ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 56851— 2016

ГАЗ ПРИРОДНЫЙ СЖИЖЕННЫЙ

Метод расчета термодинамических свойств

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2016

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Обществом с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий — Газпром ВНИИГАЗ»

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 52 «Природный и сжиженные газы»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 января 2016 г. № 7-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в ГОСТ Р 1.0—2012 (раздел 8). 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, 2016

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 Термины, определения и обозначения 2
4 Метод расчета термодинамических свойств сжиженного природного газа 3
4.1 Метод расчета плотности и коэффициента сжимаемости 3
4.2 Метод расчета показателя адиабаты и скорости звука 5
5 Алгоритм расчета термодинамических свойств сжиженного природного газа 6
5.1 Исходные данные 6
5.2 Алгоритм расчета 7
6 Диапазоны применимости метода расчета термодинамических свойств сжиженного природного газа и его погрешности 8
Приложение А (обязательное) Характеристические параметры компонентов сжиженного природного газа, коэффициенты и параметры метода расчета термодинамических свойств сжиженного природного газа 12
Приложение Б (справочное) Примеры расчета термодинамических свойств сжиженного природного газа 15
Приложение В (справочное) Соотношения между приведенными, абсолютными и относительными погрешностями измерений 17
Библиография 18

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГАЗ ПРИРОДНЫЙ СЖИЖЕННЫЙ

Метод расчета термодинамических свойств

Liquefied natural gas. Method for calculation of thermodynamic properties

Дата введения — 2017—01—01

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт устанавливает метод расчета термодинамических свойств (плотность, коэффициент сжимаемости, показатель адиабаты, скорость распространения звука) сжиженного природного газа по измеренным значениям давления, температуры и молярных долей компонентов.

1.2 Настоящий стандарт применяют для расчета термодинамических свойств сжиженного природного газа при давлениях до 5 МПа включительно и температурах от 100 до 140 К.

1.3 Метод и алгоритм расчета термодинамических свойств, приведенные в настоящем стандарте, могут быть использованы при разработке программного обеспечения вычислителей расхода сжиженного природного газа.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 8.417 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин

ГОСТ 31371.1 Газ природный. Определение состава методом газовой хроматографии с оценкой неопределенности. Часть 1. Руководство по проведению анализа

ГОСТ 31371.2 Газ природный. Определение состава методом газовой хроматографии с оценкой неопределенности. Часть 2. Характеристики измерительной системы и статистические оценки данных

ГОСТ 31371.3 Газ природный. Определение состава методом газовой хроматографии с оценкой неопределенности. Часть 3. Определение водорода, гелия, кислорода, азота, диоксида углерода и углеводородов до C_8 с использованием двух насадочных колонок

ГОСТ 31371.4 Газ природный. Определение состава методом газовой хроматографии с оценкой неопределенности. Часть 4. Определение азота, диоксида углерода и углеводородов C_1—C_5 и C_{6+} в лаборатории и с помощью встроенной измерительной системы с использованием двух колонок

ГОСТ 31371.5 Газ природный. Определение состава методом газовой хроматографии с оценкой неопределенности. Часть 5. Определение азота, диоксида углерода и углеводородов C_1—C_5 и C_{6+} в лаборатории и при непрерывном контроле с использованием трех колонок

ГОСТ 31371.6 Газ природный. Определение состава методом газовой хроматографии с оценкой неопределенности. Часть 6. Определение водорода, гелия, кислорода, азота, диоксида углерода и углеводородов C_1—C_8 с использованием трех капиллярных колонок

ГОСТ 31371.7 Газ природный. Определение состава методом газовой хроматографии с оценкой неопределенности. Часть 7. Методика выполнения измерений молярной доли компонентов

ГОСТ Р 53521—2009 Переработка природного газа. Термины и определения

ГОСТ Р 55892—2013 Объекты малотоннажного производства и потребления сжиженного природного газа. Общие технические требования

Издание официальное

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 Термины, определения и обозначения

3.1 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ Р 53521 и ГОСТ Р 55892, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1 **идеально-газовое состояние:** Условное состояние газа или смеси газов, которое характеризуется отсутствием взаимодействия молекул газа, а сами молекулы не имеют собственного объема.

3.1.2

сжиженный природный газ; СПГ: Природный газ, сжиженный после переработки с целью хранения или транспортирования.

[ГОСТ Р 53521—2009, статья 5]

3.1.3

регазификация (сжиженного природного газа): Перевод сжиженного природного газа в газообразное состояние путем его нагревания и испарения.

[ГОСТ Р 55892—2013, пункт 3.26]

3.1.4 **показатель адиабаты:** Термодинамическое свойство СПГ, характеризующее процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой.

3.1.5 **скорость распространения звука** (скорость звука): Термодинамическое свойство СПГ, характеризующее скорость распространения упругих волн в СПГ.

3.2 Обозначения

Основные условные обозначения физических величин, принятые в стандарте, приведены в таблице 1. Обозначения единиц величин приведены в соответствии с требованиями ГОСТ 8.417.

Таблица 1 — Обозначения физических величин

Условные обозначения	Наименование величины	Обозначение единицы величины
R	Универсальная газовая постоянная, R = 8,314472 [1]	кДж/(кмоль·К)
T	Термодинамическая температура	К
p	Абсолютное давление	МПа
u	Скорость звука	м/с
x	Молярная доля компонента СПГ	1
z	Коэффициент сжимаемости, $z = 10^3 p/(R\tilde{\rho}T)$	1
k	Показатель адиабаты	1
ρ	Плотность	кг/м^3
$\tilde{\rho}$	Молярная плотность	кмоль/м^3
δ	Относительная погрешность (далее – погрешность)	%

В стандарте также используются следующие символы и нижние индексы для обозначения:

{ } — множества, например молярных долей компонентов СПГ $\{x_i\}$, молярные массы компонентов СПГ $\{M_i\}$ и т.п.;

i, j — физических величин для i, j-го компонента СПГ;

кр — физической величины в критической точке.

4 Метод расчета термодинамических свойств сжиженного природного газа

Метод расчета термодинамических свойств СПГ основан на применении расширенного принципа соответственных состояний к уравнению состояния метана [2] как основного компонента СПГ. Методология применения этого принципа кратко приведена в А.1—А.4 (приложение А).

Примечание — Для расчета плотности СПГ при температуре не более 115 К и абсолютном давлении до 0,15 МПа включительно, кроме приведенного в настоящем разделе метода расчета термодинамических свойств, допускается применять модифицированный метод Клозека-Маккинли [3].

4.1 Метод расчета плотности и коэффициента сжимаемости

4.1.1 Плотность СПГ рассчитывают по формуле

$$\rho = M\tilde{\rho}_{пк}\omega, \quad (1)$$

где M — молярная масса СПГ, кг/кмоль;

$\tilde{\rho}_{пк}$ — псевдокритическая молярная плотность СПГ (см. формулу (9));

ω — приведенная плотность.

Молярную массу СПГ рассчитывают по формуле

$$M = \sum_{i=1}^{N} x_i M_i , \quad (2)$$

где M_i — молярная масса i-го компонента СПГ, значения которой для каждого компонента приведены в таблицах А.1 и А.6 (приложение А);

N — число компонентов СПГ.

4.1.2 Приведенную плотность ω при измеренных (заданных) значениях давления, температуры и молярных долей компонентов СПГ определяют из решения следующего уравнения

$$\pi = \omega\tau(1 + A_0)/z_{пк}, \quad (3)$$

где π — приведенное давление;

τ — приведенная температура;

A_0 — безразмерный комплекс (см. 4.1.2.2);

$z_{пк}$ — псевдокритический коэффициент сжимаемости.

4.1.2.1 Приведенные значения давления π, плотности ω и температуры τ, а также псевдокритический коэффициент сжимаемости $z_{пк}$ рассчитывают по формулам:

$$\pi = p/p_{пк}, \quad (4)$$

$$\omega = \tilde{\rho}/\tilde{\rho}_{пк}, \quad (5)$$

$$\tau = T/T_{пк}, \quad (6)$$

$$z_{пк} = 0{,}291 - 0{,}08\Omega, \quad (7)$$

где $p_{пк}$ — псевдокритическое давление СПГ;

$\tilde{\rho}_{пк}$ — псевдокритическая молярная плотность СПГ;

$T_{пк}$ — псевдокритическая температура СПГ;

Ω — ацентрический фактор Питцера СПГ.

Величины псевдокритических значений давления, молярной плотности и температуры СПГ, а также значение ацентрического фактора Питцера СПГ вычисляют по формулам:

$$p_{пк} = 10^{-3}R\tilde{\rho}_{пк}T_{пк}z_{пк}, \quad (8)$$

$$\tilde{\rho}_{пк} = \frac{8}{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} x_i x_j \alpha_{ij}\left[\left(M_i\rho_{кр_i}^{-1}\right)^{1/3} + \left(M_j\rho_{кр_j}^{-1}\right)^{1/3}\right]^3}, \quad (9)$$

$$T_{пк} = 0{,}125\tilde{\rho}_{пк}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} x_i x_j \alpha_{ij}\left[\left(M_i\rho_{кр_i}^{-1}\right)^{1/3}+\left(M_j\rho_{кр_j}^{-1}\right)^{1/3}\right]^3 \beta_{ij}\left(T_{кр_i}\,T_{кр_j}\right)^{0,5}, \quad (10)$$

$$\Omega = \sum_{i=1}^{N} x_i\Omega_i\,, \quad (11)$$

где $\{M_i\}$ и $\{M_j\}$ — молярная масса компонентов СПГ;

$\{\rho_{кр i}\}$ и $\{\rho_{кр j}\}$ — критическая плотность компонентов СПГ;

$\{T_{кр i}\}$ и $\{T_{кр j}\}$ — критическая температура компонентов СПГ;

$\{\Omega_i\}$ — фактор Питцера компонентов СПГ;

$\{\alpha_{ij}\}$ и $\{\beta_{ij}\}$ — параметры бинарного взаимодействия;

N — число компонентов СПГ.

Значения молярной массы, критических значений плотности и температуры компонентов СПГ, а также значения фактора Питцера компонентов СПГ приведены в таблице А.1 (приложение А), а значения параметров бинарного взаимодействия — в таблице А.2 (приложение А).

4.1.2.2 Безразмерный комплекс A_0 рассчитывают по формуле

$$A_0 = \sum_{n=1}^{40} b_n\varphi_n X_n\,, \quad (12)$$

где $\{b_n\}$ — коэффициенты, значения которых приведены в таблице А.3 (приложение А);

$\{\varphi_n\}$, $\{X_n\}$ — функции приведенных значений плотности ω и температуры τ.

Функции приведенных значений плотности и температуры $\{\varphi_n\}$ и $\{X_n\}$ рассчитывают по формулам

$$\varphi_n = \begin{cases} \left(\psi_1\omega^{\psi_2}\tau^{\psi_3}\right)^{r_n}\left(\psi_4\omega^{\psi_5}\tau^{\psi_6}\right)^{-t_n}\exp\left[g_n\left(\psi_1\omega^{\psi_2}\tau^{\psi_3}\right)^{l_n}\right], & n \le 36 \\ \left(\psi_1\omega^{\psi_2}\tau^{\psi_3}\right)^{r_n}\left(\psi_4\omega^{\psi_5}\tau^{\psi_6}\right)^{-t_n}\exp\left\{\begin{array}{l}\alpha_n\left(\psi_1\omega^{\psi_2}\tau^{\psi_3}-\varepsilon_n\right)^2+ \\ +\beta_n\left[\left(\psi_4\omega^{\psi_5}\tau^{\psi_6}\right)^{-1}-\gamma_n\right]^2\end{array}\right\}, & n \ge 37, \end{cases} \quad (13)$$

$$X_n = \begin{cases} \psi_2 r_n - \psi_5 t_n + g_n\psi_1^{l_n}\psi_2 l_n\omega^{\psi_2 l_n}\tau^{\psi_3 l_n}, & n \le 36 \\ 2\left\{\begin{array}{l}\alpha_n\psi_2\left(\psi_1\omega^{\psi_2}\tau^{\psi_3}-1\right)\psi_1\omega^{\psi_2}\tau^{\psi_3}- \\ -\beta_n\psi_5\left[\left(\psi_4\omega^{\psi_5}\tau^{\psi_6}\right)^{-1}-\gamma_n\right]\left(\psi_4\omega^{\psi_5}\tau^{\psi_6}\right)^{-1}\end{array}\right\}+\psi_2 r_n-\psi_5 t_n, & n \ge 37, \end{cases} \quad (14)$$

где $\{g_n\}$, $\{\alpha_n\}$, $\{\beta_n\}$, $\{\varepsilon_n\}$, $\{\gamma_n\}$, $\{r_n\}$, $\{t_n\}$, $\{l_n\}$ — коэффициенты и показатели степеней, значения которых приведены в таблице А.3 (приложение А);

ψ_1, ψ_2, ...,ψ_6 — параметры, которые рассчитывают по формуле

$$\psi_i = \delta_i + \sum_{j=1}^{N} x_j a_{ji},\ i = 1,\ 2,\ ...,\ 6, \quad (15)$$

где $\{\delta_i\}$, $\{a_{ji}\}$ — коэффициенты, значения которых приведены в таблице А.4 (приложение А);

N — число компонентов СПГ.

4.1.3 Решение уравнения (3) осуществляют эффективными численными методами, используя заданные значения температуры, давления и молярных долей $\{x_i\}$ СПГ (см. 5.2.4).

4.1.4 Коэффициент сжимаемости СПГ рассчитывают по формуле

$$z = 1 + A_0, \tag{16}$$

где A_0 — безразмерный комплекс (см. 4.1.2.2).

Примечание — Безразмерный комплекс A_0 в формуле (16) рассчитывают при заданных значениях (T, $\{x_i\}$) и найденном в результате решения уравнения (3) значении приведенной плотности (ω).

4.2 Метод расчета показателя адиабаты и скорости звука

4.2.1 Показатель адиабаты и скорость звука рассчитывают по формулам

$$k = \frac{1 + A_1 + (1 + A_2)^2 / (c_{p0r} - 1 + A_3)}{z}, \tag{17}$$

$$u = \left\{10^3 \frac{RT}{M}\left[1 + A_1 + (1 + A_2)^2 / (c_{p0r} - 1 + A_3)\right]\right\}^{0,5}, \tag{18}$$

где A_1, A_2 и A_3 — безразмерные комплексы (см. 4.2.2);

M — молярная масса СПГ, кг/кмоль (см. 4.1.1);

c_{p0r} — безразмерная изобарная теплоемкость СПГ в идеально-газовом состоянии (см. 4.2.3).

4.2.2 Безразмерные комплексы A_1, A_2 и A_3 рассчитывают по формулам:

$$A_1 = \sum_{n=1}^{40} b_n \varphi_n \left[X_n (X_n + 1) + X_{\omega n}\right], \tag{19}$$

$$A_2 = \sum_{n=1}^{40} b_n \varphi_n \left[X_n (Y_n + 1) + X_{\tau n}\right], \tag{20}$$

$$A_3 = -\sum_{n=1}^{40} b_n \varphi_n \left[Y_n (Y_n + 1) + Y_{\tau n}\right]. \tag{21}$$

Коэффициенты $\{b_n\}$, функции $\{\varphi_n\}$ и $\{X_n\}$, входящие в формулы (19) — (21), те же самые, которые входят в формулы расчета безразмерного комплекса A_0 (см. 4.1.2.2). Остальные функции ($\{X_{\omega n}\}$, $\{X_{\tau n}\}$, $\{Y_n\}$, $\{Y_{\tau n}\}$) от приведенных значений плотности (ω) и температуры (τ) вычисляют по формулам:

$$X_{\omega n} = \begin{cases} g_n \psi_1^{I_n} (\psi_2 I_n)^2 \omega^{\psi_2 I_n} \tau^{\psi_3 I_n}, & n \le 36 \\ 2\left\{\begin{array}{l} \alpha_n \psi_2^2 \left(2\psi_1 \omega^{\psi_2} \tau^{\psi_3} - 1\right) \psi_1 \omega^{\psi_2} \tau^{\psi_3} + \\ +\beta_n \psi_5^2 \left[2\left(\psi_4 \omega^{\psi_5} \tau^{\psi_6}\right)^{-1} - \gamma_n\right] \left(\psi_4 \omega^{\psi_5} \tau^{\psi_6}\right)^{-1} \end{array}\right\}, & n \ge 37, \end{cases} \tag{22}$$

$$X_{\tau n} = \begin{cases} g_n \psi_1^{I_n} \psi_2 \psi_3 I_n^2 \omega^{\psi_2 I_n} \tau^{\psi_3 I_n}, & n \le 36 \\ 2\left\{\begin{array}{l} \alpha_n \psi_2 \psi_3 \left(2\psi_1 \omega^{\psi_2} \tau^{\psi_3} - 1\right) \psi_1 \omega^{\psi_2} \tau^{\psi_3} + \\ +\beta_n \psi_5 \psi_6 \left[2\left(\psi_4 \omega^{\psi_5} \tau^{\psi_6}\right)^{-1} - \gamma_n\right] \left(\psi_4 \omega^{\psi_5} \tau^{\psi_6}\right)^{-1} \end{array}\right\}, & n \ge 37, \end{cases} \tag{23}$$

$$Y_n = \begin{cases} \psi_3 r_n - \psi_6 t_n + g_n \psi_1^{l_n} \psi_3 l_n \omega^{\psi_2 l_n} \tau^{\psi_3 l_n}, \ n \le 36 \\ 2\left\{ \begin{array}{l} \alpha_n \psi_3 \left(\psi_1 \omega^{\psi_2} \tau^{\psi_3} - 1\right) \psi_1 \omega^{\psi_2} \tau^{\psi_3} - \\ -\beta_n \psi_6 \left[\left(\psi_4 \omega^{\psi_5} \tau^{\psi_6}\right)^{-1} - \gamma_n\right] \left(\psi_4 \omega^{\psi_5} \tau^{\psi_6}\right)^{-1} \end{array} \right\} + \psi_3 r_n - \psi_6 t_n, \ n \ge 37, \end{cases} \quad (24)$$

$$Y_{\tau n} = \begin{cases} g_n \psi_1^{l_n} \left(\psi_3 l_n\right)^2 \omega^{\psi_2 l_n} \tau^{\psi_3 l_n}, \ n \le 36 \\ 2\left\{ \begin{array}{l} \alpha_n \psi_3^2 \left(2\psi_1 \omega^{\psi_2} \tau^{\psi_3} - 1\right) \psi_1 \omega^{\psi_2} \tau^{\psi_3} + \\ +\beta_n \psi_6^2 \left[2\left(\psi_4 \omega^{\psi_5} \tau^{\psi_6}\right)^{-1} - \gamma_n\right] \left(\psi_4 \omega^{\psi_5} \tau^{\psi_6}\right)^{-1} \end{array} \right\}, \ n \ge 37, \end{cases} \quad (25)$$

Коэффициенты и показатели степеней ($\{g_n\}$, $\{\alpha_n\}$, $\{\beta_n\}$, $\{\varepsilon_n\}$, $\{\gamma_n\}$, $\{r_n\}$, $\{t_n\}$, $\{l_n\}$), а также параметры (ψ_1, ψ_2, ..., ψ_6), входящие в формулы (22) – (25), те же самые, которые входят в формулы расчета безразмерного комплекса A_0 (см. 4.1.2.2).

Безразмерную изобарную теплоемкость СПГ в идеально-газовом состоянии c_{p0r} рассчитывают по формуле

$$c_{p0r} = \sum_{i=1}^{N} x_i c_{p0ri}, \quad (26)$$

где $\{c_{p0ri}\}$ — безразмерные изобарные теплоемкости компонентов СПГ в идеально-газовом состоянии;

N – число компонентов СПГ.

Безразмерные изобарные теплоемкости компонентов СПГ $\{c_{p0ri}\}$ рассчитывают по формуле

$$c_{p0ri} = \sum_{n=0}^{4} b_{ni} \left(\frac{T}{T_{кpi}}\right)^n, \quad (27)$$

где $\{b_{ni}\}$ — коэффициенты уравнения для i-го компонента СПГ;

$T_{кpi}$ — критическая температура для i-го компонента СПГ, которая приведена в таблице А.1 (приложение А).

Коэффициенты $\{b_{ni}\}$ формулы (27) приведены в таблице А.5 (приложение А).

5 Алгоритм расчета термодинамических свойств сжиженного природного газа

5.1 Исходные данные

5.1.1 Исходными данными для расчета термодинамических свойств СПГ являются:

- молярные доли компонентов СПГ $\{x_i\}$;
- абсолютное давление СПГ;
- температура СПГ.

5.1.2 Молярные доли компонентов СПГ (после регазификации) определяют хроматографическим анализом по ГОСТ 31371.1 – ГОСТ 31371.7. Измерения молярных долей компонентов могут выполняться как потоковыми, так и лабораторными хроматографами.

Примечание — При расчете термодинамических свойств определенные хроматографическим анализом значения молярных долей компонентов СПГ используют в долях единицы.

5.1.3 Избыточное давление СПГ измеряют с применением соответствующих средств измерений. Для расчета абсолютного давления применяют следующую формулу

$$p = p_{изб} + p_{атм}, \quad (28)$$

где $p_{изб}$ – избыточное давление СПГ;

$p_{атм}$ – атмосферное давление.

5.1.4 Температуру СПГ измеряют с применением соответствующих средств измерений, как правило, в градусах Цельсия. Для перевода измеренной температуры t, °С, в температуру T, K, применяют следующую формулу

$$T = t + 273{,}15. \quad (29)$$

5.2 Алгоритм расчета

5.2.1 Рассчитывают псевдокритические параметры ($z_{пк}$, $p_{пк}$, $\tilde{\rho}_{пк}$, $T_{пк}$) и ацентрический фактор Питцера СПГ (Ω) по формулам (7) — (11).

5.2.2 Рассчитывают параметры $\psi_1, \psi_2, \ldots, \psi_6$ по формуле (15) и молярную массу СПГ по формуле (2).

5.2.3 Рассчитывают функции приведенных значений плотности и температуры $\{\varphi_n\}$, $\{X_n\}$ по формулам (13) и (14), а $\{X_{\omega n}\}$, $\{X_{\tau n}\}$, $\{Y_n\}$, $\{Y_{\tau n}\}$ — по формулам (22)—(25).

5.2.4 Расчет приведенной плотности (ω) осуществляется в результате решения уравнения (3). Значение начального приближения приведенной плотности ($\omega^{(0)}$) равно 3.

Окончательное значение приведенной плотности (ω) определяется по методу Ньютона в следующем итерационном процессе:

а) приведенную плотность ($\omega^{(k)}$) на k-м итерационном шаге определяют из выражений:

$$\Delta\omega^{(k)} = \left[\pi z_{пк} / \tau - \left(1 + A_0^{(k-1)}\right)\omega^{(k-1)}\right] \Big/ \left(1 + A_1^{(k-1)}\right),$$
$$\omega^{(k)} = \omega^{(k-1)} + \Delta\omega^{(k)}, \quad (30)$$

где безразмерные комплексы $A_0^{(k-1)}$ и $A_1^{(k-1)}$ рассчитывают по формулам (12) и (19) при плотности на итерационном шаге (k – 1), т. е. при $\omega^{(k-1)}$;

б) условие завершения итерационного процесса

$$\left|\Delta\omega^{(k)} / \omega^{(k)}\right| < 10^{-6}. \quad (31)$$

Если условие (31) не выполняется, то продолжают итерационный процесс, возвращаясь к перечислению а) итерационного процесса. Если условие (31) выполняется, то уравнение (3) считается решенным. После этого рассчитывают плотность по формуле (1) и коэффициент сжимаемости (z) по формуле (16) при $\omega = \omega^{(k)}$, т.е. при найденном решении уравнения (3).

Расчет показателя адиабаты и скорости звука выполняют по формулам (17) и (18) при заданных (τ) и ($\{x_i\}$) и найденном значении $\omega = \omega^{(k)}$.

Блок-схема и примеры расчета термодинамических свойств СПГ по представленному в стандарте методу приведены, соответственно, на рисунке 1 и в приложении Б.

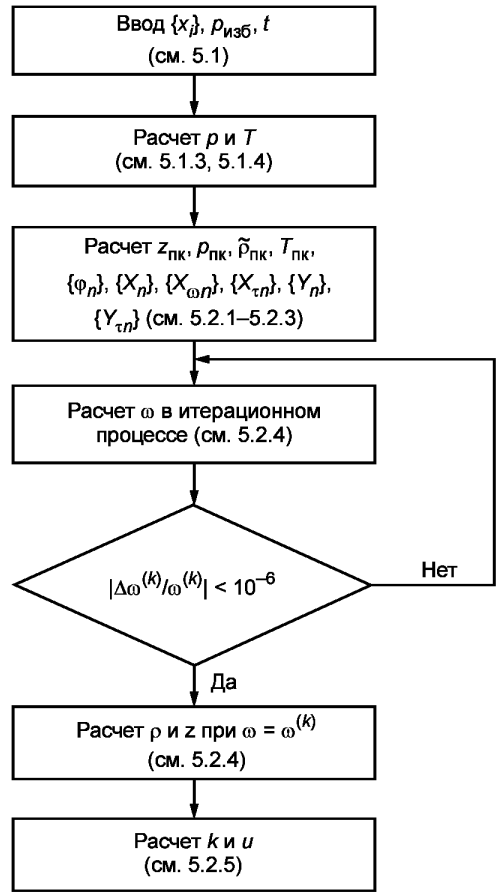

Рисунок 1 – Блок-схема расчета термодинамических свойств СПГ

6 Диапазоны применимости метода расчета термодинамических свойств сжиженного природного газа и его погрешности

6.1 Метод, приведенный в настоящем стандарте, предназначен для расчета термодинамических свойств СПГ в следующих диапазонах параметров:

- по температуре — от 100 до 140 К включительно;
- по давлению — от 0,1 до 5,0 МПа включительно.

При этом молярные доли компонентов СПГ не должны выходить за диапазоны, которые приведены в таблице 2.

Т а б л и ц а 2 — Компоненты СПГ и диапазоны молярных долей компонентов

Компонент	Диапазоны молярных долей
Метан	$0,89 \le x_{CH_4} < 1,0$
Этан	$x_{C_2H_6} \le 0,07$
Пропан	$x_{C_3H_8} \le 0,02$
Бутаны в сумме	$x_{C_4H_{10}} \le 0,009$
Пентаны + высшие	$x_{C_5H_{12}+высш} \le 0,0035$

Окончание таблицы 2

Компонент	Диапазоны молярных долей
Азот + кислород	$x_{N_2+O_2} \le 0{,}05$
Диоксид углерода	$x_{CO_2} \le 0{,}0003$
Примечания 1 Молярные доли остальных компонентов не превышают суммарно 0,001. 2 Для исключения возникновения дополнительной погрешности расчета термодинамических свойств необходимо молярную массу смеси рассчитывать по формуле (2) с учетом всех компонентов, молярная доля которых не равна нулю (молярные массы кислорода, *н*-гексана, *н*-гептана и *н*-октана приведены в таблице А.6 приложения А).	

6.2 Погрешности метода расчета термодинамических свойств СПГ с диапазонами молярных долей компонентов, которые представлены в таблице 2, и во всем диапазоне температур и давлений, приведенных в 6.1, с доверительной вероятностью 95 % не превышают:

- для плотности $\delta_{\rho\,м}$ — ≤ 0,3 %;
- для коэффициента сжимаемости $\delta_{z\,м}$ — ≤ 0,3 %;
- для скорости звука $\delta_{u\,м}$ — ≤ 2,1 %;
- для показателя адиабаты $\delta_{k\,м}$ — ≤ 4,5 %.

Приведенные значения погрешностей расчета термодинамических свойств получены в результате сравнения рассчитанных по представленному в стандарте методу значений плотности и скорости звука с данными по плотности и скорости звука для ряда смесей типа СПГ, рассчитанными по уравнению состояния GERG-2008 [4] в диапазоне температур от 100 до 140 К при давлениях до 5 МПа (включая кривую кипения).

6.3 Погрешность расчета плотности (δ_ρ), коэффициента сжимаемости (δ_z), скорости звука (δ_u) и показателя адиабаты (δ_k) с учетом погрешности измерения давления, температуры и молярных долей компонентов СПГ (исходных данных для расчета) вычисляют по следующим формулам:

$$\delta_\rho = \left(\delta_{\rho м}^2 + \delta_{\rho д}^2\right)^{0,5}, \tag{32}$$

$$\delta_z = \left(\delta_{z м}^2 + \delta_{z д}^2\right)^{0,5}, \tag{33}$$

$$\delta_u = \left(\delta_{u м}^2 + \delta_{u д}^2\right)^{0,5}, \tag{34}$$

$$\delta_k = \left(\delta_{k м}^2 + \delta_{k д}^2\right)^{0,5}, \tag{35}$$

где $\delta_{\rho\,м}$, $\delta_{z\,м}$, $\delta_{u\,м}$ и $\delta_{k\,м}$ — погрешности метода расчета плотности, коэффициента сжимаемости, скорости звука и показателя адиабаты соответственно, значения которых приведены в 6.2;

$\delta_{\rho\,д}$, $\delta_{z\,д}$, $\delta_{u\,д}$ и $\delta_{k\,д}$ — погрешности расчета плотности, коэффициента сжимаемости, скорости звука и показателя адиабаты соответственно, которые появляются дополнительно в связи с погрешностью измерения давления, температуры и молярных долей компонентов СПГ.

Погрешности $\delta_{\rho\,д}$, $\delta_{z\,д}$, $\delta_{u\,д}$ и $\delta_{k\,д}$ вычисляют по следующим формулам:

$$\delta_{\rho д} = \frac{100}{\rho}\left[\sum_{k=1}^{N+2}\left(\rho_{q_k+} - \rho_{q_k-}\right)^2\right]^{0,5}, \tag{36}$$

$$\delta_{z д} = \frac{100}{z}\left[\sum_{k=1}^{N+2}\left(z_{q_k+} - z_{q_k-}\right)^2\right]^{0,5}, \tag{37}$$

$$\delta_{u\,д} = \frac{100}{u}\left[\sum_{k=1}^{N+2}\left(u_{q_k+} - u_{q_k-}\right)^2\right]^{0,5}, \quad (38)$$

$$\delta_{k\,д} = \frac{100}{k}\left[\sum_{k=1}^{N+2}\left(k_{q_k+} - k_{q_k-}\right)^2\right]^{0,5}, \quad (39)$$

где N — число компонентов СПГ;

q_k — условное обозначение k-го параметра применяемых для расчета исходных данных, т.е. измеренные значения давления, температуры и молярных долей компонентов СПГ;

ρ, z, u и k — соответственно, плотность, коэффициент сжимаемости, скорость звука и показатель адиабаты, значения которых рассчитывают при измеренных значениях давления, температуры и молярных долей компонентов СПГ;

ρ_{q_k+}, z_{q_k+}, u_{q_k+}, k_{q_k+} — соответственно, плотность, коэффициент сжимаемости, скорость звука и показатель адиабаты, алгоритм расчета которых приведен в 6.4;

ρ_{q_k-}, z_{q_k-}, u_{q_k-}, k_{q_k-} — соответственно, плотность, коэффициент сжимаемости, скорость звука и показатель адиабаты, алгоритм расчета которых приведен в 6.4.

6.4 Для упрощения алгоритм расчета значений коэффициента сжимаемости (z_{q_k+} и z_{q_k-}) приведен для бинарной смеси с измеренными молярными долями ($x_{1и}$ и $x_{2и}$), а также при измеренных значениях давления ($p_и$) и температуры ($T_и$). Расчет аналогичных значений плотности (ρ_{q_k+} и ρ_{q_k-}), скорости звука (u_{q_k+} и u_{q_k-}) и показателя адиабаты (k_{q_k+} и k_{q_k-}) осуществляют так же, как и для коэффициента сжимаемости z_{q_k+} и z_{q_k-}.

В случае бинарной смеси формула (37) приобретает следующий вид:

$$\delta_{z\,д} = \frac{100}{z}\left[\sum_{k=1}^{4}\left(z_{q_k+} - z_{q_k-}\right)^2\right]^{0,5}, \quad (40)$$

где z — коэффициент сжимаемости, значение которого рассчитано при измеренных значениях $p_и$, $T_и$, $x_{1и}$ и $x_{2и}$;

z_{q_k+} — коэффициент сжимаемости, значения которого рассчитывают:

- для k = 1 при $p_{и+}$, $T_и$, $x_{1и}$ и $x_{2и}$;
- для k = 2 при $p_и$, $T_{и+}$, $x_{1и}$ и $x_{2и}$;
- для k = 3 при $p_и$, $T_и$, $x_{1и+}$ и $x_{2и}$;
- для k = 4 при $p_и$, $T_и$, $x_{1и}$ и $x_{2и+}$;

z_{q_k-} — коэффициент сжимаемости, значения которого рассчитывают:

- для k = 1 при $p_{и-}$, $T_и$, $x_{1и}$ и $x_{2и}$;
- для k = 2 при $p_и$, $T_{и-}$, $x_{1и}$ и $x_{2и}$;
- для k = 3 при $p_и$, $T_и$, $x_{1и-}$ и $x_{2и}$;
- для k = 4 при $p_и$, $T_и$, $x_{1и}$ и $x_{2и-}$.

При этом значения давления, температуры и молярных долей компонентов с нижними индексами, включающими плюс и минус, рассчитывают по формулам:

$$p_{и+} = p_и(1 + 0{,}005\delta_p), \quad (41)$$

$$p_{и-} = p_и(1 - 0{,}005\delta p), \quad (42)$$

$$T_{и+} = T_и(1 + 005\delta_T), \quad (43)$$

$$T_{и-} = T_и(1 - 0{,}005\delta_T), \quad (44)$$

$$x_{1и+} = x_{1и}(1 + 0{,}005\delta_{x1}), \quad (45)$$

$$x_{1и-} = x_{1и}(1 - 0{,}005\delta_{x1}), \quad (46)$$

$$x_{2и+} = x_{2и}(1 + 0{,}005\delta_{x2}), \quad (47)$$

$$x_{2и-} = x_{2и}(1 - 0{,}005\delta_{x2}), \quad (48)$$

где δ_p, δ_T, δ_{x1} и δ_{x2}, — соответственно, погрешности измерения $p_и$, $T_и$, $x_{1и}$ и $x_{2и}$, численные значения которых определяют в соответствии с применяемыми методиками или средствами их измерений.

Соотношения между приведенными, абсолютными и относительными погрешностями измерений давления, температуры и молярных долей компонентов СПГ приведены в приложении В.

Приложение А
(обязательное)

Характеристические параметры компонентов сжиженного природного газа, коэффициенты и параметры метода расчета термодинамических свойств сжиженного природного газа

А.1 Метод расчета термодинамических свойств СПГ основан на применении расширенного принципа соответственных состояний к уравнению состояния метана [2], коэффициенты и показатели степеней которого приведены в таблице А.3 для безразмерных комплексов A_0—A_3.

А.2 С целью применения уравнения состояния метана [2] для расчета термодинамических свойств других компонентов СПГ (исключая диоксид углерода) определены приведенные в таблице А.4 коэффициенты для расчета параметров $\{\psi_i\}$, которые используются в принципе соответственных состояний в качестве параметров соответствия. Коэффициенты для расчета параметров $\{\psi_i\}$ определены в результате совместной обработки данных о плотности и скорости звука в однофазной области (жидкость) и на линии насыщения, приведенных в международном стандарте [4] и в таблицах Государственной службы стандартных справочных данных [5—7].

А.3 Для расчета скорости звука и показателя адиабаты определены коэффициенты, приведенные в таблице А.5, в результате обработки данных, полученных по оригинальным уравнениям для безразмерных изобарных теплоемкостей компонентов СПГ в идеально-газовом состоянии из [2, 4—8] в диапазоне температур от 100 до 140 К.

А.4 Для расчета термодинамических свойств смесей типа СПГ определены параметры бинарного взаимодействия компонентов СПГ, приведенные в таблице А.2. Эти параметры определены в результате совместной обработки данных о плотности и скорости звука бинарных смесей метана с другими компонентами СПГ (исключая диоксид углерода), рассчитанных по уравнению состояния GERG-2008 [4] в диапазоне температур от 100 до 140 К и давлений до 5 МПа.

Таблица А.1 — Молярная масса, критические параметры и факторы Питцера компонентов СПГ

Компонент	Молярная масса M_i, кг/кмоль	$T_{кр i}$, К	$\rho_{кр i}$, кг/м^3	Ω_i
Метан	16,0428	190,564	162,66	0,008
Этан	30,06904	305,322	206,18	0,098
Пропан	44,09562	369,89	220,4781	0,152
Изобутан	58,1222	407,81	225,50	0,176
н-Бутан	58,1222	425,125	228,0	0,193
Изопентан	72,1503	460,39	236,0	0,227
н-Пентан	72,1503	469,65	232,0	0,251
Азот	28,01348	126,192	313,3	0,040
Диоксид углерода	44,0098	304,1282	467,6	0,225

Таблица А.2 – Параметры бинарного взаимодействия компонентов СПГ

Пара компонентов (i, j)		Параметры бинарного взаимодействия	
		α_{ij}	β_{ij}
Метан	Этан	0,9939062	0,9932865
	Пропан	1,010338	0,9964106
	Изобутан	1,029222	0,9798303
	н-Бутан	1,049264	0,9709773
	Изопентан	1,339956	0,8788424
	н-Пентан	1,174340	0,9302709
	Азот	1,007886	0,9417593

Примечания
1 $\alpha_{ij} = \alpha_{ji}$; $\beta_{ij} = \beta_{ji}$ при $i \neq j$.
2 $\alpha_{ij} = \beta_{ij} = 1,0$ при $i = j$.
3 Для пар компонентов (i, j), не представленных в настоящей таблице, все параметры бинарного взаимодействия принимаются равными единице.

Т а б л и ц а А.3 — Коэффициенты и показатели степеней безразмерных комплексов $A_0 – A_3$

n	b_n	r_n	t_n	g_n	l_n	α_n	β_n	ε_n	γ_n
1	$0{,}04367901028 \cdot 10^{0}$	1	–0,5	0	0				
2	$0{,}6709236199 \cdot 10^{0}$	1	0,5	0	0				
3	$-1{,}765577859 \cdot 10^{0}$	1	1	0	0				
4	$0{,}8582330241 \cdot 10^{0}$	2	0,5	0	0				
5	$-1{,}206513052 \cdot 10^{0}$	2	1	0	0				
6	$0{,}512046722 \cdot 10^{0}$	2	1,5	0	0				
7	$-4{,}000010791 \cdot 10^{-4}$	2	4,5	0	0				
8	$-0{,}01247842423 \cdot 10^{0}$	3	0	0	0				
9	$0{,}03100269701 \cdot 10^{0}$	4	1	0	0				
10	$1{,}754748522 \cdot 10^{-3}$	4	3	0	0				
11	$-3{,}171921605 \cdot 10^{-6}$	8	1	0	0				
12	$-2{,}24034684 \cdot 10^{-6}$	9	3	0	0				
13	$2{,}947056156 \cdot 10^{-7}$	10	3	0	0				
14	$0{,}1830487909 \cdot 10^{0}$	1	0	–1	1				
15	$0{,}1511883679 \cdot 10^{0}$	1	1	–1	1				
16	$-0{,}4289363877 \cdot 10^{0}$	1	2	– 1	1				
17	$0{,}06894002446 \cdot 10^{0}$	2	0	– 1	1				
18	$-0{,}01408313996 \cdot 10^{0}$	4	0	– 1	1				
19	$-0{,}0306305483 \cdot 10^{0}$	5	2	– 1	1				
20	$-0{,}02969906708 \cdot 10^{0}$	6	2	– 1	1				
21	$-0{,}01932040831 \cdot 10^{0}$	1	5	– 1	2				
22	$-0{,}1105739959 \cdot 10^{0}$	2	5	– 1	2				
23	$0{,}09952548995 \cdot 10^{0}$	3	5	– 1	2				
24	$8{,}548437825 \cdot 10^{-3}$	4	2	– 1	2				
25	$-0{,}06150555662 \cdot 10^{0}$	4	4	– 1	2				
26	$-0{,}04291792423 \cdot 10^{0}$	3	12	– 1	3				
27	$-0{,}0181320729 \cdot 10^{0}$	5	8	– 1	3				
28	$0{,}0344590476 \cdot 10^{0}$	5	10	– 1	3				
29	$-2{,}38591945 \cdot 10^{-3}$	8	10	– 1	3				
30	$-0{,}01159094939 \cdot 10^{0}$	2	10	– 1	4				
31	$0{,}06641693602 \cdot 10^{0}$	3	14	– 1	4				
32	$-0{,}0237154959 \cdot 10^{0}$	4	12	– 1	4				
33	$-0{,}03961624905 \cdot 10^{0}$	4	18	– 1	4				
34	$-0{,}01387292044 \cdot 10^{0}$	4	22	– 1	4				
35	$0{,}03389489599 \cdot 10^{0}$	5	18	– 1	4				
36	$-2{,}927378753 \cdot 10^{-3}$	6	14	– 1	4				
37	$9{,}324799946 \cdot 10^{-5}$	2	2			– 20	– 200	1	1,07
38	$-6{,}287171518 \cdot 10^{0}$	0	0			– 40	– 250	1	1,11
39	$12{,}71069467 \cdot 10^{0}$	0	1			– 40	– 250	1	1,11
40	$-6{,}423953466 \cdot 10^{0}$	0	2			– 40	– 250	1	1,11

Таблица А.4 — Коэффициенты $\{\delta_i\}$ и $\{a_{ji}\}$ для расчета параметров $\{\psi_i\}$ по формуле (15)

	δ_i	a_{ji} для компонента j								
		Метан	Этан	Пропан	Изобутан	*н*-Бутан	Изопентан	*н*-Пентан	Азот	Диоксид углерода
1	1	0	–0,05499404	–0,1033802	–0,1446201	–0,1330569	–0,1344964	–0,1500247	–0,01106580	0
2	1	0	0,07132088	0,1256433	0,1691534	0,1515016	0,1757778	0,1765188	0,01395339	0
3	0	0	0,03411748	0,05515581	0,07255968	0,06703781	0,07751344	0,08076395	0,01517371	0
4	1	0	0,3463844	0,3877078	0,3843276	0,3101680	0,4160334	0,3802554	0,04907672	0
5	0	0	–0,1756987	–0,1868700	–0,1778766	–0,1428283	–0,1988925	–0,1789241	–0,02492141	0
6	1	0	0,01181235	0,05099110	0,07948337	0,1022543	0,09967660	0,1206911	0,007076269	0

Таблица А.5 — Коэффициенты для расчета безразмерных изобарных теплоемкостей компонентов СПГ в идеально-газовом состоянии по формуле (27)

Компонент	b_{ni} для компонента i при n, равном				
	0	1	2	3	4
Метан	3,98591747	0,0944817883	–0,184059518	0,121670883	0
Этан	4,04494534	–2,88738414	20,4420998	–36,3289167	24,1231231
Пропан	3,59984779	–4,14713461	68,4776240	–163,469780	133,087884
Изобутан	3,27383299	–4,49009735	114,587546	–290,175169	249,508274
н-Бутан	1,10821140	26,7646665	18,9823524	–194,636448	240,749363
Изопентан	10,1905588	–104,660203	586,666061	–1150,48022	817,341735
н-Пентан	1,30150258	7,42798405	241,151953	–857,021831	901,466209
Азот	3,50000066	0,0003858466241	0,0000744623688	0	0
Диоксид углерода	3,26743307	3,04166057	–14,4322345	28,2801767	–17,1064968

Таблица А.6 — Молярные массы *н*-гексана, *н*-гептана, *н*-октана и кислорода

Компонент	Молярная масса M_i, кг/кмоль
н-Гексан	86,177
н-Гептан	100,204
н-Октан	114,231
Кислород	31,9988

Приложение Б
(справочное)

Примеры расчета термодинамических свойств сжиженного природного газа

Б.1 Примеры расчета, приведенные в настоящем приложении, рекомендуется использовать в качестве тестовых данных при программной реализации метода расчета термодинамических свойств СПГ, который приведен в настоящем стандарте.

Б.2 Примеры расчета приведены в форме таблиц. При этом в таблице Б.1 даны молярные доли компонентов смесей, имитирующих СПГ, а в таблицах Б.2, Б.3 и Б.4 приведены расчетные значения термодинамических свойств для этих смесей при соответствующих температурах и давлениях.

Таблица Б.1 — Молярные доли компонентов смесей, имитирующих СПГ

Компоненты	Молярная доля для смесей, %		
	№ 1	№ 2	№ 3
Метан	89,782	95,501	99,007
Этан	4,552	2,301	0,227
Пропан	0,414	0,291	0,042
Изобутан	—	0,038	0,005
н-Бутан	0,144	0,063	0,008
Изопентан	—	0,012	0,001
н-Пентан	0,119	0,089	0,002
Азот	4,984	1,701	0,708
Диоксид углерода	0,005	0,004	—

Таблица Б.2 — Расчетные значения термодинамических свойств для смеси № 1

T, K	*p*, МПа	ρ, кг/м^3	z	*u*, м/с	k
100,00	0,1	471,14	0,00447	1428,1	9608,16
120,00	0,1	440,64	0,00399	1236,1	6733,23
140,00	0,1	405,53	0,00371	1428,1	4248,93
100,00	1,0	471,85	0,04466	1434,8	971,35
120,00	1,0	441,66	0,03976	1245,5	685,16
140,00	1,0	407,18	0,03697	1037,7	438,46
100,00	3,0	473,40	0,13356	1449,4	331,51
120,00	3,0	443,87	0,11870	1265,7	237,02
140,00	3,0	410,64	0,10998	1067,2	155,90
100,00	5,0	474,90	0,22189	1463,7	203,48
120,00	5,0	445,99	0,19690	1285,0	147,28
140,00	5,0	413,86	0,18187	1094,6	99,18

Таблица Б.3 — Расчетные значения термодинамических свойств для смеси № 2

T, K	*p*, МПа	ρ, кг/м^3	*z*	*u*, м/с	*k*
100,00	0,1	453,74	0,00444	1450,0	9539,24
120,00	0,1	424,32	0,00396	1254,9	6682,65
140,00	0,1	390,38	0,00369	1038,3	4208,75

Окончание таблицы Б.3

T, K	*p*, МПа	ρ, кг/м^3	*z*	*u*, м/с	*k*
100,00	1,0	454,42	0,04434	1456,8	964,40
120,00	1,0	425,31	0,03947	1264,5	680,06
140,00	1,0	391,98	0,03671	434,44	1052,8
100,00	3,0	455,92	0,13257	1471,7	329,15
120,00	3,0	427,44	0,11783	1285,0	235,28
140,00	3,0	395,34	0,10920	1083,0	154,56
100,00	5,0	457,37	0,22025	1486,2	202,04
120,00	5,0	429,49	0,19545	1304,7	146,22
140,00	5,0	398,45	0,18058	1111,0	98,37

Т а б л и ц а Б.4 — Расчетные значения термодинамических свойств для смеси № 3

T, K	*p*, МПа	ρ, кг/м^3	z	*u*, м/с	*k*
100,00	0,1	442,09	0,00440	1445,9	9242,02
120,00	0,1	412,67	0,00393	1246,2	6408,39
140,00	0,1	378,40	0,00367	1022,4	3955,49
100,00	1,0	442,78	0,04395	1452,9	934,71
120,00	1,0	413,68	0,03920	1256,1	652,73
140,00	1,0	380,06	0,03657	1037,8	409,37
100,00	3,0	444,28	0,13139	1468,3	319,28
120,00	3,0	415,85	0,11698	1277,5	226,23
140,00	3,0	383,55	0,10871	1069,9	146,35
100,00	5,0	445,75	0,21826	1483,2	196,13
120,00	5,0	417,93	0,19399	1298,0	140,82
140,00	5,0	386,77	0,17968	1099,5	93,50

Приложение В
(справочное)

Соотношения между приведенными, абсолютными и относительными погрешностями измерений

В.1 Если для измеряемых параметров СПГ (давление, температура) в документации на применяемые средства измерений (далее — СИ) даны приведенные погрешности, то относительная погрешность их измерений связана с приведенной погрешностью следующим соотношением:

$$\delta = \frac{\gamma \cdot X_N}{X}, \qquad (В.1)$$

где γ — приведенная погрешность, %;

X_N — нормирующее значение параметра, численно равное диапазону измерения применяемого СИ;

X — измеренное значение параметра.

Примечание — Если нижний предел измерений у применяемого СИ равен нулю, то диапазон измерения этого СИ равен его верхнему пределу измерений.

В.2 Если для измеряемых параметров СПГ (давление, температура, молярные доли компонентов) в документации на соответствующие СИ или в методике измерений даны абсолютные погрешности или расширенная абсолютная неопределенность измерения этих параметров, то относительная погрешность их измерений связана с абсолютной погрешностью или с расширенной абсолютной неопределенностью следующим соотношением:

$$\delta = 100\frac{\Delta_x}{X}, \qquad (В.2)$$

где Δ_x — абсолютная погрешность или расширенная абсолютная неопределенность измерения параметра;

X — измеренное значение параметра.

Библиография

Государственная служба стандартных справочных данных ГСССД 237—2008	Фундаментальные физические константы
Государственная служба стандартных справочных данных ГСССД 284—2013	Метан жидкий и газообразный. Термодинамические свойства, коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности при температурах 91…700 К и давлениях до 100 МПа
ISO 6578:1991*	Refrigerated hydrocarbon liquids. Static measurement. Calculation procedure
ISO 20765-2:2015*	Natural gas — Calculation of thermodynamic properties — Part 2: Single-phase properties (gas, liquid, and dense fluid) for extended ranges of application
Государственная служба стандартных справочных данных ГСССД 196—2001	Этан жидкий и газообразный. Термодинамические свойства, коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности при температурах 91…625 К и давлениях 0,1—70 МПа
Государственная служба стандартных справочных данных ГСССД 197—2001	Пропан жидкий и газообразный. Термодинамические свойства, коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности при температурах 86…700 К и давлениях 0,1—100 МПа
Государственная служба стандартных справочных данных ГСССД 283—2013	Азот жидкий и газообразный. Термодинамические свойства, коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности при температурах 65...1000 К и давлениях до 200 МПа
Государственная служба стандартных справочных данных ГСССД 96—86	Диоксид углерода жидкий и газообразный. Плотность, фактор сжимаемости, энтальпия, энтропия, изобарная теплоемкость, скорость звука и коэффициент объемного расширения при температурах 220 —1300 К и давлениях 0,1—100 МПа

* С указанными стандартами можно ознакомиться в Федеральном информационном фонде технических регламентов и стандартов.

УДК 665.612.3:533.1:006.354 ОКС 75.060

Ключевые слова: сжиженный природный газ, метод расчета, термодинамические свойства

Редактор *А.А. Бражников*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *В.Е. Нестерова*
Компьютерная верстка *Е.О. Асташина*

Сдано в набор 25.02.2016. Подписано в печать 10.03.2016. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 2,79. Уч.-изд. л. 2,25. Тираж 35 экз. Зак. 718.

Издано и отпечатано во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123995 Москва, Гранатный пер., 4.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru