

Проект

Изображение государственного Герба Республики Казахстан

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ НЕФТЯНАЯ И ГАЗОВАЯ

**Определение значений теплофизических свойств сухих и влажных
многокомпонентных газовых смесей
переменных составов в газовой фазе»
СТ РК**

Настоящий проект стандарта не подлежит применению до его утверждения

**Комитет технического регулирования и метрологии
Министерства торговли и интеграции Республики Казахстан
(Госстандарт)**

Астана

Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН И ВНЕСЕН Акционерным обществом «Ситуационно-аналитический центр топливно-энергетического комплекса Республики Казахстан»

2 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Председателя Комитета технического регулирования и метрологии Министерства торговли и интеграции Республики Казахстан № ____ от « » ____ 202_ года

3 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодно издаваемом информационном каталоге «Документы по стандартизации», а текст изменений и поправок - в периодически издаваемых информационных каталогах «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в периодически издаваемом информационном каталоге «Национальные стандарты»

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Комитета технического регулирования и метрологии Министерства торговли и интеграции Республики Казахстан.

Содержание

1	Область применения	1
2	Сокращения и обозначения	1
3	Методы расчета теплофизических свойств	2
3.1	Фундаментальная формула состояние для смесей	2
3.2	Комплексы для расчета термодинамических свойств	5
3.3	Расчет плотности	7
3.4	Расчет фактора сжимаемости, скорости звука и показателя адиабаты	8
3.5	Расчет предельной равновесной молярной доли (растворимости) водяных паров в газовой смеси	9
3.6	Расчет коэффициента динамической вязкости	13
4	Алгоритм расчета	16
4.1	Расчет предельной равновесной молярной доли H_2O	16
4.2	Расчет молярной доли H_2O во влажном газе	17
4.3	Расчет характерных параметров смеси	19
4.4	Расчет плотности по ФУС (1 – 7)	20
4.5	Расчет фактора сжимаемости, скорости звука и показателя адиабаты	21
4.6	Расчет коэффициента динамической вязкости	21
5	Пределы применимости настоящего стандарта, сравнение с экспериментальными данными и неопределенности расчетных значений теплофизических свойств	21
	Приложение А (обязательное)	23

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ НЕФТЯНАЯ И ГАЗОВАЯ

Определение значений теплофизических свойств сухих и влажных
многокомпонентных газовых смесей
переменных составов в газовой фазе

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на сухие и влажные газовые смеси в диапазоне температур от 263 до 500 К при давлении до 30 МПа для использования в нефтегазовой промышленности и устанавливает метод определения плотности, фактора сжимаемости, скорости звука, показателя адиабаты и коэффициента динамической вязкости.

2 Сокращения и обозначения

ФУС – фундаментальная формула состояния;

T – абсолютная температура, К;

p – абсолютное давление, МПа;

t – температура, °С;

R – универсальная газовая постоянная ($R = 8.314472$), кДж/(кмоль·К);

N – число компонентов смеси;

$\{x_i\}$, \tilde{x} – молярные доли компонентов смеси;

$\{x_{id}\}$, \tilde{x}_d – молярные доли «сухих» компонентов влажной смеси,

приведенные к 1 ($x_{H_2O} = \sum_{i=1}^{N-1} x_{id} = 1$);

0,

$\{x_{iw}\}$, \tilde{x}_w – молярные доли всех компонентов влажной смеси, включая x_{H_2O} ;

x_p – предельная равновесная молярная доля (растворимость) водяных паров в газовой смеси;

α – абсолютная влажность смеси, г/м³;

ϕ – относительная влажность смеси, в долях единицы или %;

F_{res} – неидеальная составляющая свободной энергии, кДж/кмоль;

f_{res} – безразмерная неидеальная составляющая свободной энергии (F_{res}/RT);

ρ – плотность, кг/м³;

СТ РК

(проект, первая редакция)

ρ – молярная плотность, кмоль/м³;

M – молярная масса, кг/кмоль;

Ω – ацентрический фактор Питцера;

z – фактор сжимаемости ($10^3 p/(R\rho T)$);

w – скорость звука, м/с;

k – показатель адиабаты;

μ – коэффициент динамической вязкости, мкПа·с;

$\Delta\mu$ – избыточная составляющая коэффициента динамической вязкости;

ϑ – критический фактор вязкости, мкПа·с;

τ – относительная температура;

ω – относительная плотность;

π – относительное давление;

$\{\varphi_k\}$ – параметры аффинных преобразований для вязкости ($k=1, \dots, 6$);

$\{b_j, c_j\}$ – коэффициенты формулы состояния;

$\{r_j, l_j, t_j\}$ – показатели степеней плотности и температуры в формулах;

$\{g_j, \alpha_j, \beta_j, \gamma_j, \varepsilon_j\}$ – параметры формул состояния.

Нижние индексы:

res – величина неидеальной составляющей;

bs – значение величины для базового общества (для вязкости);

s – значение величины на линиях насыщения или сублимации;

i, j – значение величины для i -го или j -го компонента смеси;

m – значение величины для смеси;

c – значение величины в критическом состоянии;

0 – значение величины в состоянии идеального или разреженного газа;

H_2O – значение величины для чистых водяного пара, воды или льда.

3 Методы расчета теплофизических свойств

3.1 Фундаментальная формула состояния для смесей

Значения термодинамических свойств: ρ , z , w и k для смеси рассчитываются с помощью неидеальной составляющей ФУС (1), (2) (для расчета w и k дополнительно используется формулу для изобарной теплоемкости C_{p0r}):

$$f_{res}(\omega, \tau, \check{x}) = f_{res1}(\omega, \tau, \check{x}) + f_{res2}(\omega, \tau, \check{x}) \quad (1)$$

$$f_{res1}(\omega, \tau, \rho_x) = \sum_{i=1}^N x_i f_{ri}(\omega, \tau) \quad (2)$$

$$f_{res2}(\omega, \tau, \rho_x) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j \psi_{ij} f_{rij}(\omega, \tau) \quad (3)$$

В формуле (1) $f_{res} = F_{res} / (RT)$, F_{res} - неидеальная составляющая свободной энергии (функции Гельмгольца) смеси; $\omega = \tilde{\rho} / \tilde{\rho}_{cm}$, ω - относительная плотность; $\tau = T / T_{cm}$, τ - относительная температура; $\tilde{\rho}_{cm}$ и T_{cm} псевдокритические плотность и температура смеси.

В формулах (2), (3) f_{ri} - безразмерная неидеальная составляющая свободной энергии i -го компонента смеси; f_{rij} — безразмерная неидеальная составляющая свободной энергии бинарной смеси, состоящей из компонентов (i, j) ; ψ_{ij} - параметры (константы) для бинарной смеси, состоящей из компонентов (i, j) .

Формула для f_{ri} и f_{rij} имеют следующий вид:

$$f_{ri} = \sum_{k=1}^{M_i} b_{ik} \varphi_{ik} \quad (4)$$

где:

$$\varphi_{ik} = \omega^{r_{ik}} \tau^{-t_{ik}} \exp(g_{ik} \omega^{l_{ik}}) \quad (5)$$

$$f_{rij} = \sum_{k=1}^{M_{ij}} c_{ijk} \theta_{ijk} \quad (6)$$

где:

$$\theta_{ijk} = \omega^{r_{ijk}} \tau^{-t_{ijk}} \exp \left[-\alpha_{ijk} (\omega - \varepsilon_{ijk})^2 - \beta_{ijk} (\omega - \gamma_{ijk}) \right] \quad (7)$$

СТ РК

(проект, первая редакция)

Значения коэффициентов и показателей степеней $\{b_{ik}\}, \{r_{ik}\}, \{t_{ik}\}, \{g_{ik}\}, \{l_{ik}\}$ для формул (4), (5) приведены в Таблице А1, приложения А, значения $\{c_{ijk}\}, \{r_{ijk}\}, \{t_{ijk}\}, \{\alpha_{ijk}\}, \{\beta_{ijk}\}, \{\varepsilon_{ijk}\}, \{\gamma_{ijk}\}$ для формул (6), (7) приведены в Таблице А2, Приложение А, параметры $\{\psi_{ij}\}$ формулы (1) приведены в Таблице А3, Приложение А.

Псевдокритические плотность $\tilde{\rho}_{cm}$ и температура T_{cm} смеси рассчитываются по следующим правилам комбинирования:

$$\tilde{\rho}_{cm}^{-1} = \tilde{v}_{cm} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j T_{cij} \quad (8)$$

$$\tilde{v}_{cij} = \beta_{vij} \cdot \gamma_{vij} \cdot \frac{x_i + x_j}{\beta_{vij}^2 x_i + x_j} \left[\frac{(1/\tilde{\rho}_{ci})^{1/3} + (1/\tilde{\rho}_{cj})^{1/3}}{2} \right]^3 \quad (9)$$

$$T_{cm} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j T_{cij} \quad (10)$$

$$T_{cij} = \beta_{Tij} \cdot \gamma_{Tij} \cdot \frac{x_i + x_j}{\beta_{Tij}^2 x_i + x_j} (T_{ci} \cdot T_{cj})^{0.5} \quad (11)$$

В формулах (9), (11) $\{\beta_{vij}\}, \{\gamma_{vij}\}, \{\beta_{Tij}\}, \{\gamma_{Tij}\}$ – параметры бинарного взаимодействия $\{\tilde{\rho}_{ci}, \tilde{\rho}_{cj}\}, \{T_{ci}, T_{cj}\}$ – критические молярные объемы и критические температуры для пар компонентов (i, j) . Значения критических параметров для всех компонентов приведены в таблице А4, Приложение А.

В формулах (8 - 11) нужно учитывать, что

$$\beta_{vji} = 1/\beta_{vij}, \gamma_{vji} = \gamma_{vij}; \beta_{Tji} = 1/\beta_{Tij}, \gamma_{Tji} = \gamma_{Tij}. \quad (12)$$

Значение параметров бинарного взаимодействия $\{\beta_{vij}\}, \{\gamma_{vij}\}, \{\beta_{Tij}\}, \{\gamma_{Tij}\}$ приведены в таблице А5 Приложения А. Для бинарных смесей с водяным паром (H_2O) таких компонентов, как метан

(CH₄), азот (N₂), диоксид углерода (CO₂), этан (C₂H₆), пропан (C₃H₈) нормальный бутан (nC₄H₁₀) и сероводород (H₂S) значения параметров бинарного взаимодействия определены настоящим стандартом из экспериментальных данных по растворимости (5) H₂O в соответствующих газах.

3.2 Комплексы для расчета термодинамических свойств

Термодинамические свойства, в том числе ρ, z, w и k , а также x_p могут быть получены из формул (1 - 7) с помощью известных дифференциальных формул термодинамики. При программировании, для расчета термодинамических свойств удобно использовать так называемые комплексы (безразмерные) $A_0 - A_4$. Эти комплексы имеют следующий вид:

$$A_n(\omega, \tau, \rho_x) = \sum_{i=1}^N x_i P_{in}(\omega, \tau) + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j \psi_{ij} \beta_{ijn}(\omega, \tau); n = 0, 1, 2, 3, 4. \quad (13)$$

$$P_{i0} = \sum_{k=1}^{M_i} b_{ik} \varphi_{ik} X_{ik} \quad (14)$$

$$P_{i1} = \sum_{k=1}^{M_i} b_{ik} \varphi_{ik} [X_{ik}(X_{ik} + 1) + U_{ik}] \quad (15)$$

$$P_{i2} = \sum_{k=1}^{M_i} b_{ik} \varphi_{ik} [X_{ik}(Y_{ik} + 1)] \quad (16)$$

$$P_{i3} = - \sum_{k=1}^{M_i} b_{ik} \varphi_{ik} [Y_{ik}(Y_{ik} + 1)] \quad (17)$$

СТ РК

(проект, первая редакция)

$$P_{i4} = \sum_{k=1}^{M_i} b_{ik} \varphi_{ik} Y_{ik} \quad (18)$$

где:

$$X_{ik} = r_{ik} + g_{ik} l_{ik} \omega^{l_{ik}} \quad (19)$$

$$U_{ik} = g_{ik} l_{ik}^2 \omega^{l_{ik}} \quad (20)$$

$$Y_{ik} = -t_{ik} \quad (21)$$

$$B_{ij0} = \sum_{k=1}^{M_{ij}} c_{ijk} \Theta_{ijk} X_{ijk} \quad (22)$$

$$B_{ij1} = \sum_{k=1}^{M_{ij}} c_{ijk} \Theta_{ijk} [X_{ijk}(X_{ijk} + 1) + U_{ijk}] \quad (23)$$

$$B_{ij2} = \sum_{k=1}^{M_{ij}} c_{ijk} \Theta_{ijk} [X_{ijk}(Y_{ijk} + 1)] \quad (24)$$

$$B_{ij3} = - \sum_{k=1}^{M_{ij}} c_{ijk} \Theta_{ijk} [Y_{ijk}(Y_{ijk} + 1)] \quad (25)$$

$$B_{ij4} = \sum_{k=1}^{M_{ij}} c_{ijk} \Theta_{ijk} Y_{ijk} \quad (26)$$

где:

$$X_{ijk} = r_{ijk} - 2\alpha_{ijk}\omega(\omega - \varepsilon_{ijk}) - \beta_{ijk}\omega \quad (27)$$

$$U_{ijk} = -2\alpha_{ijk}\omega(2\omega - \varepsilon_{ijk}) - \beta_{ijk}\omega \quad (28)$$

$$Y_{ijk} = -t_{ijk}$$

При расчете комплексов A_n по формуле (13) функции B_{ijn} (22 - 26) рассчитываются только для тех бинарных смесей компонентов (i, j) , для которых имеются формулы (6), (7) и параметров $\psi_{ij} \neq 0$ Таблицы А2 и А3 Приложения А.

Исходя из формул (1 – 7) и (13), ФУС и расчетные комплексы $A_0 - A_4$ являются функциями температуры и плотности. В то же время исходными данными при расчете термодинамических свойств, являются температура и давление. Поэтому первым шагом при расчете любых свойств (в том числе и самой ρ) должно быть определение значения относительной плотности (ω) по заданным T, ρ и $\{x_i\}$.

3.3 Расчет плотности

Относительная плотность смеси ω при заданных значениях давления (p), температуры (T) и молярных долей компонентов $\{x_i\}$ определяется из решения следующей формулы:

$$\pi = \omega\tau(1 + A_0)/Z_{cm}, \quad (29)$$

где: $\pi = \rho/\rho_{cm}$; $\tau = T/T_{cm}$, A_0 – расчетный комплекс (13, 14, 22).

Значения псевдокритических факторов сжимаемости z_{cm} и давления ρ_{cm} для смеси определяются по следующим формулам:

$$z_{cm} = 0,291 - 0,08\Omega_m, \quad (30)$$

$$\rho_{cm} = 10^{-3}R\tilde{\rho}_{cm}T_{cm}z_{cm}, \quad (31)$$

$$\Omega_m = \sum_{i=1}^N x_i\Omega_i \quad (32)$$

В формулах (30), (32) Ω_m – ацентрический фактор Питцера для смеси; $\{\Omega_i\}$ – факторы Питцера для отдельных компонентов; значения $\{\Omega_i\}$ приведены в Таблице А4, Приложение А; значение универсальной газовой постоянной

$R = 8.314472$ Дж/моль·К.

СТ РК

(проект, первая редакция)

Решение формулы (29) осуществляется в итерационном процессе методом Ньютона; значения начальных приближений $\omega^{(0)}$ выбираются в зависимости от значений заданных параметров состояния ($T, \rho, \{x_i\}$ смеси (расчет плотности по ФУС (1 - 7) раздела 4 – Алгоритм расчета). После вычисления ω в итерационном процессе плотность смеси ρ в кг/м³ рассчитывается по формуле

$$\rho = M\tilde{\rho}_{cm}\omega \quad (33)$$

Молярная масса смеси M вычисляется по следующей формуле:

$$M = \sum_{i=1}^N x_i \cdot M_i \quad (34)$$

где M_i – молярная масса i -го компонента смеси; значения $\{M_i\}$ для чистых компонентов представлены в таблице А4, Приложение А.

3.4 Расчет фактора сжимаемости, скорости звука и показателя адиабаты

Фактор сжимаемости, скорость звука и показатель адиабаты смеси при использовании ФУС (1 - 7) вычисляются по следующим формулам:

$$z = 1 + A_0 \quad (35)$$

$$w = \{10^3 RM^{-1}T[1 + A_1 + (1 + A_2)^2 / (c_{p0r} - 1 + A_3)]\}^{0.5} \quad (36)$$

$$k = [1 + A_1 + (1 + A_2)^2 / (c_{p0r} - 1 + A_3)]/z \quad (37)$$

где: c_{p0r} – безразмерная изобарная теплоемкость смеси в идеальном-газовом состоянии, A_0, A_1, A_2 и A_3 – расчетные комплексы (13 – 17, 22 – 25).

Безразмерная изобарная теплоемкость смеси в идеальном-газовом состоянии c_{p0r} определяется по формуле:

$$c_{p0r} = \sum_{i=1}^N x_i c_{p0ri}$$

где: $\{c_{p0ri}\}, i = 1, \dots, N$ – безразмерные (c_{p0i}/R) изобарные теплоемкости компонентов в идеально-газовом состоянии.

Значения величин $\{c_{p0ri}\}, i = 1, \dots, N$ в (38) вычисляются по формулам вида:

$$c_{p0ri} = \alpha_{0i} + b_{0i}\Theta + c_{0i}\Theta^2 + d_{0i}\Theta^3 + e_{0i}\Theta^4 \quad (39)$$

где $\Theta = T/T_0$; $T_0 = 100$ К для всех компонентов.

Константы $\{\alpha_{0i}\}, \{b_{0i}\}, \{c_{0i}\}, \{d_{0i}\}$ и $\{e_{0i}\}$ формулы (39) приведены в таблице А6, Приложения А.

3.5 Расчет предельной равновесной молярной доли (растворимости) водяных паров в газовой смеси

При давлениях смеси p , превышающих давление сублимации или насыщения H_2O для данной температуры ($p \geq p_{sH_2O}(T)$) предельная равновесная молярная доля (растворимость) водяных паров в газовой смеси x_p существенно ограничена; она возрастает с ростом температуры, уменьшается с ростом давления. Если влажность газовой смеси $x_{H_2O} \neq 0$, еще до расчета других теплофизических свойств влажного газа необходимо проверить выполняется ли условие $x_{H_2O} \leq x_p$ при данных T и p . Если вместо x_{H_2O} задается относительная влажность $\varphi = x_{H_2O}/x_p$, для расчета молярной доли водяных паров также необходимо значение x_p .

При фазовом равновесии влажный газ – конденсированная фаза, если конденсированной фазой является чистая вода и лед, формула для расчета растворимости x_p имеет следующий вид:

$$\mu_{wg}(T, P, x_1, x_2, \dots, x_{N-1}, x_p) = \mu_{wi}(T, P) \quad (40)$$

где: μ_{wg} – химический потенциал водяного пара во влажном газе, μ_{wi} – химический потенциал чистых воды или льда в конденсированной фазе (потенциал Гиббса); при этом молярные доли всех компонентов (за исключением водяного пара) определяются как:

$$x_i = x_{id}(1 - x_p), i = 1, \dots, N - 1 \quad (41)$$

где x_{id} – молярная доля i – го компонента в сухом газе.

Химический потенциал μ_{wg} в формуле (40) рассчитывается по ФУС для смеси (1 – 7), μ_{wl} рассчитывается по формуле для воды (3) или льда (4).

СТ РК

(проект, первая редакция)

После соответствующих преобразований формула растворимости (40) можно записать в следующем виде:

$$F_{\mu}(T, P, x_1, \dots, x_{N-1}, x_p) = f_{rH_2O} - f_{res2} + A_0 \cdot (1 + \tilde{\rho}_{cm} d\tilde{v}_{cm}) - A_4 dT_{cm}/T_{cm} + \ln(\tilde{\rho}) + \ln(x_p) - G_{H_2O}(T, P) = 0 \quad (42)$$

В формуле (42) функции $d\tilde{v}_{cm}$ и dT_{cm} вычисляются следующим образом:

$$d\tilde{v}_{cm} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N d\tilde{v}_{cij} \quad (43)$$

$$dT_{cm} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N dT_{cij} \quad (44)$$

Если водяной пар (H_2O) является k -ым компонентом смеси, то для вычисления $d\tilde{v}_{cij}$ dT_{cij} в формулах (43), (44) используются следующие формулы.

При $i \neq k$ и $j \neq k$:

$$d\tilde{v}_{cij} = -\tilde{v}_{cij}(2x_i x_j + x_i^2 x_j dX_{vi}|X_v + x_i x_j^2 dX_{vj}|X_v) \quad (45)$$

$$dT_{cij} = -T_{cij}(2x_i x_j + x_i^2 x_j dX_{Ti}|X_T + x_i x_j^2 dX_{Tj}|X_T) \quad (46)$$

При $i = k$ и $j \neq k$:

$$d\tilde{v}_{cij} = \tilde{v}_{cij} \left((1 - x_i)x_j - x_i x_j + x_i(1 - x_i)x_j dX_{vi}|X_v - x_i x_j^2 dX_{vj}|X_v \right) \quad (47)$$

$$dT_{cij} = T_{cij} \left((1 - x_i)x_j - x_i x_j + x_i(1 - x_i)x_j dX_{Ti}|X_T - x_i x_j^2 dX_{Tj}|X_T \right) \quad (48)$$

При $i \neq k$ и $j = k$:

$$d\tilde{v}_{cij} = \tilde{v}_{cij} \left((1 - x_j)x_i - x_i x_j + x_i(1 - x_j)x_j dX_{vj} | X_v - x_j x_i^2 dX_{vi} | X_v \right) \quad (49)$$

$$dT_{cij} = T_{cij} \left((1 - x_j)x_i - x_i x_j + x_i(1 - x_j)x_j dX_{Tj} | X_T - x_j x_i^2 dX_{Ti} | X_T \right) \quad (50)$$

При $i = k$ и $j = k$:

$$d\tilde{v}_{cij} = \tilde{v}_{cij} \left((1 - x_i)x_j + (1 - x_j)x_i + x_i(1 - x_j)x_j dX_{vj} | X_v + x_j x_i(1 - x_i) dX_{vi} | X_v \right) \quad (51)$$

$$dT_{cij} = T_{cij} \left((1 - x_i)x_j + (1 - x_j)x_i + x_i(1 - x_j)x_j dX_{Tj} | X_T + x_j x_i(1 - x_i) dX_{Ti} | X_T \right) \quad (52)$$

В формулах (45 – 52) \tilde{v}_{cij} и T_{cij} рассчитываются по формулам (9) и (11), соответственно. Функции X_v , dX_{vi} , dX_{vj} и X_T , dX_{Ti} , dX_{Tj} рассчитываются по формулам:

$$X_v = \frac{x_i + x_j}{\beta_{vij}^2 x_i + x_j} \quad (53)$$

$$dX_{vi} = \frac{x_j(1 - \beta_{vij}^2)}{(\beta_{vij}^2 x_i + x_j)^2} \quad (54)$$

$$dX_{vj} = \frac{x_i(\beta_{vij}^2 - 1)}{(\beta_{vij}^2 x_i + x_j)^2}; \quad (55)$$

$$X_T = \frac{x_i + x_j}{\beta_{Tij}^2 x_i + x_j} \quad (56)$$

$$dX_{Ti} = \frac{x_j(1 - \beta_{Tij}^2)}{(\beta_{Tij}^2 x_i + x_j)^2} \quad (57)$$

$$dX_{Tj} = \frac{x_i(\beta_{Tij}^2 - 1)}{(\beta_{Tij}^2 x_i + x_j)^2} \quad (58)$$

Формулы $G_{H_2O}(T, P)$ для чистой воды или льда в формуле (42) рассчитываются по аппроксимационными формулам вида:

для воды ($T \geq 273.15$ K)

$$G_{H_2O} = - \sum_{i=1}^{14} b_{wi} \pi^{n_{wi}} \Theta^{t_{wi}} \quad (59)$$

для льда ($T < 273.15$ K)

$$G_{H_2O} = - \sum_{i=1}^7 b_{ici} \pi^{n_{ici}} \Theta^{t_{ici}} \quad (60)$$

В формулах (59) и (60) $\pi = P/15$, МПа; $\Theta = T/273.15$ K; коэффициенты и показатели степеней приведены в Таблице А11, Приложение А.

Решение формулы (42) относительно x_p осуществляется в итерационном процессе методом Ньютона с численным расчетом производных; значения начальных приближений $x_p^{(0)}$ выбираются в зависимости от значений рабочих параметров состояния (T, p) смеси (см. 4.1)

Если $x_{H_2O} \leq x_p$, то расчет всех теплофизических свойств производится с заданной молярной долей водяного пара в смеси; в противном случае необходимо изменить эту величину: $x_{H_2O} = x_p$ пересчитать молярные доли остальных компонентов по формуле (41).

Ряд компонентов природного и нефтяного газа, особенно метан могут образовывать в конденсированной фазе кристаллогидраты, при использовании предложенного метода расчета растворимости, необходимо ограничить рассматриваемую область параметров состояния по давлению, чтобы конденсированная фаза не содержала кристаллогидратов. Основным компонентом, является метан, для приблизительной оценки нижней границы давления начала образования кристаллогидратов $P_{кг}$, МПа могут быть использованы следующие формулы (6):

для льда ($T < 273.15$ K)

$$\lg(P_{кг}) = 3.723 - 921.2/T \quad (61)$$

для воды ($T \geq 273.15$ K)

$$\lg(P_{\text{кг}}) = 15.615 - 4170/T \quad (62)$$

Максимальное для настоящего стандарта организации давление (30 МПа), согласно формуле (62), достигается при температуре = 294.95 К; при минимальной температуре 263.00 К $P_{\text{кг}} = 1,66$ МПа.

Примечание - Информация о давлениях начала образования кристаллогидратов в газовых смесях в зависимости от температуры и концентраций компонентов отсутствует.

3.6 Расчет коэффициента динамической вязкости

Коэффициент динамической вязкости смеси рассчитывается следующим образом (7):

$$\mu_m = \mu_{0m}(T, \tilde{x}) + \vartheta_m \Delta\mu_{bs}(\tau, \omega) \quad (63)$$

$$\vartheta_m = \frac{2,63094 M^{1/2} p_{cm}^{2/3}}{T_{cm}^{1/6}} \quad (64)$$

где μ_{0m} – коэффициент динамической вязкости смеси в состоянии разреженного газа, зависящий только от компонентного состава и температуры;

$\Delta\mu_{bs}(\tau, \omega)$ – безразмерная избыточная составляющая коэффициента динамической вязкости смеси, зависящая от компонентного состава, температуры и плотности;

ϑ_m – критический фактор вязкости смеси;

В качестве базового вещества (bs) принят метан.

Коэффициент динамической вязкости смеси в состоянии разреженного газа μ_{0m} рассчитывается как отношение двух определителей:

$$\mu_0 = -\det[h_{ij}]/\det[g_{kl}], \quad i, j = 1, N+1; k, l = 1, N \quad (65)$$

Элементы определений имеют следующие значения:

для $i = N+1; j = 1, N+1; i = N+1; j = N+1$:

$$h_{(N+1)j} = h_{i(N+1)} = x_j = x_i, \quad i, j = 1, N; \quad h_{(N+1)(N+1)} = 0 \quad (66)$$

для $i, j, (k, l) = 1, N$ диагональные элементы ($i = j$):

$$h_{ij} = g_{ii} = \frac{x_i^2}{\mu_i} + \sum_{k=1, k \neq i}^N \frac{2x_i x_k M_i M_k}{\mu_{ik} (M_i + M_k)^2} \left[\frac{5}{3A_{ik}^*} + \frac{M_k}{M_i} \right] \quad (67)$$

Недиагональные элементы ($i \neq j$):

$$h_{ij} = g_{ij} = - \frac{2x_i x_j M_i M_j}{\mu_{ij} (M_i + M_j)^2} \left[\frac{5}{3A_{ij}^*} - 1 \right] \quad (68)$$

где $A_{ij}^* = \Omega_{ij}^{(2,2)*} / \Omega_{ij}^{(1,1)*}$.

Значения вязкостей для чистых компонентов μ_i и их бинарных комбинаций μ_{ij} в формулах (67), (68) вычисляются по формуле:

$$\mu_{ij} = 2,6693 \cdot \left[\frac{\sqrt{2M_i M_j T / (M_i + M_j)}}{\sigma_{ij}^2 \Omega_{ij}^{(2,2)*}} \right] \quad (69)$$

При расчете вязкости чистых компонентов $\{\mu_i\}$ по формуле (69) $i = j$. $\Omega_{ij}^{(2,2)*}$ для всех случаев, кроме чистого водяного пара, и $\Omega_{ij}^{(1,1)*}$ вычисляются как:

$$\Omega_{ij}^{(2,2)*} = \sum_{l=0}^9 b_{2l} T_{rij}^{-0,5l} \quad (70)$$

$$\Omega_{ij}^{(1,1)*} = \sum_{l=0}^9 b_{1l} T_{rij}^{-0,5l} \quad (71)$$

Для чистого водяного пара функция $\Omega_{ij}^{(2,2)*}$ вычисляется аналогично (70), но с использованием других коэффициентов:

$$\Omega_{H_2O}^{(2,2)*} = \sum_{l=0}^9 b_{2wl} T_{rH_2O}^{-0,5l} \quad (72)$$

Значения коэффициентов $\{b_{2l}\}, \{b_{1l}\}$ и $\{b_{2wl}\}$, приведены в Таблице А7, Приложение А; приведенные температуры $T_{rij} = T/(\varepsilon/k)_{ij}, T_{rH_2O} = T/(\varepsilon/k)_{H_2O}$. Параметры потенциала Леннарда-Джонса σ_{ij} и $(\varepsilon/k)_{ij}$ для расчета коэффициента динамической вязкости определяются по следующим формулам:

$$\sigma_{ij} = 0,5 \cdot (\sigma_i + \sigma_j), \quad (73)$$

$$(\varepsilon/k)_{ij} = [(\varepsilon/k)_i \cdot (\varepsilon/k)_j]^{0.5} \quad (74)$$

Значение параметров потенциала Леннарда-Джонса для чистых компонентов (для воды – параметры потенциала полярных молекул 12 – 6 – 3) $\{\sigma_i\}$ и $\{(\varepsilon/k)_i\}$, используемые при расчете вязкости, приведены в таблице А8, Приложение А.

Расчет значений определителей $\det[g_{ij}]$ и $\det[h_{kl}]$ в (65) осуществляется по алгоритму, приведенному в 4.5.

Безразмерная избыточная составляющая коэффициента динамической вязкости рассчитывается по формуле для избыточной вязкости базового вещества – метана (8):

$$\Delta\mu_{bs} = \sum_{n=1}^{15} c_n \omega_{bs}^{r_n} \tau_{bs}^{-t_n} \quad (75)$$

где ω_{bs} и τ_{bs} – относительные плотность и температура базового вещества;

параметры $\{c_n\}$ и показатели степеней $\{r_n\}, \{t_n\}$ приведены в Таблице А9, Приложение А.

Относительные плотность и температура базового вещества в формуле (75) выражаются через относительные плотность и температуру смеси с помощью аффинных преобразований:

$$\begin{cases} \omega_{bs} = \varphi_{1m} \omega^{\varphi_{2m}} \tau^{\varphi_{3m}} \\ \tau_{bs} = \varphi_{4m} \omega^{\varphi_{5m}} \tau^{\varphi_{6m}} \end{cases} \quad (76)$$

В формулах (76) $\{\varphi_{km}\}$ – параметры аффинных преобразований.

Параметры аффинных преобразований для относительных плотности и температуры смеси в формулах (76) вычисляются по формуле:

$$\varphi_{km} = \delta_k + \sum_{i=1}^N x_i d_{ki} \quad (77)$$

где: $k = 1, \dots, 6$.

В формулах (77) $\delta_k = 1$ или $\delta_k = 0$, а $\{d_{ki}\}$ – подгоночные коэффициенты для i -го компонента смеси. Все коэффициенты $\{d_{kl}\}$ метана равны нулю. Значения $\{d_{ki}\}$ для каждого из других четырнадцати компонентов, при давлениях до 30 МПа. Значения $\{\delta_k\}$ и $\{d_{ki}\}$ приведены в Таблице А10, Приложение А.

4 Алгоритм расчета

Исходные данные для «сухих» смесей (водяной пар отсутствует): молярные доли компонентов газовой смеси $\{x_i\} = i = 1, \dots, N$; абсолютное давление (p) в МПа и температура (T) в К. При выполнении данной формулы, далее расчет проводится согласно 4.3.

При наличии в смеси водяного пара (влажный газ) возможны три варианта задания молярной доли H_2O :

- 1) задание молярной доли H_2O в явном виде;
- 2) задание абсолютной влажности α в г/м³;
- 3) задание относительной влажности φ в долях единицы или процентах;

Для всех вариантов необходим расчет x_p – предельной равновесной молярной доли H_2O – для третьего варианта с целью определения $x_{H_2O} - \varphi x_p$; для первого и второго – с целью проверки выполнения условия $x_{H_2O} \leq x_p$.

4.1 Расчет предельной равновесной молярной доли H_2O

Когда $p \leq p_{sH_2O}(T)$, $x_p = 1$. В случае равенства другому значению ($x_p \neq 1$) необходимо выполнить расчет повторно.

Расчет предельной равновесной молярной доли водяного пара в газовой смеси x_p осуществляется в результате решения формулы (42).

Начальное значение $x_p^{(0)}$ определяется по формуле:

$$x_p^{(0)} = \frac{p_{sH_2O}(T)}{p} \quad (78)$$

Давление водяного пара $\rho_{SH_2O}(T)$ в МПа определяется по следующим формулам:

для линии сублимации (при $T < 273.16$ К) (4)

$$\rho_{SH_2O} = 10^{-6} \cdot \exp \left[\sum_{j=1}^5 c_j T^{j-2} + c_6 \ln(T) \right] \quad (79)$$

для линии насыщения (при $T \geq 273.16$ К) (16)

$$\rho_{SH_2O} = 22.064 \cdot \exp \left[\frac{1}{\tau} \sum_{j=1}^6 b_j \theta^{0.5r_j} \right] \quad (80)$$

где $\tau = T/647.096$, $\theta = 1 - \tau$; коэффициенты $\{c_j\}$ и $\{b_j\}$, также показатели степеней $\{r_j\}$ приведены в Таблице А12, Приложение А.

Значение x_p определяется по методу Ньютона в следующем итерационном процессе:

1) x_p k-м итерационном шаге (начиная с $k = 1$) определяется из формул:

$$\Delta x_p^{(k)} = -F_\mu(x_p^{(k-1)}) / \left(\frac{\partial F_\mu}{\partial x_p} \right)^{(k-1)} \quad (81)$$

$$\left(\frac{\partial F_\mu}{\partial x_p} \right)^{(k-1)} = \frac{F_\mu(1.01x_p^{(k-1)}) - F_\mu(0.99x_p^{(k-1)})}{0.02x_p^{(k-1)}} \quad (82)$$

$$x_p^{(k)} = x_p^{(k-1)} + \Delta x_p^{(k)} \quad (83)$$

где функции F_μ рассчитываются по формуле (42) при соответствующем x_p ; при этом молярные доли всех других компонентов определяются в соответствии с формулой (41), плотность рассчитывают по формуле (29 - 33);

2) критерий завершения итерационного процесса:

$$\left| \Delta x_p^{(k)} / x_p^{(k)} \right| \leq 10^{-6}, \quad (84)$$

СТ РК

(проект, первая редакция)

если критерий (84) выполняется, то расчет закончен; в противном случае необходимо продолжить итерационный процесс, начиная с 4.1.

4.2 Расчет молярной доли H_2O во влажном газе

4.2.1 Задание молярной доли H_2O в явном виде

Исходные данные: молярные доли всех компонентов влажного газа $\{x_{iw}\}$, $i = 1 \dots N$; включая x_{H_2O} , абсолютное давление (p) в МПа и температура (T) в К.

1) Осуществляется расчет массива молярных долей «сухих» компонентов по формуле:

$$x_{id} = x_{iw} / (1 - x_{H_2O}), i = 1, \dots, N - 1; \quad (85)$$

принимается $x_{H_2O} = 0$.

2) осуществляется расчет предельной равновесной молярной доли x_p по 4.1 для найденного в 1) массива $\{x_{id}\}$;

3) Проводится сравнение значений исходного значения x_{H_2O} и x_p :

Если $x_{H_2O} \leq x_p$, первоначально заданные $\{x_{iw}\}$ остаются без изменений и осуществляется переход к расчету свойств;

Если $x_{H_2O} > x_p$, принимается $x_{H_2O} = x_p$ и осуществляется пересчет концентраций $\{x_{iw}\}$ по формуле:

$$x_{iw} = x_{id} \cdot (1 - x_{H_2O}), i = 1, \dots, N - 1 \quad (86)$$

4.2.2 Задание абсолютной влажности

Исходные данные: молярной доли «сухих» компонентов влажного газа $\{x_{id}\}$, $i = 1, N - 1$; ($x_{H_2O} = 0$), абсолютная влажность α в г/м³, абсолютное давление (p) в МПа и температура (T) в К.

1) Молярная доля водяного пара определяется из следующей формулы:

$$x_{H_2O} = \alpha / [10^3 \cdot M_{H_2O} \cdot \tilde{\rho}(T, p, \{x_{iw}\})] \quad (87)$$

где $\tilde{\rho}$ – молярная плотность влажного газа при заданных T и p в кмоль/м³.

Значения элементов $\{x_{iw}\}$ вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} x_{iw} &= x_{id} \cdot (1 - x_{H_2O}), i = 1, \dots, N - 1 \\ x_N &= x_{H_2O} \end{aligned} \quad (88)$$

Плотность $\tilde{\rho} = \omega \tilde{\rho}_{cm}$ в формуле (87) сама является функцией $\{x_{iw}\}$, значение x_{H_2O} (также и других элементов $\{x_{iw}\}$) определяется в итерационном процессе.

Начальное значение молярной доли водяного пара $x_{H_2O}^{(0)}$ определяется по формуле:

$$x_{H_2O}^{(0)} = 10^{-6} \alpha RT / [M_{H_2O} p], \quad (89)$$

Значение x_{H_2O} (также и других элементов $\{x_{iw}\}$) определяются в следующем итерационном процессе:

1.1 Δx_{H_2O} на k -ом итерационном шаге определяется из формулы:

$$\Delta x_{H_2O}^{(k)} = x_{H_2O}^{(k)} - x_{H_2O}^{(k-1)} \quad (90)$$

где $x_{H_2O}^{(k)}$ начиная с $k = 1$ и $x_{H_2O}^{(k-1)}$ начиная $k = 2$ рассчитывается по (87); при этом значения плотности определяются в результате решения формулы (29). Значения $\{x_{iw}^{(k)}\}$ и $\{x_{iw}^{(k-1)}\}$ начиная с $k = 1$ рассчитываются по (88);

1.2 критерий завершения итерационного процесса

$$|\Delta x_{H_2O}^{(k)} / x_{H_2O}^{(k)}| \leq 10^{-6} \quad (91)$$

если критерий (91) не выполняется, то необходимо продолжить итерационный процесс, начиная с пункта 1) 4.2.2; в противном случае итерационный процесс расчета массива молярных долей компонентов $\{x_{iw}\}$ считается законченным.

2) осуществляется расчет предельной равновесной молярной доли x_p по 4.1 для заданного массива $\{x_{id}\}$;

3) Проводится сравнение значений x_{H_2O} найденного в 1) и x_p :

Если $x_{H_2O} \leq x_p$, найденные в 1) $\{x_{iw}\}$; остаются без изменений и осуществляется переход к расчету свойств;

Если $x_{H_2O} > x_p$, принимается $x_{H_2O} = x_p$ и осуществляется пересчет $\{x_{iw}\}$ по формуле (88).

4.2.3 Задание относительной влажности

Исходные данные: молярные доли сухих компонентов влажного газа $\{x_{id}\}$, $i = 1, N - 1$; ($x_{H_2O} = 0$), относительная влажность φ в долях единицы или процентах, абсолютное давление (p) в МПа и температура (T) в К.

1) Осуществляется расчет предельной равновесной молярной доли x_p по 4.1 для заданного массива $\{x_{id}\}$;

2) Молярная доля водяного пара определяется по одному из следующих формул:

$$x_{H_2O} = \varphi \cdot x_p(T, P, \{x_{id}\}), 0 < \varphi \leq 1 \quad (92)$$

$$x_{H_2O} = 0,01 \cdot \varphi \cdot x_p(T, P, \{x_{id}\}), 0 < \varphi \leq 100\% \quad (93)$$

3) Осуществляется расчет молярных долей $\{x_{iw}\}$ по формуле:

$$x_{iw} = x_{id} \cdot (1 - x_{H_2O}), i = 1, \dots, N - 1, \quad (94)$$

4.3 Расчет характерных параметров смеси

Расчет псевдокритических плотности $\tilde{\rho}_{cm}$ и температуры смеси T_{cm} осуществляется по формулам (8 – 12). Расчет фактора Питцера Ω_m и молярной массы M смеси осуществляется по формулам (32) и (34), соответственно; псевдокритические фактор сжимаемости и давление рассчитываются по формулам (30, 31).

4.4 Расчет плотности по ФУС (1 – 7)

Расчет относительной плотности ω осуществляется в результате решения формулы (29).

Начальное значение относительной плотности $\omega^{(0)}$ выбирается в зависимости от заданных значений τ и π следующим образом:

при $\tau < 1$:

$$\omega^{(0)} = \pi z_{cm} / \tau \quad (95)$$

при $\tau \geq 1$:

$$\omega^{(0)} = \begin{cases} \pi z_{cm} / \tau, & \pi < 1,0 \\ \frac{9\pi z_{cm}}{\tau(1,1\pi+0,7)}, & \pi \geq 1,0 \end{cases} \quad (96)$$

Относительная плотность ω определяется по методу Ньютона в следующем итерационном процессе:

1) ω на k -м итерационном шаге определяются из формул

$$\Delta\omega^{(k)} = \left[\pi z_{cm} / \tau - \left(1 + A_0^{(k-1)} \right) \omega^{(k-1)} \right] / \left(1 + A_1^{(k-1)} \right) \quad (97)$$

$$\omega^{(k)} = \omega^{(k-1)} + \Delta\omega^{(k)}$$

где комплексы $A_0^{(k-1)}$ и $A_1^{(k-1)}$ рассчитываются по формулам (13, 14, 22) и (13, 15, 23) при плотности на итерационном шаге $(k-1)$, т.е. при $\omega^{(k-1)}$;

2) критерий завершения итерационного процесса

$$|\Delta\omega^{(k)}/\omega^{(k)}| \leq 10^{-6} \quad (98)$$

если критерий (98) не выполняется, то необходимо продолжить итерационный процесс, начиная с 4.4, в обратном случае перейти к пункту 3) настоящего подраздела;

3) вычисляется плотность ρ в кг/м³ по формуле (33) при $\omega = \omega^{(k)}$.

4.5 Расчет фактора сжимаемости, скорости звука и показателя адиабаты

Расчет фактора сжимаемости, скорости звука и показателя адиабаты осуществляется по формуле (35 – 37) при заданных τ и $\{x_i\}$ и найденному в 4.4 значению $\omega = \omega^{(k)}$.

4.6 Расчет коэффициента динамической вязкости

Расчет коэффициента динамической вязкости осуществляется по формулам 3.6 при заданной T и найденному в 4.4 значению плотности ρ .

Расчет значений определений $\det[g_{ij}]$ и $\det[h_{kl}]$ в (65) осуществляется по следующему алгоритму (ниже для общности рассматривается определитель n – го порядка $\Delta_n = \det[a_{ij}]$, $i, j = 1, n$):

$$\Delta_n = a_{11}a_{22}^{(1)} \dots a_{(k+1)(k+1)}^{(k)} \dots a_{nn}^{(n-1)} \quad (99)$$

В проведении (99) диагональные элементы определителей $(n - k)$ -го порядка рассчитывают с помощью рекуррентного соотношения от $k = 1$ до $k = n - 1$:

$$a_{ij}^{(k)} = a_{ij}^{(k-1)} - \frac{a_{ik}^{(k-1)}a_{kj}^{(k-1)}}{a_{kk}^{(k-1)}}, (i, j = k + 1, \dots n) \quad (100)$$

В качестве элементов $a_{ij}^{(0)}$ (при $k = 1$) используются элементы исходного определителя $[a_{ij}]$.

5 Пределы применимости настоящего стандарта, сравнение с экспериментальными данными и неопределенности расчетных значений теплофизических свойств

Настоящий стандарт организации применяется для расчета теплофизических свойств «сухих» и влажных многокомпонентных газовых смесей в газовой и флюидной областях в следующих диапазонах параметров:

По давлению ρ , МПа ≤ 30 (для влажного газа при $T < 295$ К ρ_{max} определяется по формулам (61) или (62));

По температуре $263 \leq T, K \leq 500$ или $-10, 15 \leq t, ^\circ C \leq +226.85$;

По компонентному составу явных ограничений нет, кроме молярной доли водяного пара: $x_{H_2O} < x_p(T, \rho, \{x_{id}\}) - 3.5, 4.1$ и 4.2 .

Для проверки качества ФУС (1 – 7) и формулы для расчета вязкости (63) и оценки неопределенностей расчетных значений теплофизических свойств были проведены сравнения с экспериментальными данными по фактору сжимаемости и плотности сухого и влажного природного газа (17, 18), а также с аналогичными данными для газовых смесей с компонентными составами, характерными для нефтяного попутного газа. Кроме того, проведены сравнения с экспериментальными данными по скорости звука (21, 22) и вязкости (23-27) газовых смесей.

Среднее квадратичное отклонение по фактору сжимаемости (плотности) сухого природного газа составляет 0,04 % в диапазоне температур $225 \leq T \leq 350$ К и давлений $0,1 \leq \rho \leq 35$ МПа (312 точек); среднее квадратичное отклонение по плотности газа составляет 0,12 % в диапазоне температур $348 \leq T \leq 473$ К и давлений $0,1 \leq \rho \leq 16$ МПа (266 точек); среднее квадратическое отклонение по фактору сжимаемости и плотности газовых смесей составляет 0,15 % в диапазоне температур $280 \leq T \leq 350$ К и давлений $0,1 \leq \rho \leq 30$ МПа (3257 точек).

Среднее квадратическое отклонение по скорости звука составляет 0,11 % в диапазоне температур $250 \leq T \leq 350$ К и давлений $0,1 \leq \rho \leq 23$ МПа (1322 точек).

Среднее квадратическое отклонение по коэффициенту динамической вязкости составляет 2,2 % в диапазоне температур $260 \leq T \leq 444$ К и давлений $0,1 \leq \rho \leq 30$ МПа (745 точек).

В результате анализа полученных результатов и с учетом данных, приведенных в (2), можно дать следующие оценки расширенных неопределенностей (с доверительной вероятностью 95 %) расчетных значений теплофизических свойств:

Для газовых смесей типа природного газа, т.е. со значениями молярных долей компонентов, соответствующих ограничениям, приведенным:

по плотности и фактору сжимаемости $\delta\rho, \delta z \leq 0,1\%$;

по скорости звука $\delta\omega \leq 0,2 \%$ при $\rho \leq 20$ МПа и $\delta w \leq 0,3 \%$ при $\rho > 20$ МПа;

по показателю адиабаты: $\delta k \leq 0,5 \%$ при $\rho \leq 20$ МПа и $\delta k \leq 0,7 \%$ при $\rho > 20$ МПа;

по коэффициенту динамической вязкости $-\delta\mu \leq 4,0 \%$.

для газовых смесей, отличных по составу от природного газа, включая любые влажные смеси:

по плотности и фактору сжимаемости: $\delta\rho, \delta z \leq 0,3 \%$; при $T > 350$ К и $\rho > 15$ МПа $\delta\rho, \delta z \leq 0,5 \%$;

по скорости звука: $\delta w \leq 0,6 \%$; при $T > 350$ К и $\rho > 15$ МПа $\delta w \leq 1,0 \%$;

по показателю адиабаты: $\delta k \leq 1,5 \%$; при $T > 350$ К и $\rho > 15$ МПа $\delta k \leq 2,5 \%$;

по коэффициенту динамической вязкости - $\delta\mu \leq 5,0 \%$.

В приложении А даны контрольные примеры расчета теплофизических свойств сухих и влажных газовых смесей.

Приложение А

(Обязательное)

Таблица А1. Значения коэффициентов, показателей степеней и параметров $\{b_{ik}\}, \{r_{ik}\}, \{t_{ik}\}, \{g_{ik}\}, \{l_{ik}\}$ формул (2, 3) и (12 – 18) для компонентов газовых смесей.

k	b_{ik}	t_{ik}	r_{ik}	l_{ik}	g_{ik}
Метан (CH ₄); $M_i = 24$					
1	0.57335704239162	0.125	1	0	0
2	-0.16760687523730d1	1.125	1	0	0
3	0.23405291834916	0.375	2	0	0
4	-0.21947376343441	1.125	2	0	0
5	0.16369201404128d-1	0.625	4	0	0
6	0.15004406389280d-1	1.5	4	0	0
7	0.98990489492918d-1	0.625	1	1	-1
8	0.58382770929055	2.625	1	1	-1
9	-0.74786867560390	2.75	1	1	-1
10	0.30033302857974	2.125	2	1	-1
11	0.20985543806568	2.0	3	1	-1
12	-0.18590151133061d-1	1.75	6	1	-1
13	-0.15782558339049	4.50	2	2	-1
14	0.12716735220791	4.75	3	2	-1
15	-0.32019743894346d-1	5.00	3	2	-1
16	-0.68049729364536d-1	4.00	4	2	-1
17	0.24291412853736d-1	4.50	4	2	-1
18	0.51440451639444d-2	7.50	2	3	-1
19	-0.19084949733532d-1	14.0	3	3	-1
20	0.55229677241291d-2	11.5	4	3	-1
21	-0.44197392976085d-2	26.0	5	6	-1
22	0.40061416708429d-1	28.0	6	6	-1
23	-0.33752085907575d-1	30.0	6	6	-1
24	-0.25127658213357d-2	16.0	7	6	-1
Азот (N ₂); $M_i, \dots, 24$					
1	0.59889711801201	0.125	1	0	0
2	-0.16941557480731d1	1.125	1	0	0
3	0.24579736191718	0.375	2	0	0
4	-0.23722456755175	1.125	2	0	0
5	0.17954918715141d-1	0.625	4	0	0
6	0.14592875720215d-1	1.5	4	0	0
7	0.10008065936206	0.625	1	1	-1
8	0.73157115385532	2.625	1	1	-1
9	-0.88372272336366	2.75	1	1	-1
10	0.31887660246708	2.125	2	1	-1

Продолжение таблицы А.1

k	b_{ik}	t_{ik}	r_{ik}	l_{ik}	g_{ik}
11	0.20766491728799	2.0	3	1	-1
12	-0.19379315454158d-1	1.75	6	1	-1
13	-0.16936641554983	4.50	2	2	-1
14	0.13546846041701	4.75	3	2	-1
15	-0.33066712095307d-1	5.0	3	2	-1
16	-0.60690817018557d-1	4.0	4	2	-1
17	0.12797548292871d-1	4.5	4	2	-1
18	0.58743664107299d-2	7.5	2	3	-1
19	-0.18451951971969d-1	14.0	3	3	-1
20	0.47226622042472d-2	11.5	4	3	-1
21	-0.52024079680599d-2	26.0	5	6	-1
22	0.43563505956635d-1	28.0	6	6	-1
23	-0.36251690750939d-1	30.0	6	6	-1
24	-0.28974026866543d-2	16.0	7	6	-1
Диоксид углерода CO_2 ; $M_i = 22$					
1	0.52646564804653	0.00	1	0	0
2	-0.14995725042592d1	1.25	1	0	0
3	0.27329786733782	1.625	2	0	0
4	0.12949500022786	0.375	3	0	0
5	0.15404088341841	0.375	3	1	-1
6	-0.58186950946814	1.375	3	1	-1
7	-0.18022494838296	1.125	4	1	-1
8	-0.95389904072812d-1	1.375	5	1	-1
9	-0.80486819317679d-2	0.125	6	1	-1
10	-0.35547751273090d-1	1.625	6	1	-1
11	-0.28079014882405	3.75	1	2	-1
12	-0.82435890081677d-1	3.5	4	2	-1
13	0.10832427979006d-1	7.5	1	3	-1
14	-0.67073993161097d-2	8.0	1	3	-1
15	-0.46827907600524d-2	6.0	3	3	-1
16	-0.28359911832177d-1	16.0	3	3	-1
17	0.19500174744098d-1	11.0	4	3	-1
18	-0.21609137507166	24.0	5	5	-1
19	0.43772794926972	26.0	5	5	-1
20	-0.22130790113593	28.0	5	5	-1
21	0.15190189957331d-1	24.0	5	6	-1
22	-0.15380948953300d-1	26.0	5	6	-1
Этан (C_2H_6); $M_i = 24$					
1	0.63596780450714	0.125	1	0	0
2	-0.17377981785459d1	1.125	1	0	0
3	0.28914060926272	0.375	2	0	0
4	-0.33714276845694	1.125	2	0	0
5	0.22405964699561d-1	0.625	4	0	0
6	0.15715424886913d-1	1.5	4	0	0
7	0.11450634253745	0.625	1	1	-1

Продолжение таблицы А1

СТ РК

(проект, первая редакция)

k	b_{ik}	t_{ik}	r_{ik}	l_{ik}	g_{ik}
8	0.10612049379745d1	2.625	1	1	-1
9	-0.12855224439423d1	2.75	1	1	-1
10	0.39414630777652	2.125	2	1	-1
11	0.31390924682041	2.0	3	1	-1
12	-0.21592277117247d-1	1.75	6	1	-1
13	-0.21723666564905	4.5	2	2	-1
14	-0.28999574439489	4.75	3	2	-1
15	0.42321173025732	5.0	3	2	-1
16	0.46434100259260d-1	4.0	4	2	-1
17	-0.13138398329741	4.5	4	2	-1
18	0.11492850364368d-1	7.5	2	3	-1
19	-0.33387688429909d-1	14.0	3	3	-1
20	0.15183171583644d-1	11.5	4	3	-1
21	-0.47610805647657d-2	26.0	5	6	-1
22	0.46917166277885d-1	28.0	6	6	-1
23	-0.39401755804649d-1	30.0	6	6	-1
24	-0.32569956247611d-2	16.0	7	6	-1
Пропан (C_3H_8); $M_i = 12$					
1	0.10403973107358d1	0.250	1	0	0
2	-0.28318404081403d1	1.125	1	0	0
3	0.84393809606294	1.500	1	0	0
4	-0.76559591850023d-1	1.375	2	0	0
5	0.94697373057280d-1	0.250	3	0	0
6	0.24796475497006d-3	0.875	7	0	0
7	0.27743760422870	0.625	2	1	-1
8	-0.43846000648377d-1	1.750	5	1	-1
9	-0.26991064784350	3.625	1	2	-1
10	-0.69313413089860d-1	3.625	4	2	-1
11	-0.29632145981653d-1	14.5	3	3	-1
12	0.14040126751380d-1	12.0	4	3	-1
н-Бутан (nC_4H_{10}); $M_i = 12$					
1	0.10626277411455d1	0.250	1	0	0
2	-0.28620951828350d1	1.125	1	0	0
3	0.88738233403777	1.500	1	0	0
4	-0.12570581155345	1.375	2	0	0
5	0.10286308708106	0.250	3	0	0
6	0.25358040602654d-3	0.875	7	0	0
7	0.32325200233982	0.625	2	1	-1
8	-0.37950761057432d-1	1.750	5	1	-1
9	-0.32534802014452	3.625	1	2	-1
10	-0.79050969051011d-1	3.625	4	2	-1
11	-0.20636720547775d-1	14.5	3	3	-1
12	0.57053809334750d-2	12.0	4	3	-1
и-Бутан (iC_4H_{10}); $M_i = 12$					
1	0.10429331589100d1	0.250	1	0	0
2	-0.28184272548892d1	1.125	1	0	0

Продолжение таблицы А1

k	b_{ik}	t_{ik}	r_{ik}	l_{ik}	g_{ik}
3	0.86176232397850	1.500	1	0	0
4	-0.10613619452487	1.375	2	0	0
5	0.98615749302134d-1	0.250	3	0	0
6	0.23948208682322d-3	0.875	7	0	0
7	0.30330004856950	0.625	2	1	-1
8	-0.41598156135099d-1	1.750	5	1	-1
9	-0.29991937470058	3.625	1	2	-1
10	-0.80369342764109d-1	3.625	4	2	-1
11	-0.29761373251151d-1	14.5	3	3	-1
12	0.130596303140d-1	12.0	4	3	-1
н-Пентан (nC_5H_{12}); $M_i = 12$					
1	0.10968643098001d1	0.250	1	0	0
2	-0.29988888298061d1	1.125	1	0	0
3	0.99516886799212	1.500	1	0	0
4	-0.16170708558539	1.375	2	0	0
5	0.11334460072775	0.250	3	0	0
6	0.26760595150748d-3	0.875	7	0	0
7	0.40979881986931	0.625	2	1	-1
8	-0.40876423083075d-1	1.750	5	1	-1
9	-0.38169482469447	3.625	1	2	-1
10	-0.10931956843993	3.625	4	2	-1
11	0.32073223327990d-1	14.5	3	3	-1
12	0.16877016216975d-1	12.0	4	3	-1
и-Пентан (iC_5H_{12}); $M_i = 12$					
1	1.0963	0.25	1	0	0
2	-3.0402	1.125	1	0	0
3	1.0317	1.5	1	0	0
4	-0.15410	1.375	2	0	0
5	0.11535	0.25	3	0	0
6	0.00029809	0.875	7	0	0
7	0.39571	0.625	2	1	-1
8	-0.045881	1.75	5	1	-1
9	-0.35804	3.625	1	2	-1
10	-0.10107	3.625	4	2	-1
11	-0.035484	14.5	3	3	-1
12	0.018156	12.0	4	3	-1
Гексан (C_6H_{12}); $M_i = 12$					
1	0.10553238013661d1	0.250	1	0	0
2	-0.26120615890629d1	1.125	1	0	0
3	0.76613882967260	1.500	1	0	0
4	-0.29770320622459	1.375	2	0	0
5	0.11879907733358	0.250	3	0	0
6	0.27922861062617d-3	0.875	7	0	0
7	0.46347589844105	0.625	2	1	-1
8	0.11433196980297d-1	1.750	5	1	-1

Продолжение таблицы А1

СТ РК

(проект, первая редакция)

k	b_{ik}	t_{ik}	r_{ik}	l_{ik}	g_{ik}
9	-0.48256968738131	3.625	1	2	-1
10	-0.93750558924659d-1	3.625	4	2	-1
11	-0.67273247155994d-2	14.5	3	3	-1
12	-0.51141583585428d-2	12.0	4	3	-1
Гептан (C_7H_{16}); $M_i = 12$					
1	0.10543747645262d1	0.250	1	0	0
2	-0.26500681506144d1	1.125	1	0	0
3	0.81730047827543	1.500	1	0	0
4	-0.30451391253428	1.375	2	0	0
5	0.12253868710800	0.250	3	0	-1
6	0.27266472743928d-3	0.875	7	0	-1
7	0.49865825681670	0.625	2	1	-1
8	-0.71432815084176-3	1.750	5	1	-1
9	-0.54236895525450	3.625	1	2	-1
10	-0.138018211610756	3.625	4	2	-1
11	-0.61595287380011d-2	14.5	3	3	-1
12	0.48602510393022d-3	12.0	4	3	-1
Октан (C_8H_{18}); $M_i = 12$					
1	0.10722544875633d1	0.250	1	0	0
2	-0.24632951172003d1	1.125	1	0	0
3	0.65386674054928	1.500	1	0	0
4	-0.36324974085628	1.375	2	0	0
5	0.12713269626764	0.250	3	0	0
6	0.30713572777930d-3	0.875	7	0	0
7	0.52656856987540	0.625	2	1	-1
8	0.19362862857653d-1	1.750	5	1	-1
9	-0.58939426849155	3.625	1	2	-1
10	-0.14069963991934	3.625	4	2	-1
11	-0.78966330500036d-2	14.5	3	3	-1
12	0.33036597968109d-2	12.0	4	3	-1
Вода (H_2O); $M_i = 16$					
1	0.82728408749586	0.5	1	0	0
2	-0.18602220416584d1	1.25	1	0	0
3	0.11199009613744d1	1.875	1	0	0
4	0.15635753976056	0.125	2	0	0
5	0.87375844859025	1.5	2	0	0
6	-0.36674403715731	1.0	3	0	0
7	0.53987893432436d-1	0.75	4	0	0
8	0.10957690214499d1	1.5	1	1	-1
9	0.53213037828563d-1	0.625	5	1	-1
10	0.13050533930825d-1	2.625	5	1	-1
11	-0.41079520434476	5.0	1	2	-1
12	0.14637443344120	4.0	2	2	-1
13	-0.55726838623719d-1	4.5	4	2	-1
14	-0.11201774143800d-1	3.0	4	3	-1

Продолжение таблицы А1

15	-0.66062758068099d-2	4.0	1	5	-1
16	0.46918522004538d-2	6.0	1	5	-1
Сероводород (H ₂ S); $M_i = 12$					
1	0.87641	0.25	1	0	0
2	-2.0367	1.125	1	0	0
3	0.21634	1.5	1	0	0
4	-0.050199	1.375	2	0	0
5	0.066994	0.25	3	0	0
6	0.00019076	0.875	7	0	0
7	0.20227	0.625	2	1	-1
8	-0.0045348	1.75	5	1	-1
9	0.22230	3.625	1	2	-1
10	-0.034714	3.625	4	2	-1
11	-0.014885	14.5	3	3	-1
12	0.0074154	12.0	4	3	-1
Кислород (O ₂); $M_i = 12$					
1	0,88878286369701	0.250	1	0	0
2	-0.24879433312148d1	1.125	1	0	0
3	0.59750190775886	1.500	1	0	0
4	0.96501817061881d-2	1.375	2	0	0
5	0.71970428712770d-1	0.250	3	0	0
6	0.22337443000195d-3	0.875	7	0	0
7	0.18558686391474	0.625	2	1	-1
8	-0.38129368035760d-1	1.750	5	1	-1
9	-0.15352245383006	3.625	1	2	-1
10	-0.26726814910919d-1	3.625	4	2	-1
11	-0.25675298677127d-1	14.5	3	3	-1
12	0.95714302123668d-2	12.0	4	3	-1

Таблица А.2. Значения коэффициентов, показателей степеней параметров $\{c_{ijk}\}$, $\{r_{ijk}\}$, $\{t_{ijk}\}$, $\{\alpha_{ijk}\}$, $\{\beta_{ijk}\}$, $\{\varepsilon_{ijk}\}$, $\{\gamma_{ijk}\}$ формул (4, 5) и (19 – 25) для бинарных смесей

k	c_{ijk}	t_{ijk}	r_{ijk}	α_{ijk}	ε_{ijk}	β_{ijk}	γ_{ijk}
Метан – Азот (CH ₄ – N ₂); $M_{ij} = 9$							
1	0.98038985517335d-2	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.42487270143005d-3	1.85	4.0	1.0	0.5	1.0	0.5
3	0.34800214576142d-1	1.85	1.0	1.0	0.5	1.0	0.5
4	-0.13333813013896	5.4	2.0	0.25	0.5	2.5	0.5
5	-0.11993694974627d-1	0.0	2.0	0.0	0.5	3.0	0.5
6	0.69243379775168d-1	0.75	2.0	0.0	0.5	3.0	0.5
7	-0.31022508148249	2.8	2.0	0.0	0.5	3.0	0.5
8	0.24495491753226	4.45	2.0	0.0	0.5	3.0	0.5
9	0.22969816716981	4.25	3.0	0.0	0.5	3.0	0.5
Метан – Диоксид углерода (CH ₄ – CO ₂); $M_{ij} = 6$							

СТ РК

(проект, первая редакция)

1	-0.10859387354942	2.6	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
---	-------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Продолжение таблицы А.2

k	c_{ijk}	t_{ijk}	r_{ijk}	α_{ijk}	ε_{ijk}	β_{ijk}	γ_{ijk}
2	0.80228576727389d-1	1.95	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	-0.93303985115717d-2	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.40989274005848d-1	3.95	1.0	1.0	0.5	1.0	0.5
5	-0.24338019772494	7.95	2.0	0.5	0.5	2.0	0.5
6	0.23855347281124	8.0	3.0	0.0	0.5	3.0	0.5

Метан – Этан ($\text{CH}_4 - \text{C}_2\text{H}_6$); $M_{ij} = 12$

1	-0.80926050298746d-3	0.65	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	-0.75381925080059d-3	1.55	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	-0.41618768891219d-1	3.1	1.0	1.0	0.5	1.0	0.5
4	-0.23452173681569	5.9	2.0	1.0	0.5	1.0	0.5
5	0.14003840584586	7.05	2.0	1.0	0.5	1.0	0.5
6	0.63281744807738d-1	3.35	2.0	0.875	0.5	1.25	0.5
7	-0.34660425848809d-1	1.2	2.0	0.75	0.5	1.5	0.5
8	0.23918747334251	5.8	2.0	0.5	0.5	2.0	0.5
9	0.19855255066891d-2	2.7	2.0	0.0	0.5	3.0	0.5
10	0.61777746171555d1	0.45	3.0	0.0	0.5	3.0	0.5
11	-0.69575358271105d1	0.55	3.0	0.0	0.5	3.0	0.5
12	0.10630185306388d1	1.95	3.0	0.0	0.5	3.0	0.5

Метан – Пропан ($\text{CH}_4 - \text{C}_3\text{H}_8$); $M_{ij} = 9$

1	0.13746429958576d-1	1.85	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	-0.74425012129552d-2	3.95	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	-0.45516600213685d-2	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	-0.54546603350237d-2	1.85	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.23682016824471d-2	3.85	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.18007763721438	5.25	1.0	0.25	0.5	0.75	0.5
7	-0.44773942932486	3.85	1.0	0.25	0.5	1.0	0.5
8	0.19327374888200d-1	0.2	1.0	0.0	0.5	2.0	0.5
9	-0.30632197804624	6.5	2.0	0.0	0.5	3.0	0.5

Азот – Диоксид углерода ($\text{N}_2 - \text{CO}_2$); $M_{ij} = 6$

1	0.28661625028399	1.85	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	-0.10919833861247	1.4	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	-0.11374032082270d1	3.2	1.0	0.25	0.5	0.75	0.5
4	0.76580544237358	2.5	1.0	0.25	0.5	1.0	0.5
5	0.42638000926819d-2	8.0	1.0	0.0	0.5	2.0	0.5
6	0.17673538204534	3.75	2.0	0.0	0.5	3.0	0.5

Азот – Этан ($\text{N}_2 - \text{C}_2\text{H}_6$); $M_{ij} = 6$

1	-0.47376518126608	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.48961193461001	0.05	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	-0.57011062090535d-2	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	-0.19966820041320	3.65	1.0	1.0	0.5	1.0	0.5
5	-0.69411103101723	4.9	2.0	1.0	0.5	1.0	0.5
6	0.69226192739021	4.45	2.0	0.875	0.5	1.25	0.5

Метан – н-Бутан ($\text{CH}_4 - \text{nC}_4\text{H}_{10}$); Метан – и-Бутан ($\text{CH}_4 - \text{iC}_4\text{H}_{10}$);
Этан – Пропан ($\text{C}_2\text{H}_6 - \text{C}_3\text{H}_8$); Этан – н-Бутан ($\text{C}_2\text{H}_6 - \text{nC}_4\text{H}_{10}$);
Этан – и-Бутан ($\text{C}_2\text{H}_6 - \text{iC}_4\text{H}_{10}$); Пропан – н-Бутан ($\text{C}_3\text{H}_8 - \text{nC}_4\text{H}_{10}$);

Пропан – и-Бутан (C_3H_8 – iC_4H_{10}) ; н-Бутан – и-Бутан (nC_4H_{10} – iC_4H_{10}); $M_{ij} = 10$

Продолжение таблицы А.2

k	c_{ijk}	t_{ijk}	r_{ijk}	α_{ijk}	ε_{ijk}	β_{ijk}	γ_{ijk}
1	0.25574776844118d1	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	-0.79846357136353d1	1.55	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.47859131465806d1	1.7	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.73265392369587	0.25	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.13805471345312d1	1.35	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.28349603476365	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	-0.49087385940425	1.25	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	-0.10291888921447	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.1183631481968	0.7	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.55527385721943d-4	5.4	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Таблица А3. Значения параметров $\Psi_{ijc} \neq 0$ для бинарных смесей в формулах (1, 11)

Смесь компонентов $i - j$	Ψ_{ij}
Метан – Азот ($CH_4 - N_2$)	1.0
Метан - Диоксид углерода ($CH_4 - CO_2$)	1.0
Метан – Этан ($CH_4 - C_2H_6$)	1.0
Метан - Пропан ($CH_4 - C_3H_8$)	1.0
Метан - н-Бутан ($CH_4 - nC_4H_{10}$)	1.0
Метан - и-Бутан ($CH_4 - iC_4H_{10}$)	0.771035405688
Азот — Диоксид углерода ($N_2 - CO_2$)	1.0
Азот — Этан ($N_2 - C_2H_6$)	1.0
Этан – Пропан ($C_2H_6 - C_3H_8$)	0.130424765150
Этан - н-Бутан ($C_2H_6 - nC_4H_{10}$)	0.281570073085
Этан - и-Бутан ($C_2H_6 - iC_4H_{10}$)	0.26063237698
Пропан - н-Бутан ($C_3H_8 - nC_4H_{10}$)	0.312572600489d-01
Пропан - и-Бутан ($C_3H_8 - iC_4H_{10}$)	-0.551609771024d-01
н-Бутан - и-Бутан ($C_3H_8 - iC_4H_{10}$)	-0.551240293009d-01
Для всех других бинарных смесей параметры $\Psi_{ij} = 0$.	

Таблица А4. Значения характерных параметров для компонентов газовых смесей

Компонент	Ω	$\tilde{\rho}$, кмоль/м ³	T_c , К	M , кг/кмоль
Метан (CH_4)	0.064294	10.139342719	190.564	16.04246
Азот (N_2)	0.013592	11.1839	126.192	28.0134
Диоксид углерода (CO_2)	0.20625	10.624978698	304.1282	44.0095
Этан (C_2H_6)	0.10958	6.870854540	305.322	30.06904
Пропан (C_3H_8)	0.18426	5.000043088	369.825	44.09562
н-Бутан (nC_4H_{10})	0.21340	3.920016792	425.125	58.1222
и-Бутан (iC_4H_{10})	0.16157	3.860142940	407.817	58.1222

СТ РК

(проект, первая редакция)

n-Пентан (nC ₅ H ₁₂)	0.29556	3.215577588	469.700	72.14878
i-Пентан (iC ₅ H ₁₂)	0.26196	3.271	460.350	72.14878

Продолжение таблицы А4

Компонент	Ω	$\tilde{\rho}$, кмоль/м ³	T_c , К	M , кг/кмоль
Гексан (nC ₆ H ₁₄)	0.29965	2.705877875	507.820	86.17536
Гептан (nC ₇ H ₁₆)	0.39405	2.315324434	540.130	100.20194
Октан (nC ₈ H ₁₈)	0.42947	2.056404127	569.320	114.22852
Водяной пар (H ₂ O)	0.76949	17.873716090	647.096	18.01528
Сероводород (H ₂ S)	0.064338	10.19	373.1	34.08088
Кислород (O ₂)	0.039513	13.63	154.595	31.9988

Таблица А5. Значения параметров бинарного взаимодействия для компонентов газовых смесей (для правил комбинирования (9) и (11))

Компоненты (i - j)	β_{tij}	γ_{tij}	β_{vij}	γ_{vij}
CH ₄ – N ₂	0.99809883	0.979273013	0.998721377	1.013950311
CH ₄ – CO ₂	1.02262449	0.975665369	0.999518072	1.002806594
CH ₄ – C ₂ H ₆	0.996336508	1.049707697	0.997547866	1.006617867
CH ₄ – C ₃ H ₈	0.989680305	1.098655531	1.00482707	1.038470657
CH ₄ – nC ₄ H ₁₀	0.99417491	1.171607691	0.979105972	1.045375122
CH ₄ – iC ₄ H ₁₀	0.980315756	1.161117729	1.011240388	1.054319053
CH ₄ – nC ₅ H ₁₂	0.992127525	1.249173968	0.94833012	1.124508039
CH ₄ – iC ₅ H ₁₂	1.0	1.188899743	1.0	1.343685343
CH ₄ – nC ₆ H ₁₄	0.981844797	1.330570181	0.958015294	1.052643846
CH ₄ – nC ₇ H ₁₆	0.977431529	1.379850328	0.96250831	1.156655935
CH ₄ – nC ₈ H ₁₈	0.957473785	1.449245409	0.994740603	1.116549372
CH ₄ – H ₂ O	1.687364	1.115752	0.8567304	0.9636890
CH ₄ – H ₂ S	1.011090031	0.9611557729	1.012599087	1.040161207
CH ₄ – O ₂	1.0	0.95	1.0	1.0
N ₂ – CO ₂	1.005894529	1.107654104	0.977794634	1.047578256
N ₂ - C ₂ H ₆	1.007671428	1.098650964	0.978880168	1.042352891
N ₂ - C ₃ H ₈	1.002677329	1.201264026	0.9744224681	1.081025408
N ₂ - nC ₄ H ₁₀	0.994515234	1.304886838	0.99608261	1.146949309
N ₂ - iC ₄ H ₁₀	0.99286813	1.284462634	0.98641583	1.100576129
N ₂ - nC ₅ H ₁₂	1.0	1.419029041	1.0	1.078877166
N ₂ - iC ₅ H ₁₂	1.0	1.38177077	1.0	1.154135439
N ₂ - nC ₆ H ₁₄	1.0	1.472607971	1.0	1.195952177
N ₂ - nC ₇ H ₁₆	1.0	1.52975334	1.0	1.40455409
N ₂ - nC ₈ H ₁₈	1.0	1.733280051	1.0	1.186067025
N ₂ - H ₂ O	2.325491	1.594913	0.7627175	0.7846311
N ₂ - H ₂ S	1.004692366	0.9601742	0.910394249	1.256844157
N ₂ - O ₂	0.997190589	0.995157044	0.99952177	0.997082328
CO ₂ – C ₂ H ₆	1.013871147	0.90094953	1.002525718	1.032876701
CO ₂ – C ₃ H ₈	1.033620538	0.908772477	0.996898004	1.047596298

CO ₂ – nC ₄ H ₁₀	1.018171004	0.911498231	1.174760923	1.222437324
CO ₂ – iC ₄ H ₁₀	1.023339824	0.929982936	1.076551882	1.081909003
CO ₂ – nC ₅ H ₁₂	1.027000795	0.979217302	1.024311498	1.068406078

Продолжение таблицы А5

Компоненты (i - j)	β_{Tij}	γ_{Tij}	β_{vij}	γ_{vij}
CO ₂ – iC ₅ H ₁₂	1.19180957	0.961218039	1.060793104	1.116793198
CO ₂ – nC ₆ H ₁₄	1.0	1.038675574	1.0	0.851343711
CO ₂ – nC ₇ H ₁₆	1.011806317	1.046169823	1.205469976	1.164585914
CO ₂ – nC ₈ H ₁₈	1.02969078	1.074455386	1.026169373	1.104043935
CO ₂ – H ₂ O	1.675020	1.365176	0.3465759	0.4393211
CO ₂ – H ₂ S	1.016034583	0.92601888	0.906630564	1.024085837
CO ₂ – O ₂	1.0	1.0	1.0	1.0
C ₂ H ₆ - C ₃ H ₈	0.996199694	1.01473019	0.997607277	1.00303472
C ₂ H ₆ - nC ₄ H ₁₀	0.999130554	1.034832749	0.999157205	1.006179146
C ₂ H ₆ - iC ₄ H ₁₀	1.0	1.033283811	1.0	1.006616886
C ₂ H ₆ - nC ₅ H ₁₂	0.998688946	1.066665676	0.993851009	1.026085655
C ₂ H ₆ - iC ₅ H ₁₂	1.0	1.021150247	1.0	1.045439935
C ₂ H ₆ - nC ₆ H ₁₄	1.0	1.092177796	1.0	1.169701102
C ₂ H ₆ - nC ₇ H ₁₆	1.0	1.134532014	1.0	1.057666085
C ₂ H ₆ - nC ₈ H ₁₈	0.984068272	1.168636194	1.007469726	1.071917985
C ₂ H ₆ - H ₂ O	1.141696	0.7145980	0.7260914	0.9103919
C ₂ H ₆ - H ₂ S	0.990197354	0.90273666	1.010817909	1.030988277
C ₂ H ₆ - O ₂	1.0	1.0	1.0	1.0
C ₃ H ₈ - nC ₄ H ₁₀	1.000310289	1.007392782	0.999795868	1.003264179
C ₃ H ₈ - iC ₄ H ₁₀	0.998012298	1.005250774	0.999243146	1.001156119
C ₃ H ₈ - nC ₅ H ₁₂	0.996484021	1.008344412	1.044919431	1.019921513
C ₃ H ₈ - iC ₅ H ₁₂	0.994364425	1.0032695	1.040459289	0.999432118
C ₃ H ₈ - nC ₆ H ₁₄	1.0	1.025657518	1.0	1.057872566
C ₃ H ₈ - nC ₇ H ₁₆	1.0	1.050044169	1.0	1.079648053
C ₃ H ₈ - nC ₈ H ₁₈	1.0	1.063694129	1.0	1.102764612
C ₃ H ₈ - H ₂ O	1.101761	0.7150612	0.6238888	0.6085248
C ₃ H ₈ - H ₂ S	0.992573556	0.905829247	0.936811219	1.010593999
C ₃ H ₈ - O ₂	1.0	1.0	1.0	1.0
nC ₄ H ₁₀ - iC ₄ H ₁₀	1.000077547	1.001432824	1.000880464	1.00041444
nC ₄ H ₁₀ - nC ₅ H ₁₂	1.0	1.00214364	1.0	1.01815965
nC ₄ H ₁₀ - iC ₅ H ₁₂	1.0	1.000792201	1.0	1.002728434
nC ₄ H ₁₀ - nC ₆ H ₁₄	1.0	1.00915706	1.0	1.034995284
nC ₄ H ₁₀ - nC ₇ H ₁₆	1.0	1.021283378	1.0	1.019174227
nC ₄ H ₁₀ - nC ₈ H ₁₈	1.0	1.033180106	1.0	1.046905515
nC ₄ H ₁₀ - H ₂ O	0.9732713	0.6251234	0.5239402	0.7651517
nC ₄ H ₁₀ - H ₂ S	0.985962886	0.926156602	0.908113163	1.033366041
nC ₄ H ₁₀ - O ₂	1.0	1.0	1.0	1.0
iC ₄ H ₁₀ - nC ₅ H ₁₂	1.0	1.002495889	1.0	1.002779804

СТ РК

(проект, первая редакция)

iC ₄ H ₁₀ - iC ₅ H ₁₂	1.0	1.001835788	1.0	1.00228453
iC ₄ H ₁₀ - nC ₆ H ₁₄	1.0	1.006018054	1.0	1.010493989
iC ₄ H ₁₀ - nC ₇ H ₁₆	1.0	1.00988576	1.0	1.021668316

Продолжение таблицы А5

Компоненты (i - j)	β_{Tij}	γ_{Tij}	β_{vij}	γ_{vij}
iC ₄ H ₁₀ - nC ₈ H ₁₈	1.0	1.013945424	1.0	1.0322807063
iC ₄ H ₁₀ - H ₂ O	1.0	1.0	1.0	1.0
iC ₄ H ₁₀ - H ₂ S	0.974550548	0.937130844	1.012994431	0.988591117
iC ₄ H ₁₀ - O ₂	1.0	1.0	1.0	1.0
nC ₅ H ₁₂ - iC ₅ H ₁₂	1.0	1.000050537	1.0	1.000024335
nC ₅ H ₁₂ - nC ₆ H ₁₄	1.0	1.000761237	1.0	1.002480637
nC ₅ H ₁₂ - nC ₇ H ₁₆	1.0	1.002441051	1.0	1.008972412
nC ₅ H ₁₂ - nC ₈ H ₁₈	1.0	1.016422347	1.0	1.069223964
nC ₅ H ₁₂ - H ₂ O	1.0	0.447666011	1.0	0.95667731
nC ₅ H ₁₂ - H ₂ S	0.962006651	0.959065662	0.984613203	1.076539234
nC ₅ H ₁₂ - O ₂	1.0	1.0	1.0	1.0
iC ₅ H ₁₂ - nC ₆ H ₁₄	1.0	1.001204174	1.0	1.002995876
iC ₅ H ₁₂ - nC ₇ H ₁₆	1.0	1.003194615	1.0	1.009928206
iC ₅ H ₁₂ - nC ₈ H ₁₈	1.0	1.00564748	1.0	1.017880545
iC ₅ H ₁₂ - H ₂ O	1.0	1.0	1.0	1.0
iC ₅ H ₁₂ - H ₂ S	1.0	0.982651529	1.0	0.835763343
iC ₅ H ₁₂ - O ₂	1.0	1.0	1.0	1.0
nC ₆ H ₁₄ - nC ₇ H ₁₆	1.0	0.999762786	1.0	1.001508227
nC ₆ H ₁₄ - nC ₈ H ₁₈	1.0	1.001633952	1.0	1.006268954
nC ₆ H ₁₄ - H ₂ O	1.0	0.569681333	1.0	1.170217596
nC ₆ H ₁₄ - H ₂ S	0.985891113	0.956075596	0.754473958	1.339283552
nC ₆ H ₁₄ - O ₂	1.0	1.0	1.0	1.0
nC ₇ H ₁₆ - nC ₈ H ₁₈	1.0	0.998793111	1.0	1.006767176
nC ₇ H ₁₆ - H ₂ O	1.0	1.0	1.0	1.0
nC ₇ H ₁₆ - H ₂ S	0.988937417	1.013453092	0.828967164	1.087956749
nC ₇ H ₁₆ - O ₂	1.0	1.0	1.0	1.0
nC ₈ H ₁₈ - H ₂ O	1.0	0.662072469	1.0	0.599484191
nC ₈ H ₁₈ - H ₂ S	1.0	1.0	1.0	1.0
nC ₈ H ₁₈ - O ₂	1.0	1.0	1.0	1.0
H ₂ O - H ₂ S	0.7698974	1.047424	1.599782	0.8943467
H ₂ O - O ₂	1.0	0.964767932	1.0	1.143174289
H ₂ S - O ₂	1.0	1.0	1.0	1.0

Таблица А6. Коэффициенты формулы (39) для расчета изобарной теплоемкости компонентов газовых смесей в идеально-газовом состоянии

Компонент	α_{0i}	b_{0i}	c_{0i}
Метан (CH ₄)	0.508454694d1	-0.122437481d1	0.405687236d0
Азот (N ₂)	0.341147609d1	0.118865253	-0.561959968d-1
Диоксид углерода (CO ₂)	0.295862918d1	0.211791277	0.204891789
Этан (C ₂ H ₆)	0.548688903d1	-0.184988335d1	0.109246517d1
Пропан (C ₃ H ₈)	0.585658282d1	-0.175445631d1	0.151152472d1
n-Бутан (nC ₄ H ₁₀)	0.897036451d1	-0.312762832d1	0.221637945d1
i-Бутан (iC ₄ H ₁₀)	0.706331796d1	-0.201383713d1	0.192531300d1
n-Пентан (nC ₅ H ₁₂)	0.135326779d2	-0.656481881d1	0.372683002d1
i-Пентан (iC ₅ H ₁₂)	0.217908145d1	0.374802991d1	0.197120216
Гексан (nC ₆ H ₁₄)	0.130827714d2	0.541100851d1	0.378305321d1
Гептан (nC ₇ H ₁₆)	0.169613196d2	-0.734453380d1	0.445923746d1
Октан (nC ₈ H ₁₈)	0.196899094d2	-0.899369679d1	0.537929839d1
Водяной пар (H ₂ O)	0.408287375d1	-0.573115907d-1	0.0
Сероводород (H ₂ S)	0.430067168d1	-0.394951619	0.166347739
Кислород (O ₂)	0.361099454d1	-0.929961345d-1	0.983945693d-2

Компонент	d_{0i}	e_{0i}
Метан (CH ₄)	-0.280664253d-1	0.0
Азот (N ₂)	0.107812882d-1	-0.624860693d-3
Диоксид углерода (CO ₂)	-0.443816939d-1	0.284860938d-2
Этан (C ₂ H ₆)	-0.147640718	0.686263015d-2
Пропан (C ₃ H ₈)	-0.232631055	0.123579199d-1
n-Бутан (nC ₄ H ₁₀)	-0.334936505	0.175513829d-1
i-Бутан (iC ₄ H ₁₀)	-0.290563680	0.146210667d-1
n-Пентан (nC ₅ H ₁₂)	-0.568965132	0.307112273d-1
i-Пентан (iC ₅ H ₁₂)	-0.303760697d-1	0
Гексан (nC ₆ H ₁₄)	-0.605147284	0.337474008d-1
Гептан (nC ₇ H ₁₆)	0.660231362	0.337925101d-1
Октан (nC ₈ H ₁₈)	-0.808850378	0.422221318d-1
Водяной пар (H ₂ O)	0.674723722d-2	-0.644106546d-3
Сероводород (H ₂ S)	-0.216781312d-1	0.112315817d-2
Кислород (O ₂)	0.639960311d-2	-0.723090992d-3

Таблица А7. Коэффициенты $\{b_{2l}\}$, $\{b_{2wl}\}$ и $\{b_{1l}\}$ для расчета значений $\Omega^{(2,2)*}$ и $\Omega^{(1,1)*}$ по формулам (70 - 72)

l	b_{2l}	b_{2wl}	b_{1l}
0	0.362490805	0.799935189	0.307478729
1	0.304225816d1	0.224958154	0.278627337d1
2	-0.996806883d1	0.0	-0.867921570d1
3	0.253400235d2	0.897249966	0.207829497d2

Продолжение таблицы А7

4	-0.436583922d2	-0.170638899	0.326893145d2
---	----------------	--------------	---------------

СТ РК

(проект, первая редакция)

5	0.532410093d2	0.0	0.362685631d2
6	-0.426661039d2	0.0	-0.269352543d2
7	0.209057209d2	0.0	0.124806645d2
8	-0.566103563d1	-0.237971658d-1	-0.324300901d1
9	0.649505677	0.593339556d-2	0.36032499

Таблица А8. Параметры потенциала Леннарда-Джонса (для воды – параметры потенциала 12 – 6 – 3) для расчета коэффициента динамической вязкости

Компонент	σ , А	(ε/k) , К
Метан (CH ₄)	3.6920	166.28
Азот (N ₂)	3.5923	107.65
Диоксид углерода (CO ₂)	3.7430	251.85
Этан (C ₂ H ₆)	4.361	243.4
Пропан (C ₃ H ₈)	4.981	269.4
n-Бутан (nC ₄ H ₁₀)	5.445	300.9
i-Бутан (iC ₄ H ₁₀)	5.613	259.0
n-Пентан (nC ₅ H ₁₂)	5.607	394.9
i-Пентан (iC ₅ H ₁₂)	5.516	409.4
Гексан (nC ₆ H ₁₄)	5.876	450.1
Гептан (nC ₇ H ₁₆)	6.432	433.8
Октан (nC ₈ H ₁₈)	6.879	422.9
Водяной пар (H ₂ O)	2.52	775.0
Сероводород (H ₂ S)	3.501	385.0
Кислород (O ₂)	3.3925	121.97

Таблица А9. Параметры $\{c_n\}$ и показатели степеней $\{r_n\}$, $\{t_n\}$ формулы (75) для $\Delta\mu_{bs}$

n	c_n	r_n	t_n
1	0.273268038d1	1	1
2	-0.849620728d1	1	2
3	0.112502989d2	1	3
4	-0.633160558d1	1	4
5	0.108980302d1	1	5
6	0.147017803d1	2	1
7	-0.117487692d1	2	2
8	-0.134616968d1	2	4
9	0.170047728d1	2	5
10	0.801247296	3	4
11	-0.919311560	3	5
12	-0.948179500d-1	4	1
13	0.897246446d-1	5	1
14	-0.458434098d-1	5	2
15	0.297918757d-1	5	5

Таблица А10. Значения коэффициентов $\{d_{ki}\}$ для параметров аффинных преобразований $\{\varphi_{km}\}$ (77)

k	δ_k	d_{ki} для компонента i			
		Метан	Азот	Диоксид углерода	Этан
1	1	0.0	0.2024316d-1	-0.1094652	0.2018386d-1
2	1	0.0	0.3826122d-1	0.2228633	0.1626172
3	0	0.0	-0.2157778d-1	0.1291547	0.3170089
4	1	0.0	-0.1220054	-0.1133854	1.543834
5	0	0.0	-0.4603520	-0.7923388d-1	0.2303893
6	1	0.0	-0.3560745	-0.7532740	0.0
		Пропан	н-Бутан	Изобутан	н-Пентан
1	1	-0.8825995d-2	-0.6093508d-1	0.26349944d-1	0.2287271d-1
2	1	0.1003515	0.1555276	0.8370970d-1	0.1429728
3	0	0.1234629	0.3090944d-1	0.1173177	-0.8022675d-1
4	1	0.0	-0.1277186	-0.6472429d-1	1.267256
5	0	0.3209797d-1	-0.1457833	0.4656508-1	0.1463904
6	1	-0.4448295	0.9089620	-0.8480037	-1.819042
		Изопентан	Гексан	Гептан	Октан
1	1	0.6909138d-1	0.1173601	0.7436489d-1	-0.5041879
2	1	0.1510815d-1	-0.7006398d-1	-0.3729460d-1	-0.7050092
3	0	0.2701853d-1	-0.1794561	0.1040860	0.0
4	1	0.8456314d-1	-0.1127795	-0.1185784	-0.3011671
5	0	0.0	0.0	-0.1562911	-0.9109962d-2
6	1	-0.6520662	-0.8766142	1.211149	-1.043269
		Водяной пар	Сероводород	Кислород	
1	1	-0.3221958	-0.1511477	-0.2261211d-1	
2	1	0.2147289	0.2562762	0.2968558d-1	
3	0	1.584502	0.3220416	0.7572602d-1	
4	1	-0.1675186	-0.1838440	-0.1217539	
5	0	0.4457706d-1	0.2584963d-1	-0.196400	
6	1	-0.6317586d-1	-0.2339260	-0.2625900	

Таблица А11. Коэффициенты и показатели степеней для расчета функций G_{H_2O} (вода или лед) по формулам (59) или (60)

Вода				Лед			
i	b_{wi}	n_{wi}	t_{wi}	i	b_{ici}	n_{ici}	t_{ici}
1	0.152764987d1	0	-4	1	0.127880562d1	0	-4
2	-0.832614377d1	0	-3	2	-0.762694415d1	0	-3
3	0.196250487d2	0	-2	3	0.181705725d2	0	-2
4	-0.282510951d1	0	-1	4	-0.429417891d1	0	1
5	-0.227686486d1	0	1	5	0.692643325	0	2
6	0.496302828	0	2	6	-0.126863141	1	-1
7	-0.152252049	1	-2	7	-0.285777374d-2	1	1
8	0.320418916	1	-1				
9	-0.473255868	1	0				
10	0.235577622	1	1				

Окончание таблицы А11

Вода				Лед			
------	--	--	--	-----	--	--	--

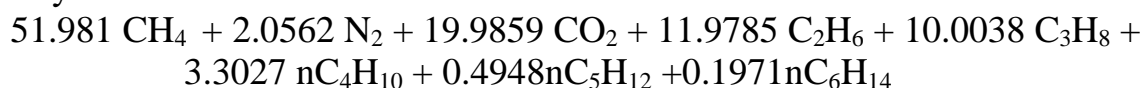
СТ РК

(проект, первая редакция)

i	b_{wi}	n_{wi}	t_{wi}	i	b_{ici}	n_{ici}	t_{ici}
11	-0.95141143d-1	1	2				
12	0.230068711d-2	2	0				
13	-0.297982893d-2	2	1				
14	0.111284142d-2	2	2				

Контрольные примеры расчета теплофизических свойств газовых смесей. Концентрация компонентов задается в молярных процентах.

1. Сухой газ:



$M = 28.17$ кг/кмоль, $T_{\text{cm}} = 250.42$ К, $\rho_{\text{cm}} = 8.333$ кмоль/м³, $\rho_{\text{cm}} = 4.8886$ МПа.

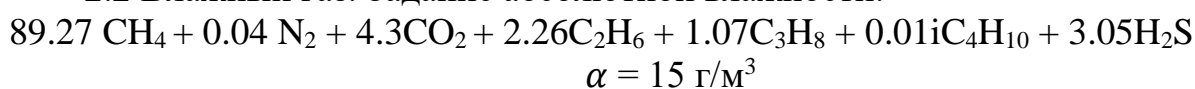
T , К	ρ , МПа	ρ , кг/м ³	z	w , м/с	κ	μ , мкПа·с
280.0	0.1	1.2162	0.99495	319.02	1.238	10.56
280.0	1.1	14.123	0.94246	308.86	1.225	10.76
310.0	0.1	1.0969	0.99638	334.07	1.224	11.61
310.0	15.0	277.04	0.59175	370.1	2.53	26.81
310.0	30.0	401.6	0.81644	616.65	5.09	46.08
500.0	0.1	0.67795	0.99951	413.54	1.159	17.58
500.0	15.0	105.28	0.96541	428.88	1.291	20.81
500.0	30.0	199.62	1.0184	494.38	1.626	26.53

2.1 Влажный газ. Задание молярной доли H_2O в явном виде (8 компонентов) $80.343 \text{ CH}_4 + 0.036 \text{ N}_2 + 3.87 \text{ CO}_2 + 2.034 \text{ C}_2\text{H}_6 + 0.963 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0.009 \text{ iC}_4\text{H}_{10} + 10.0 \text{ H}_2\text{O} + 2.745 \text{ H}_2\text{S}$

T , К	ρ , МПа	x_p	ρ , кг/м ³	z	w , м/с	κ	μ , мкПа·с
$89.037 \text{ CH}_4 + 0.039895 \text{ N}_2 + 4.2888 \text{ CO}_2 + 2.2541 \text{ C}_2\text{H}_6 + 1.0672 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0.0099738 \text{ iC}_4\text{H}_{10} + 0.26154 \text{ H}_2\text{O} + 3.0420 \text{ H}_2\text{S}$ $M = 18.42$ кг/кмоль, $T_{\text{cm}} = 203.18$ К, $\rho_{\text{cm}} = 9.9369$ кмоль/м ³ , $\rho_{\text{cm}} = 4.785$ МПа							
263.15	0.1	0.26154	0.84456	0.99684	393.61	1.308	10.1
$89.253 \text{ CH}_4 + 0.039992 \text{ N}_2 + 4.2992 \text{ CO}_2 + 2.2596 \text{ C}_2\text{H}_6 + 1.0698 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0.0099981 \text{ iC}_4\text{H}_{10} + 0.019149 \text{ H}_2\text{O} + 3.0494 \text{ H}_2\text{S}$ $M = 18.421$ кг/кмоль, $T_{\text{cm}} = 202.97$ К, $\rho_{\text{cm}} = 9.9291$ кмоль/м ³ , $\rho_{\text{cm}} = 4.7784$ МПа							
263.15	1.5	0.019149	13.265	0.95203	384.9	1.31	10.36
$86.101 \text{ CH}_4 + 0.03858 \text{ N}_2 + 4.1473 \text{ CO}_2 + 2.1798 \text{ C}_2\text{H}_6 + 1.032 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0.009645 \text{ iC}_4\text{H}_{10} + 3.5505 \text{ H}_2\text{O} + 2.9417 \text{ H}_2\text{S}$ $M = 18.407$ кг/кмоль, $T_{\text{cm}} = 207.57$ К, $\rho_{\text{cm}} = 10.0799$ кмоль/м ³ , $\rho_{\text{cm}} = 4.9266$ МПа							
300.00	0.1	3.5505	0.7395	0.9979	418.5	1.295	11.38
$89.226 \text{ CH}_4 + 0.03998 \text{ N}_2 + 4.2979 \text{ CO}_2 + 2.2589 \text{ C}_2\text{H}_6 + 1.0695 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0.009995 \text{ iC}_4\text{H}_{10} + 0.04929 \text{ H}_2\text{O} + 3.0485 \text{ H}_2\text{S}$ $M = 18.421$ кг/кмоль, $T_{\text{cm}} = 202.99$ К, $\rho_{\text{cm}} = 9.93$ кмоль/м ³ , $\rho_{\text{cm}} = 4.7792$ МПа							

300.0	15.0	0.04929	142.99	0.77475	436.68	1.818	17.57
$89.23\text{CH}_4 + 0.039982\text{N}_2 + 4.2981\text{CO}_2 + 2.259\text{C}_2\text{H}_6 + 1.0695\text{C}_3\text{H}_8 + 0.0099955\text{iC}_4\text{H}_{10} + 0.044588\text{H}_2\text{O} + 3.0486\text{H}_2\text{S}$ $M = 18.421 \text{ кг/кмоль}, T_{\text{cm}} = 202.99 \text{ K}, \rho_{\text{cm}} = 9.9299 \text{ кмоль/м}^3, \rho_{\text{cm}} = 4.7791 \text{ МПа}$							
300.00	30.0	0.044588	252.29	0.87817	629.1	3.328	28.15
$80.343\text{CH}_4 + 0.036\text{N}_2 + 3.87\text{CO}_2 + 2.034\text{C}_2\text{H}_6 + 0.963\text{C}_3\text{H}_8 + 0.009\text{iC}_4\text{H}_{10} + 10.0\text{H}_2\text{O} + 2.745\text{H}_2\text{S}$ $M = 18.381 \text{ кг/кмоль}, T_{\text{cm}} = 221.7 \text{ K}, \rho_{\text{cm}} = 10.4198 \text{ кмоль/м}^3, \rho_{\text{cm}} = 5.3704 \text{ МПа}$							
500.0	0.1	100.0	0.44223	0.99978	525.02	1.219	17.67
500.0	15.0	24.07	67.017	0.98961	546.53	1.335	19.98
500.0	30.0	16.122	129.32	1.0257	601.46	1.559	23.8

2.2 Влажный газ. Задание абсолютной влажности:



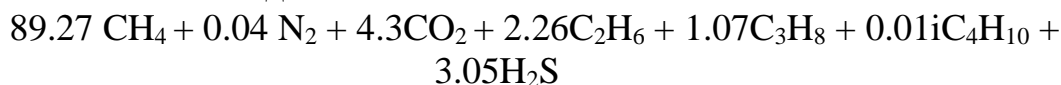
$T, \text{ K}$	$\rho, \text{ МПа}$	x_p	$\rho, \text{ кг/м}^3$	z	$w, \text{ м/с}$	k	$\mu, \text{ мкПа}\cdot\text{с}$
$89.037\text{CH}_4 + 0.039895\text{N}_2 + 4.2888\text{CO}_2 + 2.2541\text{C}_2\text{H}_6 + 1.0672\text{C}_3\text{H}_8 + 0.0099738\text{iC}_4\text{H}_{10} + 0.26154\text{H}_2\text{O} + 3.0420\text{H}_2\text{S}$ $M = 18.42 \text{ кг/кмоль}, T_{\text{cm}} = 203.18 \text{ K}, \rho_{\text{cm}} = 9.9369 \text{ кмоль/м}^3, \rho_{\text{cm}} = 4.785 \text{ МПа}$							
263.15	0.1	0.26154	0.84456	0.99684	393.61	1.308	10.1
$89.253 \text{ CH}_4 + 0.039992 \text{ N}_2 + 4.2992 \text{ CO}_2 + 2.2596\text{C}_2\text{H}_6 + 1.0698\text{C}_3\text{H}_8 + 0.0099981\text{iC}_4\text{H}_{10} + 0.019149\text{H}_2\text{O} + 3.0494\text{H}_2\text{S}$ $M = 18.421 \text{ кг/кмоль}, T_{\text{cm}} = 202.97 \text{ K}, \rho_{\text{cm}} = 9.9291 \text{ кмоль/м}^3, \rho_{\text{cm}} = 4.7784 \text{ МПа}$							
263.15	1.5	0.019149	13.265	0.95203	384.9	1.31	10.6
$87.42\text{CH}_4 + 0.039171\text{N}_2 + 4.2109\text{CO}_2 + 2.2132\text{C}_2\text{H}_6 + 1.0478\text{C}_3\text{H}_8 + 0.0097927\text{iC}_4\text{H}_{10} + 2.0726\text{H}_2\text{O} + 2.9868\text{H}_2\text{S}$ $M = 18.413 \text{ кг/кмоль}, T_{\text{cm}} = 205.3 \text{ K}, \rho_{\text{cm}} = 10.0117 \text{ кмоль/м}^3, \rho_{\text{cm}} = 4.8539\text{МПа}$							
300.00	0.1	3.5505	0.73971	0.99794	418.37	1.295	11.38
$89.26\text{CH}_4 + 0.039996\text{N}_2 + 4.2995\text{CO}_2 + 2.2598\text{C}_2\text{H}_6 + 1.0699\text{C}_3\text{H}_8 + 0.0099989\text{iC}_4\text{H}_{10} + 0.010729\text{H}_2\text{O} + 3.0497\text{H}_2\text{S}$ $M = 18.421 \text{ кг/кмоль}, T_{\text{cm}} = 202.96 \text{ K}, \rho_{\text{cm}} = 9.9289 \text{ кмоль/м}^3, \rho_{\text{cm}} = 4.7782 \text{ МПа}$							
300.0	15.0	0.04929	142.96	0.77488	436.71	1.818	17.57
$89.265\text{CH}_4 + 0.039998\text{N}_2 + 4.2997\text{CO}_2 + 2.2599\text{C}_2\text{H}_6 + 1.0699\text{C}_3\text{H}_8 + 0.0099994\text{iC}_4\text{H}_{10} + 0.0060807\text{H}_2\text{O} + 3.0498\text{H}_2\text{S}$ $M = 18.421 \text{ кг/кмоль}, T_{\text{cm}} = 202.96 \text{ K}, \rho_{\text{cm}} = 9.9288 \text{ кмоль/м}^3, \rho_{\text{cm}} = 4.7781 \text{ МПа}$							
300.00	30.0	0.044588	252.24	0.87835	629.11	3.328	28.14
$86.18\text{CH}_4 + 0.038616\text{N}_2 + 4.1512\text{CO}_2 + 2.1818\text{C}_2\text{H}_6 + 1.033\text{C}_3\text{H}_8 + 0.0096539\text{iC}_4\text{H}_{10} + 3.461 \text{ H}_2\text{O} + 2.9444\text{H}_2\text{S}$ $M = 18.407 \text{ кг/кмоль}, T_{\text{cm}} = 207.42 \text{ K}, \rho_{\text{cm}} = 10.0756 \text{ кмоль/м}^3, \rho_{\text{cm}} = 4.9219 \text{ МПа}$							
500.00	0.1	100.0	0.44283	0.99987	523.7	1.215	17.5
$89.249\text{CH}_4 + 0.039991\text{N}_2 + 4.299\text{CO}_2 + 2.2595\text{C}_2\text{H}_6 + 1.0698\text{C}_3\text{H}_8 + 0.0099977\text{iC}_4\text{H}_{10} + 0.02327\text{H}_2\text{O} + 3.0493\text{H}_2\text{S}$ $M = 18.421 \text{ кг/кмоль}, T_{\text{cm}} = 202.97 \text{ K}, \rho_{\text{cm}} = 9.9293 \text{ кмоль/м}^3, \rho_{\text{cm}} = 4.7785 \text{ МПа}$							
500.00	15.0	24.07	65.914	1.0084	552.43	1.341	19.47
$89.259\text{CH}_4 + 0.039995\text{N}_2 + 4.2995\text{CO}_2 + 2.2597\text{C}_2\text{H}_6 + 1.0699\text{C}_3\text{H}_8 + 0.0099988\text{iC}_4\text{H}_{10} + 0.012259\text{H}_2\text{O} + 3.0496\text{H}_2\text{S}$ $M = 18.421 \text{ кг/кмоль}, T_{\text{cm}} = 202.86 \text{ K}, \rho_{\text{cm}} = 9.929 \text{ кмоль/м}^3, \rho_{\text{cm}} = 4.7783 \text{ МПа}$							

СТ РК

(проект, первая редакция)

500.00	30.0	16.122	125.12	1.0625	613.46	1.57	22.54
--------	------	--------	--------	--------	--------	------	-------

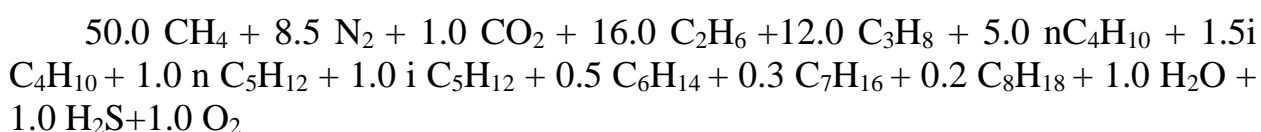
2.3 Влажный газ. Задание относительной влажности:



$$\varphi = 60 \%$$

$T, \text{ K}$	$\rho, \text{ МПа}$	x_p	$\rho, \text{ кг/м}^3$	z	$w, \text{ м/с}$	k	$\mu, \text{ мкПа}\cdot\text{с}$
$89.13 \text{ CH}_4 + 0.039937 \text{ N}_2 + 4.2933 \text{ CO}_2 + 2.2565 \text{ C}_2\text{H}_6 + 1.0683 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0.0099843 \text{ iC}_4\text{H}_{10} + 0.15692 \text{ H}_2\text{O} + 3.0452 \text{ H}_2\text{S}$ $M = 18.421 \text{ кг/кмоль}, T_{\text{cm}} = 203.09 \text{ K}, \rho_{\text{cm}} = 9.9334 \text{ кмоль/м}^3, \rho_{\text{cm}} = 4.782 \text{ МПа}$							
263.15	0.1	0.26154	0.84458	0.99685	393.61	1.308	10.1
$89.26 \text{ CH}_4 + 0.039995 \text{ N}_2 + 4.2995 \text{ CO}_2 + 2.2597 \text{ C}_2\text{H}_6 + 1.0699 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0.0099989 \text{ iC}_4\text{H}_{10} + 0.01149 \text{ H}_2\text{O} + 3.0496 \text{ H}_2\text{S}$ $M = 18.421 \text{ кг/кмоль}, T_{\text{cm}} = 202.96 \text{ K}, \rho_{\text{cm}} = 9.9289 \text{ кмоль/м}^3, \rho_{\text{cm}} = 4.7782 \text{ МПа}$							
263.15	1.5	0.019149	13.265	0.95203	384.9	1.31	10.36
$87.368 \text{ CH}_4 + 0.039148 \text{ N}_2 + 4.2084 \text{ CO}_2 + 2.2119 \text{ C}_2\text{H}_6 + 1.0472 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0.009787 \text{ iC}_4\text{H}_{10} + 2.1303 \text{ H}_2\text{O} + 2.985 \text{ H}_2\text{S}$ $M = 18.413 \text{ кг/кмоль}, T_{\text{cm}} = 205.38 \text{ K}, \rho_{\text{cm}} = 10.0143 \text{ кмоль/м}^3, \rho_{\text{cm}} = 4.8565 \text{ МПа}$							
300.00	0.1	3.5505	0.7397	0.99794	418.38	1.295	11.38
$89.244 \text{ CH}_4 + 0.039988 \text{ N}_2 + 4.2987 \text{ CO}_2 + 2.2593 \text{ C}_2\text{H}_6 + 1.0697 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0.009997 \text{ iC}_4\text{H}_{10} + 0.029574 \text{ H}_2\text{O} + 3.0491 \text{ H}_2\text{S}$ $M = 18.421 \text{ кг/кмоль}, T_{\text{cm}} = 202.98 \text{ K}, \rho_{\text{cm}} = 9.9295 \text{ кмоль/м}^3, \rho_{\text{cm}} = 4.7787 \text{ МПа}$							
300.0	15.0	0.04929	142.97	0.77482	436.7	1.818	17.57
$89.246 \text{ CH}_4 + 0.039989 \text{ N}_2 + 4.2988 \text{ CO}_2 + 2.2594 \text{ C}_2\text{H}_6 + 1.0697 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0.0099973 \text{ iC}_4\text{H}_{10} + 0.026753 \text{ H}_2\text{O} + 3.0492 \text{ H}_2\text{S}$ $M = 18.421 \text{ кг/кмоль}, T_{\text{cm}} = 202.98 \text{ K}, \rho_{\text{cm}} = 9.9294 \text{ кмоль/м}^3, \rho_{\text{cm}} = 4.7786 \text{ МПа}$							
300.00	30.0	0.044588	252.27	0.87825	629.11	3.328	28.15
$35.708 \text{ CH}_4 + 0.016 \text{ N}_2 + 1.72 \text{ CO}_2 + 0.904 \text{ C}_2\text{H}_6 + 0.428 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0.004 \text{ iC}_4\text{H}_{10} + 60.0 \text{ H}_2\text{O} + 1.22 \text{ H}_2\text{S}$ $M = 18.178 \text{ кг/кмоль}, T_{\text{cm}} = 468.84 \text{ K}, \rho_{\text{cm}} = 14.7939 \text{ кмоль/м}^3, \rho_{\text{cm}} = 14.5176 \text{ МПа}$							
500.00	0.1	100.0	0.43807	0.99814	536.44	1.261	18.06
$76.378 \text{ CH}_4 + 0.034223 \text{ N}_2 + 3.679 \text{ CO}_2 + 1.9336 \text{ C}_2\text{H}_6 + 0.91547 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0.0085558 \text{ iC}_4\text{H}_{10} + 14.442 \text{ H}_2\text{O} + 2.6095 \text{ H}_2\text{S}$ $M = 18.363 \text{ кг/кмоль}, T_{\text{cm}} = 234.7 \text{ K}, \rho_{\text{cm}} = 10.6902 \text{ кмоль/м}^3, \rho_{\text{cm}} = 5.7814 \text{ МПа}$							
500.00	15.0	24.07	67.833	0.97675	542.31	1.33	20.18
$80.635 \text{ CH}_4 + 0.036131 \text{ N}_2 + 3.8841 \text{ CO}_2 + 2.0414 \text{ C}_2\text{H}_6 + 0.9665 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0.0090327 \text{ iC}_4\text{H}_{10} + 9.6731 \text{ H}_2\text{O} + 2.755 \text{ H}_2\text{S}$ $M = 18.382 \text{ кг/кмоль}, T_{\text{cm}} = 220.84 \text{ K}, \rho_{\text{cm}} = 10.4011 \text{ кмоль/м}^3, \rho_{\text{cm}} = 5.3434 \text{ МПа}$							
500.00	30.0	16.122	129.12	1.0273	601.97	1.56	23.75

2.4 Влажный газ. Задание молярной доли H_2O в явном виде (15 компонентов):



$M = 27.967$ кг/кмоль, $T_{\text{cm}} = 258.01$ К, $\rho_{\text{cm}} = 7.4244$ кмоль/м³, $\rho_{\text{cm}} = 4.4997$ МПа

T , К	ρ , МПа	x_p	ρ , кг/м ³	z	w , м/с	k	μ , мкПа·с
300.00	0.1	3.5516	1.1267	0.99512	326.4	1.2	10.36
300.00	0.35	1.0237	3.9929	0.98281	323.78	1.196	10.40
400.00	0.1	100.0	0.84241	0.99822	371.59	1.163	13.38
400.00	15.0	2.396	152.89	0.82499	376.54	1.445	20.08
400.00	30.0	1.7406	271.02	0.93081	521.32	2.455	31.85
500.00	0.1	100.0	0.67316	0.99935	411.0	1.137	16.12
500.00	15.0	29.19	105.79	0.95384	425.44	1.277	20.02
500.00	30.0	29.081	197.62	1.0213	504.84	1.679	26.63

Примечание - Во всех результатах правее последней значащей цифры находятся нули.

СТ РК

(проект, первая редакция)

МКС 75.180

Ключевые слова: измерительная установка, массовый расход, скважинная жидкость, нефтегазовая смесь, блок контроля и управления, технологический блок, гидравлический привод

МКС 75.180

Ключевые слова: измерительная установка, массовый расход, скважинная жидкость, нефтегазовая смесь, блок контроля и управления, технологический блок, гидравлический привод

РАЗРАБОТЧИК

АО «Ситуационно-аналитический центр топливно-энергетического комплекса Республики Казахстан»

Управляющий директор

А. Оспанов

Директор

**Департамента экспертизы, проектирования и
технического регулирования**

М. Бубенцов

Главный эксперт

**Департамента экспертизы, проектирования и технического
регулирования**

Л. Бозтаева