,65	2,2015	−0,68574	2,1588	2,8668
5,0000	138,43	5,5783	0,063303	2,4345	3,9542
6,0000	123,29	10,330	0,92484	2,6478	5,7138
7,0000	100,78	17,382	2,0063	2,8326	8,5180
8,0000	74,822	26,909	3,2766	2,9671	9,6679
9,0000	58,008	35,750	4,3197	3,0224	8,1195
10,000	47,970	43,425	5,1291	3,0601	7,3195
25,000	15,290	132,15	10,662	3,1246	5,4449
50,000	7,5735	265,09	14,355	3,1248	5,2550
75,000	5,0643	395,94	16,478	3,1229	5,2197
100,00	3,8084	526,26	17,978	3,1216	5,2072
125,00	3,0527	656,36	19,139	3,1206	5,2014
150,00	2,5475	786,35	20,087	3,1198	5,1983
175,00	2,1860	916,29	20,888	3,1193	5,1965
200,00	1,9144	1046,1	21,582	3,1188	5,1953
225,00	1,7028	1176,0	22,194	3,1185	5,1946
250,00	1,5333	1305,9	22,741	3,1182	5,1940
275,00	1,3946	1435,7	23,236	3,1180	5,1937
300,00	1,2788	1565,6	23,688	3,1178	5,1934
325,00	1,1808	1695,4	24,104	3,1176	5,1932
350,00	1,0968	1825,2	24,489	3,1175	5,1931
375,00	1,0239	1955,0	24,847	3,1174	5,1930
400,00	0,96017	2084,9	25,182	3,1173	5,1929
425,00	0,90385	2214,7	25,497	3,1172	5,1928
450,00	0,85378	2344,5	25,794	3,1171	5,1928
475,00	0,80896	2474,3	26,075	3,1170	5,1927
500,00	0,76861	2604,2	26,341	3,1169	5,1927

Таблица Г.9 — Термодинамические свойства гелия-4 при давлении 0,9 МПа

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_v, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$
2,5000	159,04	−0,57579	−1,7357	1,5984	1,6948
3,0000	156,87	0,33788	−1,4033	1,7601	1,9962
4,0000	150,39	2,7247	−0,72214	2,1400	2,7954
5,0000	140,89	5,9925	0,002959	2,4172	3,7917
6,0000	127,31	10,467	0,81471	2,6288	5,2711
7,0000	108,00	16,794	1,7857	2,7991	7,4767
8,0000	84,705	25,308	2,9198	2,9337	9,2233
9,0000	66,138	34,210	3,9694	3,0040	8,3450
10,000	54,583	42,069	4,7983	3,0458	7,4662
25,000	17,176	131,85	10,404	3,1257	5,4742
50,000	8,5018	265,15	14,108	3,1259	5,2623
75,000	5,6876	396,12	16,232	3,1238	5,2229
100,00	4,2785	526,50	17,733	3,1223	5,2089
125,00	3,4303	656,63	18,894	3,1211	5,2024
150,00	2,8632	786,64	19,842	3,1203	5,1989
175,00	2,4572	916,59	20,644	3,1197	5,1969
200,00	2,1521	1046,5	21,337	3,1192	5,1956
225,00	1,9144	1176,3	21,949	3,1188	5,1947
250,00	1,7240	1306,2	22,497	3,1185	5,1941
275,00	1,5681	1436,0	22,992	3,1183	5,1937
300,00	1,4380	1565,9	23,444	3,1180	5,1934
325,00	1,3279	1695,7	23,859	3,1179	5,1932
350,00	1,2334	1825,5	24,244	3,1177	5,1931
375,00	1,1515	1955,4	24,602	3,1176	5,1929
400,00	1,0798	2085,2	24,938	3,1174	5,1928
425,00	1,0165	2215,0	25,252	3,1173	5,1928
450,00	0,96021	2344,8	25,549	3,1172	5,1927
475,00	0,90982	2474,7	25,830	3,1172	5,1927
500,00	0,86446	2604,5	26,096	3,1171	5,1927

Таблица Г.10 — Термодинамические свойства гелия-4 при давлении 1 МПа

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_v, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$
2,5000	160,26	0,016939	−1,7491	1,5631	1,6553
3,0000	158,18	0,91246	−1,4234	1,7376	1,9594
4,0000	152,02	3,2517	−0,75572	2,1218	2,7324
5,0000	143,11	6,4273	−0,050913	2,4007	3,6589
6,0000	130,72	10,689	0,72259	2,6124	4,9476
7,0000	113,69	16,513	1,6166	2,7764	6,7757
8,0000	92,914	24,210	2,6418	2,9053	8,4789
9,0000	73,969	32,848	3,6593	2,9860	8,4419
10,000	61,055	40,848	4,5030	3,0326	7,5991
25,000	19,054	131,55	10,171	3,1268	5,5029
50,000	9,4261	265,22	13,886	3,1270	5,2694
75,000	6,3086	396,31	16,012	3,1247	5,2261
100,00	4,7473	526,74	17,513	3,1230	5,2106
125,00	3,8071	656,90	18,675	3,1217	5,2034
150,00	3,1783	786,94	19,623	3,1208	5,1996
175,00	2,7280	916,90	20,425	3,1201	5,1973
200,00	2,3895	1046,8	21,119	3,1196	5,1959
225,00	2,1258	1176,7	21,731	3,1192	5,1949
250,00	1,9145	1306,5	22,278	3,1188	5,1943
275,00	1,7414	1436,4	22,773	3,1185	5,1938
300,00	1,5971	1566,2	23,225	3,1183	5,1935
325,00	1,4748	1696,0	23,641	3,1181	5,1932
350,00	1,3699	1825,9	24,025	3,1179	5,1931
375,00	1,2790	1955,7	24,384	3,1178	5,1929
400,00	1,1993	2085,5	24,719	3,1176	5,1928
425,00	1,1291	2215,3	25,034	3,1175	5,1927
450,00	1,0665	2345,2	25,330	3,1174	5,1927
475,00	1,0106	2475,0	25,611	3,1173	5,1926
500,00	0,96026	2604,8	25,878	3,1172	5,1926

Таблица Г.11 — Термодинамические свойства гелия-4 при давлении 2 МПа

$T, \text{ K}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{ K)}$	$c_v, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{ K)}$	$c_p, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{ K)}$
3,0000	168,91	6,5581	−1,5766	1,5622	1,7050
4,0000	164,59	8,5815	−0,99882	1,9642	2,3387
5,0000	158,73	11,238	−0,40856	2,2605	2,9810
6,0000	151,37	14,559	0,19503	2,4881	3,6710
7,0000	142,51	18,602	0,81680	2,6608	4,4268
8,0000	132,18	23,431	1,4603	2,7888	5,2341
9,0000	120,70	29,056	2,1220	2,8821	5,9945
10,000	108,88	35,350	2,7846	2,9497	6,5478
25,000	37,214	129,23	8,6098	3,1385	5,7277
50,000	18,441	265,98	12,416	3,1383	5,3354
75,000	12,401	398,18	14,561	3,1336	5,2557
100,00	9,3643	529,16	16,068	3,1301	5,2267
125,00	7,5281	659,64	17,233	3,1276	5,2131
150,00	6,2959	789,87	18,183	3,1258	5,2057
175,00	5,4111	919,95	18,985	3,1244	5,2013
200,00	4,7446	1049,9	19,679	3,1233	5,1985
225,00	4,2245	1179,8	20,292	3,1225	5,1966
250,00	3,8072	1309,7	20,839	3,1218	5,1954
275,00	3,4650	1439,6	21,334	3,1212	5,1945
300,00	3,1792	1569,5	21,786	3,1207	5,1938
325,00	2,9370	1699,3	22,202	3,1203	5,1933
350,00	2,7291	1829,1	22,587	3,1200	5,1930
375,00	2,5486	1959,0	22,945	3,1196	5,1927
400,00	2,3906	2088,8	23,280	3,1194	5,1925
425,00	2,2510	2218,6	23,595	3,1191	5,1924
450,00	2,1268	2348,4	23,892	3,1189	5,1923
475,00	2,0156	2478,2	24,172	3,1187	5,1922
500,00	1,9154	2608,0	24,439	3,1186	5,1921

Таблица Г.12 — Термодинамические свойства гелия-4 при давлении 3 МПа

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_v, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$
2,5000	178,38	11,306	−1,9406	1,2177	1,2806
3,0000	177,06	12,014	−1,6833	1,4444	1,5566
4,0000	173,55	13,855	−1,1577	1,8420	2,1224
5,0000	168,93	16,255	−0,62429	2,1508	2,6781
6,0000	163,30	19,212	−0,086837	2,3933	3,2350
7,0000	156,74	22,727	0,45397	2,5814	3,7968
8,0000	149,32	26,806	0,9978	2,7243	4,3606
9,0000	141,17	31,444	1,5434	2,8310	4,9116
10,000	132,49	36,614	2,0877	2,9099	5,4166
25,000	53,797	128,17	7,6810	3,1496	5,8376
50,000	27,037	267,00	11,547	3,1498	5,3898
75,000	18,283	400,15	13,708	3,1424	5,2822
100,00	13,855	531,63	15,222	3,1371	5,2415
125,00	11,165	662,40	16,389	3,1334	5,2221
150,00	9,3545	792,81	17,340	3,1307	5,2114
175,00	8,0505	923,01	18,143	3,1286	5,2051
200,00	7,0662	1053,0	18,838	3,1270	5,2010
225,00	6,2967	1183,0	19,450	3,1257	5,1983
250,00	5,6785	1313,0	19,998	3,1247	5,1964
275,00	5,1709	1442,9	20,493	3,1239	5,1951
300,00	4,7466	1572,7	20,945	3,1231	5,1942
325,00	4,3867	1702,6	21,361	3,1225	5,1935
350,00	4,0775	1832,4	21,745	3,1220	5,1929
375,00	3,8091	1962,2	22,104	3,1215	5,1925
400,00	3,5738	2092,0	22,439	3,1211	5,1922
425,00	3,3658	2221,8	22,754	3,1208	5,1920
450,00	3,1808	2351,6	23,050	3,1205	5,1918
475,00	3,0150	2481,4	23,331	3,1202	5,1917
500,00	2,8656	2611,2	23,597	3,1199	5,1916

Таблица Г.13 — Термодинамические свойства гелия-4 при давлении 4 МПа

T , К	ρ , кг/м ³	h , кДж/кг	s , кДж/(кг · К)	c_v , кДж/(кг · К)	c_p , кДж/(кг · К)
2,5000	184,96	16,634	−2,0105	1,1571	1,2175
3,0000	183,75	17,302	−1,7678	1,3602	1,4577
5,0000	176,78	21,249	−0,78174	2,0619	2,4871
6,0000	172,07	23,987	−0,28403	2,3157	2,9855
7,0000	166,66	27,216	0,21280	2,5160	3,4706
8,0000	160,64	30,923	0,70711	2,6712	3,9408
9,0000	154,08	35,092	1,1975	2,7896	4,3923
10,000	147,11	39,699	1,6825	2,8790	4,8159
25,000	68,620	128,11	7,0237	3,1606	5,8901
50,000	35,212	268,27	10,927	3,1613	5,4325
75,000	23,962	402,22	13,101	3,1512	5,3054
100,00	18,225	534,14	14,620	3,1441	5,2551
125,00	14,722	665,18	15,789	3,1392	5,2305
150,00	12,356	795,76	16,742	3,1356	5,2169
175,00	10,647	926,08	17,545	3,1328	5,2087
200,00	9,3551	1056,2	18,241	3,1307	5,2034
225,00	8,3431	1186,2	18,853	3,1290	5,1999
250,00	7,5289	1316,2	19,401	3,1276	5,1975
275,00	6,8596	1446,1	19,896	3,1265	5,1957
300,00	6,2996	1576,0	20,348	3,1255	5,1945
325,00	5,8242	1705,8	20,764	3,1247	5,1936
350,00	5,4155	1835,7	21,149	3,1240	5,1929
375,00	5,0604	1965,5	21,507	3,1234	5,1923
400,00	4,7490	2095,3	21,842	3,1229	5,1919
425,00	4,4737	2225,1	22,157	3,1224	5,1916
450,00	4,2286	2354,9	22,454	3,1220	5,1914
475,00	4,0089	2484,7	22,734	3,1216	5,1912
500,00	3,8109	2614,4	23,001	3,1213	5,1911

Таблица Г.14 — Термодинамические свойства гелия-4 при давлении 5 МПа

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_v, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$
2,5000	190,63	21,802	−2,0728	1,1235	1,1837
3,0000	189,50	22,443	−1,8394	1,2977	1,3877
4,0000	186,74	24,067	−1,3757	1,6668	1,8669
5,0000	183,26	26,176	−0,90688	1,9880	2,3496
6,0000	179,14	28,760	−0,43716	2,2500	2,8140
7,0000	174,45	31,798	0,030257	2,4599	3,2581
8,0000	169,27	35,269	0,49314	2,6251	3,6804
9,0000	163,67	39,151	0,94991	2,7531	4,0796
10,000	157,72	43,420	1,3993	2,8516	4,4533
25,000	81,808	128,78	6,5180	3,1726	5,9028
50,000	42,971	269,77	10,444	3,1728	5,4650
75,000	29,444	404,37	12,629	3,1600	5,3255
100,00	22,477	536,70	14,152	3,1511	5,2674
125,00	18,201	667,98	15,324	3,1449	5,2384
150,00	15,302	798,72	16,278	3,1404	5,2221
175,00	13,203	929,14	17,082	3,1370	5,2122
200,00	11,612	1059,3	17,778	3,1344	5,2058
225,00	10,364	1189,4	18,390	3,1323	5,2015
250,00	9,3587	1319,4	18,938	3,1305	5,1985
275,00	8,5313	1449,3	19,434	3,1291	5,1964
300,00	7,8384	1579,2	19,886	3,1279	5,1948
325,00	7,2496	1709,1	20,301	3,1269	5,1937
350,00	6,7432	1838,9	20,686	3,1261	5,1928
375,00	6,3028	1968,7	21,045	3,1253	5,1922
400,00	5,9164	2098,5	21,380	3,1246	5,1917
425,00	5,5747	2228,3	21,694	3,1240	5,1913
450,00	5,2703	2358,1	21,991	3,1235	5,1910
475,00	4,9973	2487,9	22,272	3,1231	5,1908
500,00	4,7513	2617,6	22,538	3,1227	5,1906

Таблица Г.15 — Термодинамические свойства гелия-4 при давлении 10 МПа

T , К	ρ , кг/м ³	h , кДж/кг	s , кДж/(кг · К)	c_v , кДж/(кг · К)	c_p , кДж/(кг · К)
4,0000	208,54	47,928	−1,7143	1,4416	1,5852
5,0000	206,04	49,712	−1,3180	1,7513	1,9803
6,0000	203,23	51,885	−0,92276	2,0232	2,3638
7,0000	200,12	54,433	−0,53065	2,2563	2,7291
8,0000	196,73	57,335	−0,14371	2,4506	3,0694
9,0000	193,10	60,563	0,23618	2,6094	3,3827
10,000	189,29	64,092	0,60767	2,7377	3,6698
25,000	128,96	138,70	5,0245	3,2337	5,6437
50,000	76,231	279,86	8,9438	3,2280	5,5469
75,000	54,144	416,33	11,159	3,2027	5,3902
100,00	42,115	550,01	12,698	3,1852	5,3124
125,00	34,511	682,24	13,878	3,1730	5,2693
150,00	29,255	813,62	14,836	3,1642	5,2434
175,00	25,398	944,49	15,643	3,1575	5,2269
200,00	22,444	1075,0	16,341	3,1524	5,2160
225,00	20,108	1205,3	16,954	3,1482	5,2084
250,00	18,214	1335,4	17,503	3,1449	5,2030
275,00	16,646	1465,4	17,999	3,1421	5,1991
300,00	15,327	1595,4	18,451	3,1398	5,1963
325,00	14,202	1725,3	18,867	3,1378	5,1941
350,00	13,231	1855,1	19,252	3,1361	5,1925
375,00	12,384	1984,9	19,610	3,1346	5,1913
400,00	11,639	2114,7	19,945	3,1333	5,1903
425,00	10,978	2244,4	20,259	3,1321	5,1896
450,00	10,389	2374,1	20,556	3,1311	5,1891
475,00	9,8597	2503,9	20,837	3,1302	5,1886
500,00	9,3814	2633,6	21,103	3,1294	5,1883

Таблица Г.16 — Термодинамические свойства гелия-4 при давлении 20 МПа

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_v, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$
6,0000	231,74	94,543	−1,4450	1,7966	2,0274
7,0000	229,52	96,718	−1,1102	2,0197	2,3245
8,0000	227,15	99,190	−0,78052	2,2268	2,6171
9,0000	224,65	101,94	−0,45616	2,4093	2,8924
10,000	222,04	104,96	−0,13811	2,5656	3,1454
25,000	178,36	170,11	3,7045	3,3149	5,1124
50,000	123,28	306,24	7,4631	3,3256	5,5341
75,000	93,025	443,51	9,6908	3,2805	5,4416
100,00	74,750	578,45	11,244	3,2484	5,3591
125,00	62,551	711,71	12,433	3,2257	5,3051
150,00	53,815	843,87	13,397	3,2091	5,2701
175,00	47,239	975,31	14,208	3,1965	5,2465
200,00	42,105	1106,2	14,907	3,1867	5,2301
225,00	37,983	1236,8	15,523	3,1789	5,2183
250,00	34,598	1367,2	16,072	3,1725	5,2097
275,00	31,769	1497,3	16,568	3,1671	5,2033
300,00	29,368	1627,3	17,021	3,1626	5,1984
325,00	27,305	1757,2	17,437	3,1588	5,1947
350,00	25,512	1887,1	17,821	3,1555	5,1919
375,00	23,941	2016,9	18,180	3,1526	5,1897
400,00	22,551	2146,6	18,514	3,1501	5,1879
425,00	21,314	2276,3	18,829	3,1479	5,1866
450,00	20,206	2405,9	19,125	3,1459	5,1855
475,00	19,206	2535,5	19,406	3,1441	5,1847
500,00	18,301	2665,1	19,672	3,1425	5,1841

Таблица Г.17 — Термодинамические свойства гелия-4 при давлении 30 МПа

T , К	ρ , кг/м ³	h , кДж/кг	s , кДж/(кг · К)	c_v , кДж/(кг · К)	c_p , кДж/(кг · К)
7,0000	249,25	135,82	−1,4823	1,8860	2,1557
8,0000	247,19	138,11	−1,1776	2,0831	2,4147
9,0000	245,06	140,65	−0,87822	2,2701	2,6703
10,000	242,86	143,44	−0,58428	2,4379	2,9105
25,000	206,78	204,30	3,0018	3,3517	4,8075
50,000	155,41	335,79	6,6216	3,4055	5,4657
75,000	122,46	472,51	8,8394	3,3489	5,4463
100,00	100,96	607,82	10,396	3,3053	5,3797
125,00	85,932	741,62	11,591	3,2739	5,3263
150,00	74,840	874,26	12,558	3,2507	5,2873
175,00	66,311	1006,0	13,371	3,2330	5,2596
200,00	59,541	1137,3	14,072	3,2191	5,2396
225,00	54,034	1268,1	14,688	3,2078	5,2251
250,00	49,463	1398,5	15,238	3,1987	5,2142
275,00	45,607	1528,8	15,735	3,1910	5,2060
300,00	42,310	1658,9	16,188	3,1845	5,1997
325,00	39,458	1788,8	16,604	3,1790	5,1948
350,00	36,966	1918,6	16,988	3,1742	5,1910
375,00	34,770	2048,4	17,346	3,1700	5,1880
400,00	32,820	2178,0	17,681	3,1664	5,1857
425,00	31,077	2307,6	17,996	3,1631	5,1838
450,00	29,509	2437,2	18,292	3,1602	5,1823
475,00	28,091	2566,8	18,572	3,1576	5,1812
500,00	26,804	2696,3	18,838	3,1553	5,1802

Таблица Г.18 — Термодинамические свойства гелия-4 при давлении 40 МПа

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_v, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$
8,0000	262,80	174,78	−1,4914	1,9901	2,3234
9,0000	260,78	177,23	−1,2042	2,1724	2,5591
10,000	258,73	179,90	−0,92256	2,3436	2,7877
25,000	226,77	238,39	2,5230	3,3691	4,6252
50,000	179,43	366,25	6,0379	3,4693	5,3852
75,000	145,85	502,11	8,2407	3,4090	5,4405
100,00	122,65	637,50	9,7990	3,3568	5,3881
125,00	105,86	771,56	10,995	3,3183	5,3381
150,00	93,151	904,50	11,965	3,2894	5,2992
175,00	83,193	1036,6	12,780	3,2671	5,2696
200,00	75,176	1168,0	13,482	3,2495	5,2474
225,00	68,578	1299,0	14,099	3,2353	5,2306
250,00	63,051	1429,6	14,649	3,2236	5,2179
275,00	58,351	1559,9	15,146	3,2138	5,2082
300,00	54,305	1690,0	15,599	3,2055	5,2007
325,00	50,784	1819,9	16,015	3,1984	5,1948
350,00	47,692	1949,8	16,400	3,1922	5,1902
375,00	44,955	2079,5	16,758	3,1868	5,1865
400,00	42,514	2209,1	17,092	3,1821	5,1836
425,00	40,324	2338,6	17,406	3,1779	5,1813
450,00	38,349	2468,2	17,703	3,1741	5,1794
475,00	36,557	2597,6	17,983	3,1708	5,1779
500,00	34,925	2727,1	18,248	3,1677	5,1768

Таблица Г.19 — Термодинамические свойства гелия-4 при давлении 50 МПа

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$	$c_v, \text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$
9,0000	273,89	212,05	−1,4888	2,1099	2,5250
10,000	271,85	214,69	−1,2117	2,2789	2,7380
25,000	242,23	271,85	2,1573	3,3787	4,5118
50,000	198,42	396,95	5,5944	3,5204	5,3044
75,000	165,18	531,76	7,7791	3,4618	5,4277
100,00	141,08	667,13	9,3371	3,4037	5,3943
125,00	123,15	801,38	10,535	3,3593	5,3464
150,00	109,31	934,53	11,506	3,3255	5,3073
175,00	98,303	1066,8	12,322	3,2992	5,2770
200,00	89,324	1198,4	13,025	3,2783	5,2536
225,00	81,860	1329,5	13,643	3,2614	5,2355
250,00	75,554	1460,2	14,194	3,2474	5,2214
275,00	70,154	1590,6	14,691	3,2356	5,2104
300,00	65,477	1720,7	15,144	3,2256	5,2017
325,00	61,385	1850,7	15,560	3,2170	5,1949
350,00	57,774	1980,5	15,945	3,2096	5,1895
375,00	54,565	2110,2	16,303	3,2031	5,1852
400,00	51,693	2239,8	16,637	3,1973	5,1817
425,00	49,107	2369,3	16,951	3,1922	5,1790
450,00	46,767	2498,7	17,247	3,1876	5,1768
475,00	44,639	2628,1	17,527	3,1835	5,1750
500,00	42,696	2757,5	17,792	3,1798	5,1736

Таблица Г.20 — Термодинамические свойства гелия-4 при давлении 60 МПа

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$	$c_v, \text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$
15,000	273,78	266,89	−0,36577	2,6237	3,3142
20,000	264,33	285,74	0,74637	3,0048	3,8782
25,000	254,87	304,59	1,8585	3,3859	4,4422
50,000	213,99	427,65	5,2390	3,5622	5,2309
75,000	181,56	561,30	7,4043	3,5082	5,4068
100,00	157,08	696,52	8,9604	3,4465	5,3979
125,00	138,40	830,94	10,160	3,3973	5,3546
150,00	123,75	964,29	11,132	3,3593	5,3146
175,00	111,95	1096,7	11,949	3,3295	5,2831
200,00	102,22	1228,5	12,653	3,3057	5,2587
225,00	94,067	1359,7	13,271	3,2863	5,2395
250,00	87,123	1490,5	13,823	3,2701	5,2244
275,00	81,138	1620,9	14,320	3,2566	5,2124
300,00	75,925	1751,1	14,773	3,2450	5,2028
325,00	71,343	1881,1	15,189	3,2350	5,1952
350,00	67,282	2010,9	15,574	3,2264	5,1891
375,00	63,659	2140,6	15,932	3,2188	5,1842
400,00	60,406	2270,1	16,266	3,2121	5,1802
425,00	57,468	2399,6	16,580	3,2061	5,1770
450,00	54,802	2529,0	16,876	3,2008	5,1744
475,00	52,372	2658,3	17,156	3,1960	5,1724
500,00	50,147	2787,6	17,421	3,1916	5,1707

Таблица Г.21 — Термодинамические свойства гелия-4 при давлении 70 МПа

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_v, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$
15,000	284,13	298,97	−0,62287	2,6210	3,3494
20,000	274,86	317,80	0,49007	3,0072	3,8761
25,000	265,59	336,62	1,6030	3,3933	4,4028
50,000	227,10	458,20	4,9437	3,5974	5,1683
75,000	195,71	590,70	7,0898	3,5493	5,3801
100,00	171,18	725,63	8,6423	3,4857	5,3973
125,00	152,03	860,16	9,8433	3,4328	5,3621
150,00	136,79	993,71	10,817	3,3912	5,3224
175,00	124,38	1126,3	11,635	3,3582	5,2893
200,00	114,06	1258,2	12,339	3,3317	5,2634
225,00	105,34	1389,5	12,958	3,3100	5,2431
250,00	97,878	1520,4	13,510	3,2919	5,2271
275,00	91,403	1650,9	14,007	3,2767	5,2143
300,00	85,734	1781,1	14,460	3,2637	5,2040
325,00	80,728	1911,1	14,877	3,2524	5,1956
350,00	76,276	2040,9	15,261	3,2426	5,1889
375,00	72,288	2170,6	15,619	3,2340	5,1834
400,00	68,697	2300,1	15,954	3,2264	5,1790
425,00	65,444	2429,5	16,267	3,2196	5,1754
450,00	62,485	2558,9	16,563	3,2136	5,1724
475,00	59,781	2688,2	16,843	3,2081	5,1700
500,00	57,301	2817,4	17,108	3,2032	5,1681

Таблица Г.22 — Термодинамические свойства гелия-4 при давлении 80 МПа

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_v, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$
15,000	293,41	330,07	−0,8703	2,6383	3,4336
20,000	284,17	349,02	0,2536	3,0203	3,9096
25,000	274,93	367,97	1,3775	3,4022	4,3856
50,000	238,37	488,54	4,6915	3,6280	5,1172
75,000	208,10	619,98	6,8200	3,5859	5,3502
100,00	183,75	754,49	8,3676	3,5216	5,3919
125,00	164,34	889,04	9,5687	3,4659	5,3677
150,00	148,67	1022,7	10,544	3,4212	5,3304
175,00	135,79	1155,5	11,363	3,3855	5,2963
200,00	125,00	1287,6	12,068	3,3566	5,2686
225,00	115,82	1419,0	12,687	3,3328	5,2469
250,00	107,92	1550,0	13,239	3,3129	5,2297
275,00	101,03	1680,6	13,737	3,2961	5,2161
300,00	94,971	1810,8	14,190	3,2817	5,2051
325,00	89,600	1940,8	14,607	3,2692	5,1961
350,00	84,804	2070,6	14,991	3,2584	5,1888
375,00	80,495	2200,3	15,349	3,2488	5,1829
400,00	76,603	2329,8	15,684	3,2404	5,1780
425,00	73,069	2459,2	15,997	3,2328	5,1740
450,00	69,845	2588,5	16,293	3,2260	5,1707
475,00	66,894	2717,7	16,572	3,2199	5,1680
500,00	64,180	2846,9	16,837	3,2144	5,1658

Таблица Г.23 — Термодинамические свойства гелия-4 при давлении 90 МПа

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_v, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$
15,000	301,88	360,26	−1,1148	2,6764	3,5674
20,000	292,55	379,48	0,029434	3,0449	3,9764
25,000	283,22	398,70	1,1736	3,4134	4,3854
50,000	248,22	518,63	4,4714	3,6552	5,0771
75,000	219,06	649,11	6,5844	3,6188	5,3196
100,00	195,06	783,13	8,1261	3,5546	5,3821
125,00	175,54	917,62	9,3266	3,4969	5,3704
150,00	159,58	1051,4	10,303	3,4496	5,3374
175,00	146,33	1184,4	11,123	3,4114	5,3035
200,00	135,16	1316,7	11,829	3,3803	5,2746
225,00	125,61	1448,2	12,449	3,3546	5,2513
250,00	117,33	1579,3	13,001	3,3331	5,2328
275,00	110,09	1709,9	13,499	3,3148	5,2181
300,00	103,69	1840,2	13,953	3,2991	5,2063
325,00	98,007	1970,2	14,369	3,2855	5,1967
350,00	92,910	2100,0	14,754	3,2737	5,1889
375,00	88,317	2229,7	15,112	3,2632	5,1824
400,00	84,156	2359,2	15,446	3,2539	5,1771
425,00	80,369	2488,6	15,760	3,2456	5,1728
450,00	76,907	2617,8	16,055	3,2382	5,1692
475,00	73,730	2747,0	16,335	3,2315	5,1662
500,00	70,804	2876,1	16,599	3,2254	5,1637

Таблица Г.24 — Термодинамические свойства гелия-4 при давлении 100 МПа

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$	$c_v, \text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$
15,000	309,68	389,63	−1,3604	2,7360	3,7516
20,000	300,18	409,24	−0,18718	3,0816	4,0753
25,000	290,68	428,85	0,98599	3,4273	4,3990
50,000	256,96	548,44	4,2760	3,6801	5,0469
75,000	228,85	678,12	6,3759	3,6487	5,2901
100,00	205,30	811,59	7,9113	3,5851	5,3690
125,00	185,80	945,93	9,1104	3,5259	5,3700
150,00	169,65	1079,8	10,087	3,4765	5,3429
175,00	156,13	1213,0	10,908	3,4362	5,3105
200,00	144,64	1345,4	11,615	3,4031	5,2809
225,00	134,77	1477,1	12,236	3,3756	5,2563
250,00	126,19	1608,2	12,788	3,3525	5,2364
275,00	118,64	1738,9	13,287	3,3329	5,2205
300,00	111,96	1869,3	13,740	3,3160	5,2078
325,00	105,99	1999,4	14,157	3,3013	5,1975
350,00	100,63	2129,2	14,542	3,2885	5,1891
375,00	95,785	2258,8	14,899	3,2772	5,1822
400,00	91,385	2388,3	15,234	3,2671	5,1765
425,00	87,370	2517,7	15,547	3,2581	5,1717
450,00	83,693	2646,9	15,843	3,2501	5,1678
475,00	80,311	2776,1	16,122	3,2428	5,1646
500,00	77,191	2905,1	16,387	3,2362	5,1619

Приложение Д
(обязательное)

**Алгоритм расчета плотности гелия-4 на линии насыщения
и давления насыщенного пара гелия-4 итерационным методом**

Относительные плотности жидкости и пара ω' и ω'' на линии насыщения определяют решением уравнений (5) по методу Ньютона в следующем итерационном процессе.

Начальное приближение для плотности жидкой фазы ω' при заданной температуре T рассчитывают по формуле

$$\omega' = 1 + \sum_{i=1}^6 n_i (1 - \tau)^{-t_i}. \quad (\text{Д.1})$$

Параметры n_i и t_i в уравнении (Д.1) представлены в таблице А.3.

Начальное приближение для плотности газообразной фазы ω'' при заданной температуре T рассчитывают по формуле

$$\omega'' = \exp \left[\sum_{i=1}^5 n_i (1 - \tau)^{-t_i} \right]. \quad (\text{Д.2})$$

Параметры n_i и t_i в уравнении (Д.2) представлены в таблице А.4.

Начальное приближение для давления на линии насыщения p_s определяют по формуле

$$p_s(\tau) = \exp \left[\tau^{-1} \sum_{i=1}^5 n_i (1 - \tau)^{-t_i} \right]. \quad (\text{Д.3})$$

Коэффициенты n_i , t_i в уравнении (Д.3) приведены в таблице А.5.

Итерационный процесс выполняют по следующему алгоритму:

1) ω' и ω'' на k -м итерационном шаге (начиная с $k = 1$) определяют из выражений

$$\Delta \omega'^{(k)} = \frac{\det [b_{ij}]^{(k-1)}}{\det [a_{ij}]^{(k-1)}}, \quad i, j = 1, 2; \quad (\text{Д.4})$$

$$\Delta \omega''^{(k)} = \frac{\det [c_{ij}]^{(k-1)}}{\det [a_{ij}]^{(k-1)}}, \quad i, j = 1, 2; \quad (\text{Д.5})$$

$$\begin{aligned} \omega'^{(k)} &= \omega'^{(k-1)} + \Delta \omega'^{(k)}; \\ \omega''^{(k)} &= \omega''^{(k-1)} + \Delta \omega''^{(k)}. \end{aligned} \quad (\text{Д.6})$$

Элементы определителей $a_{ij}^{(k-1)}$, $b_{ij}^{(k-1)}$ и $c_{ij}^{(k-1)}$ рассчитывают при плотностях на итерационном шаге $(k-1)$, т. е. при $\omega'^{(k-1)}$ и $\omega''^{(k-1)}$, из нижеследующих выражений:

$$a_{11} = B'; \quad a_{12} = -B''; \quad a_{21} = \frac{B'}{\omega'}; \quad a_{22} = -\frac{B''}{\omega''}; \quad (\text{Д.7})$$

$$b_{11} = -F_1; \quad b_{12} = -B''; \quad b_{21} = -F_2; \quad b_{22} = -\frac{B''}{\omega''}; \quad (\text{Д.8})$$

$$c_{11} = B'; \quad c_{12} = -F_1; \quad c_{21} = \frac{B'}{\omega'}; \quad c_{22} = -F_2. \quad (\text{Д.9})$$

Здесь $B' = 1 + A'_1$; $B'' = 1 + A''_1$ комплексы A_1 рассчитывают по (Б.8); функции F_1, F_2 определяют по (5);
2) Критерий завершения итерационного процесса определяют следующим образом

$$\left| \frac{\Delta \omega'(k)}{\omega'(k)} \right| \leq 10^{-6} \quad \text{и} \quad \left| \frac{\Delta \omega''(k)}{\omega''(k)} \right| \leq 10^{-6}. \quad (\text{Д.10})$$

Если критерий (Д.10) не выполняется, то необходимо продолжить итерационный процесс, начиная с пункта 1), в обратном случае перейти к пункту 3);

3) Вычисляют плотности ρ' и ρ'' , кг/м³, давление насыщенного пара p_s , МПа:

$$\begin{aligned} \rho' &= \omega'(k) \rho_{\text{кр}}; \\ \rho'' &= \omega''(k) \rho_{\text{кр}}; \end{aligned} \quad (\text{Д.11})$$

$$p_s = \frac{\omega''(k) \tau \left(1 + A_0^{(k)} \right)}{z_{\text{ф}}} p_{\text{кр}}. \quad (\text{Д.12})$$

Приложение Е
(обязательное)

**Стандартные справочные данные о плотности, энтальпии, энтропии, изохорной
и изобарной теплоемкостях гелия-4 на линии насыщения**

Т а б л и ц а Е.1 — Термодинамические свойства гелия-4 в газообразном состоянии на линии насыщения

T , К	p_v , МПа	ρ'' , кг/м ³	h'' , кДж/кг	s'' , кДж/(кг · К)	c_v'' , кДж/(кг · К)	c_p'' , кДж/(кг · К)
2,5000	0,010228	2,139	17,143	7,6859	3,1070	5,6356
2,6000	0,012376	2,516	17,508	7,4667	3,1084	5,7089
2,7000	0,014814	2,933	17,858	7,2603	3,1104	5,7904
2,8000	0,017562	3,393	18,191	7,0652	3,1129	5,8808
2,9000	0,020638	3,899	18,508	6,8798	3,1160	5,9812
3,0000	0,024062	4,453	18,806	6,7028	3,1196	6,0927
3,1000	0,027851	5,058	19,087	6,5331	3,1238	6,2167
3,2000	0,032025	5,718	19,347	6,3697	3,1287	6,3548
3,3000	0,036601	6,437	19,588	6,2117	3,1342	6,5091
3,4000	0,041600	7,217	19,807	6,0583	3,1403	6,6822
3,5000	0,047038	8,065	20,003	5,9086	3,1471	6,8771
3,6000	0,052936	8,986	20,175	5,7620	3,1546	7,0978
3,7000	0,059312	9,986	20,321	5,6176	3,1629	7,3495
3,8000	0,066186	11,073	20,439	5,4749	3,1721	7,6387
3,9000	0,073578	12,256	20,527	5,3329	3,1823	7,9743
4,0000	0,081510	13,547	20,581	5,1910	3,1936	8,3682
4,1000	0,090001	14,959	20,599	5,0482	3,2063	8,8368
4,2000	0,099076	16,510	20,576	4,9035	3,2208	9,4036
4,3000	0,10876	18,222	20,506	4,7557	3,2376	10,103
4,4000	0,11908	20,124	20,383	4,6035	3,2574	10,987
4,5000	0,13006	22,255	20,196	4,4449	3,2811	12,138
4,6000	0,14174	24,670	19,932	4,2774	3,3100	13,693
4,7000	0,15414	27,449	19,574	4,0978	3,3458	15,895
4,8000	0,16733	30,712	19,093	3,9009	3,3894	19,219
4,9000	0,18134	34,665	18,444	3,6785	3,4449	24,893
5,0000	0,19624	39,707	17,537	3,4142	3,6196	37,195
5,1000	0,21211	46,850	16,160	3,0686	4,0598	76,045

Таблица Е.2 — Термодинамические свойства гелия-4 в жидком состоянии на линии насыщения

T , К	p_v , МПа	ρ' , кг/м ³	h' , кДж/кг	s' , кДж/(кг · К)	$c_{v'}$, кДж/(кг · К)	$c_{p'}$, кДж/(кг · К)
2,5000	0,010228	144,883	−5,9884	−1,56664	2,1418	2,3342
2,6000	0,012376	144,293	−5,7427	−1,47609	2,0620	2,3253
2,7000	0,014814	143,622	−5,494	−1,38864	2,0241	2,3604
2,8000	0,017562	142,880	−5,2388	−1,30279	2,0126	2,4244
2,9000	0,020638	142,071	−4,9745	−1,21764	2,0178	2,5084
3,0000	0,024062	141,200	−4,6995	−1,13260	2,0336	2,6077
3,1000	0,027851	140,267	−4,4123	−1,04728	2,0562	2,7195
3,2000	0,032025	139,273	−4,1119	−0,96140	2,0829	2,8426
3,3000	0,036601	138,215	−3,7973	−0,87474	2,1121	2,9769
3,4000	0,041600	137,093	−3,4674	−0,78710	2,1428	3,1231
3,5000	0,047038	135,903	−3,1212	−0,69831	2,1744	3,2825
3,6000	0,052936	134,640	−2,7576	−0,60818	2,2063	3,4572
3,7000	0,059312	133,300	−2,3754	−0,51651	2,2384	3,6501
3,8000	0,066186	131,875	−1,9731	−0,42307	2,2707	3,8649
3,9000	0,073578	130,358	−1,5491	−0,32758	2,3032	4,1069
4,0000	0,081510	128,738	−1,1013	−0,22973	2,3360	4,3829
4,1000	0,090001	127,003	−0,6275	−0,12912	2,3694	4,7026
4,2000	0,099076	125,135	−0,1245	−0,02527	2,4038	5,0796
4,3000	0,10876	123,114	0,4113	0,082443	2,4397	5,5336
4,4000	0,11908	120,912	0,9848	0,19481	2,4779	6,0947
4,5000	0,13006	118,492	1,6021	0,31293	2,5196	6,8108
4,6000	0,14174	115,800	2,2722	0,43827	2,5667	7,7629
4,7000	0,15414	112,760	3,0074	0,57302	2,6218	9,1000
4,8000	0,16733	109,255	3,8270	0,72053	2,6893	11,128
4,9000	0,18134	105,083	4,7632	0,88658	2,7773	14,605
5,0000	0,19624	99,841	5,8798	1,08274	2,9284	21,969
5,1000	0,21211	92,497	7,3470	1,34049	3,2683	46,845

Библиография

- [1] Leachman J. W. et al. Thermodynamic properties of cryogenic fluids. — Cham: Springer International Publishing, 2017

Ключевые слова: Государственная система обеспечения единства измерений, стандартные справочные данные, жидкий и газообразный гелий-4, плотность, энтальпия, энтропия, изохорная теплоемкость, изобарная теплоемкость

Редактор *Н.А. Аргунова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *И.А. Королева*
Компьютерная верстка *И.Ю. Литовкиной*

Сдано в набор 15.02.2024. Подписано в печать 11.03.2024. Формат 60×84%. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 4,65. Уч-изд. л. 3,72.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «Институт стандартизации»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
www.gostinfo.ru info@gostinfo.ru