ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА
СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ
(ГСССД)

Разрешаю на депонирование
Генеральный директор
ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»
_____ А. А. Коровайцев
«31» октября 2013 г.

УДК 547.216:536.7

ТАБЛИЦЫ СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОВОГО КОНДЕНСАТА УРЕНГОЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ЛИНИИ НАЧАЛА КИПЕНИЯ (ЛИНИИ НАСЫЩЕНИЯ) И В ЖИДКОЙ ФАЗЕ В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР 250…600 К ПРИ ДАВЛЕНИИ ДО 60 МПА

ГСССД 289 – 2013

Москва – 2013

gost.e-ecolog.ru

РАЗРАБОТАНЫ ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» с участием специалистов Российского Государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина докт. техн. наук Григорьева Б. А., докт. техн. наук Герасимова А. А, докт. техн. наук Григорьева Е. Б.

ОДОБРЕНЫ экспертной комиссией в составе:

д-ра техн. наук А. Ф. Богатырева,
д-ра техн. наук М.И. Левинбука,
канд. физ.-мат. наук Е. Е. Городецкого,
канд. техн. наук. Ю. В. Мамонова.

ПОДГОТОВЛЕНЫ к утверждению Российским научно-техническим центром информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия (ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»)

УТВЕРЖДЕНЫ Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии «31» октября 2013 г. (протокол № 3)

УДК 547.216:536.7

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА
СТАНДАРТНЫХ СПРАВЧНЫХ ДАННЫХ

Таблицы стандартных справочных данных

Теплофизические свойства газового конденсата Уренгойского месторождения на линии начала кипения (линия насыщения) и в жидкой фазе в диапазоне температур 250...600 К при давлении до 60 МПа

ГСССД 289–2013

Tables of Standard Reference Data

Thermophysical properties of the gas condensate of Urengoy field on the start line boiling (saturation line) and in the liquid phase in the temperature range 250... 600 K at pressures up to 60 MPa

GSSSD 289–2013

ДЕПОНИРОВАННАЯ РУКОПИСЬ

УДК 547.216:536.7

Таблицы стандартных справочных данных ГСССД 289 – 2013. Теплофизические свойства газового конденсата Уренгойского месторождения на линии начала кипения (линии насыщения) и в жидкой фазе в диапазоне температур 250…600 К при давлении до 60 МПА/ Григорьев Б.А., Герасимов А.А., Григорьев Е.Б. Российский научно-исследовательский центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» – М., 2013, – 36 с.: - Ил. - Библиогр. 30 наим. . Депонированы во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» 31.10.2013 г., № 881 – 2013 кк.

На основе современных методов расчета, разработанных на основе многочисленных экспериментальных данных о свойствах углеводородов, нефти, газоконденсатов и их фракций составлены таблицы стандартных справочных данных о теплофизических свойствах газового конденсата Уренгойского газоконденсатного месторождения в диапазоне температур 250…600 К при давлениях 0,1…600 МПа.

Авторы: Григорьев Б. А
Герасимов А. А.
Григорьев Е. Б

1. АННОТАЦИЯ

Рассчитаны таблицы теплофизических свойств газового конденсата Уренгойского газоконденсатного месторождения в диапазоне температур 250…600 К и давлении до 60 МПА в жидкой фазе, а также на лини начала кипения (линия насыщения).

Составлены таблицы плотности $\rho(P,T)$; изобарной теплоемкости $C_p(P,T)$; удельной энтальпии $H(P,T)$; удельной энтропии $S(P,T)$; коэффициента динамической вязкости $\eta(P,T)$ и коэффициента теплопроводности $\lambda(P,T)$ для жидкой фазы.

На линии насыщения рассчитаны значения давления начала кипения $P'(T)$, плотности $\rho'(T)$, изобарной теплоемкости $c_p'(T)$, удельных энтальпии $H'(T)$ и энтропии $S'(T)$; энтальпии ΔH^T_v и энтропии ΔS^T_v парообразования при постоянной температуре; поверхностного натяжения $\sigma'(T)$.

Расчеты выполнены с использованием уравнений и методов, разработанных на основе анализа многочисленных экспериментальных данных о свойствах нефти, нефтепродуктов, газовых конденсатов и их фракций, углеводородов в широких диапазонах температур и давлений.

2. ВВЕДЕНИЕ

На основе современных методов расчета [1,2] составлены таблицы теплофизических свойств газового конденсата Уренгойского месторождения в диапазоне температур 250…600 К и давлений до 60 МПа, включая линию начала кипения. Методы расчета свойств углеводородных систем неопределенного состава, к которым относятся и газоконденсаты, разработаны авторами на основе наиболее надежных и представительных экспериментальных данных [3-15]. База экспериментальных данных включала теплофизическую и физико-химическую информацию более чем о 300-х веществах, представляющих собой нефти и газовые конденсаты различных месторождений и их фракций. Все методы расчета построены в рамках одножидкостной модели [16] с использованием минимальной информации о физико-химических свойствах вещества и о его составе. В качестве показателей, идентифицирующих углеводородную систему, использовались показатель преломления n_D^{20} при температуре 20°С, относительная плотность ρ_4^{20}, молярная масса М, кг/моль и среднеобъемная температура кипения T_{bv}, К.

Представлены только конечные формулы без описания процедуры разработки того или иного метода и сравнения его с существующим. При этом проведенный авторами анализ сравнения с другими методами позволяет считать, что таблицы стандартных справочных данных о свойствах газового конденсата Уренгойского месторождения рассчитаны с использованием наиболее надежных и широко диапазонных методов.

3. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ГАЗОВОМ КОНДЕНСАТЕ И ЕГО ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ

Полные сведения о газоконденсатных характеристиках газового конденсата Уренгойского месторождения приведены в [17].

Конденсат представляет собой жидкость желто-зеленого цвета с характерным запахом сернистых соединений. Содержание серы – 1,55% массовых, твердых парафинов – 1,94%, смол – 1,41%. Массовая доля метанонафтеновых углеводородов – 66%, ароматических – 34%. В таблице 1 приведены фракционный состав и физико-химические свойства конденсата, с использованием которых рассчитывались таблицы теплофизических свойств.

Таблица 1

Фракционный состав и физико-химические свойства конденсата Уренгойского месторождения

Температура начала кипения, °С	0	70
Температура °С отгона, % (по объему)	10	100
	30	120
	50	134
	70	166
	90	238
Показатель преломления, n_D^{20}		1,4300
Относительная плотность, ρ_4^{20}		0,7708
Молярная масса, М		119,0
Среднеобъемная температура кипения T_{bv}, К		424,75

4. Уравнения и методы расчета таблиц теплофизических свойств газового конденсата Уренгойского месторождения

4.1 Теплофизические свойства на линии начала кипения (насыщения)

4.1.1 Давление начала кипения p'(T) рассчитывалось как среднее результатов, полученных по уравнениям состояния Соава [18] и Брусиловского [19].

Уравнение состояния Соава [18]

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a\alpha}{V(V+b)}, \qquad (1)$$

Параметры:

$a = 0{,}42748R^2T_c^{\,2}/p_c$; $b = 0{,}08664RT_c/p_c$;

$\alpha = \{1+[0{,}48508+(1{,}551716\omega-0{,}1561\,\omega^2)](1-T_r^{0,5})\}^2$;

$A = a\alpha p/R^2T^2 = 0{,}45724\alpha p_r/T_r^2$; $B = bp/RT = 0{,}07780p_r/T_r$.

где R= 8,31441 $\frac{Дж}{(ммо\cdot К)}$ - универсальная газовая постоянная;

T_c, K, p_c, МПа – критические соответственно температура и давление; $T_r=T/T_c$, $p_r=p/p_c$ приведенные соответственно температура и давление;

ω – фактор ацентричности Питцера [1, 29].

Уравнение состояния Брусиловского [19]

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a\alpha}{(V+c)(V+d)}, \qquad (2)$$

Параметры:

$a = \alpha R^2T_c^{\,2}[1+\psi(1-T_r^{0,5})]^2/p_c$; $A = ap/R^2T^2$;

$b = \beta RT_c/p_c$; $B = bp/RT$;

$c = \sigma RT_c/p_c$; $C = cp/RT$;

$d = \delta RT_c/p_c$; $D = dp/RT$;

$\alpha = \Omega_c^{\,3}$; $\beta = Z_c^{*} + \Omega_c - 1$;

$\delta = -Z_c^{*} + \Omega_c[0{,}5 - (\Omega_c - 0{,}75)^{0,5}]$.

$Z_c^* = 0{,}3357 - 0{,}0294\omega;$

$\Psi = 1{,}050 + 0{,}105\omega + 0{,}428\omega^2$ *при* $\omega < 0{,}4489;$

$\Psi = 0{,}429 + 1{,}004\omega + 1{,}561\omega^2$ *при* $\omega \geq 0{,}4489.$

В таблице Р1 приведены значения $\rho'(T)$. Относительная стандартная неопределенность расчетных значений давления начала кипения составляет 8,0 %.

4.1.2 Плотность жидкой фазы на линии начала кипения $\rho'(T)$

$\rho'(T)$ рассчитывалась как среднее результатов, полученных по формулам (3) и (6), предложенных соответственно в работах [7] и [20] и скорректированных авторами,

Расчет плотности $\rho'(T)$ на линии начала кипения по методике [7] проводится по уравнению

$$\rho' / \rho'_{\tau=0} = \sum_{i=0}^{2} a_i (1-\tau)^{i/3}, \qquad (3)$$

где a_0=0,409622; a_1=0,5920194; a_2=0,430023.

Реперное значение плотности $\rho'_{\tau=0,7}$ при приведенной температуре τ=0,7 определялось по формуле

$$\rho'_{\tau=0,7} = \sum_{i=0}^{3} b_i c^i, \qquad (4)$$

где b_0=576,330; b_1=354,553; b_2=1307,602; b_3=-3512,286.

c – коррелирующий параметр, учитывающий индивидуально-групповые особенности газоконденсата

$$c = \rho_{20}^{гк} / \rho_{20}^{пен} - \tau_b^{гк} / \tau_b^{пен}, \qquad (5)$$

где $\rho_{20}^{гк}$ - плотность газоконденсата при температуре 20°С;

$\rho_{20}^{пен}$ - плотность пентана при температуре 20°С ($\rho_{20}^{пе,}$=626 кг/м^3);

$\tau_b^{гк}=\frac{T_{bv}^{гк}}{T_{pc}^{гк}}$ - приведенная среднеобъемная температура кипения газоконденсата;

$\tau_b^{пен}=\frac{T_b^{пен}}{T_c^{гк}}$ - приведенная нормальная температура кипения пентана ($\tau_в^{пе1}$=0,6584).

Расчет плотности $\rho'(T)$ на линии начала кипения по методике [20] проводится по уравнению:

$$(\rho'/\rho_c-1)=B(1-\tau)^{\beta}+(B-1)(1-\tau), \qquad (6)$$

где B – индивидуальный для каждого вещества коэффициент;

$\beta = 0{,}325$ – критический показатель кривой сосуществования.

$$B=[(\rho_0/\rho_{pc}-1)+(1-\tau_0)]/[(1-\tau_0)^{\beta}+(1-\tau_0)], \qquad (7)$$

где ρ_0 – плотность при температуре T_0;

$\tau_0=T_0/T_{pc}$ - приведенная температура.

Здесь T_0 = 293,15 К, T_{pc} – псевдокритическая температура.

В таблице Р1 приведены рассчитанные значения плотности ρ' газового конденсата в диапазоне температур 250…600 К и давлении до 60 МПа (стандартная неопределенность расчетных значений ρ' составляет 0,46 %).

4.1.3 Изобарная теплоемкость газового конденсата на линии начала кипения $C_{\rho}'(T)$ рассчитывалась как среднее результатов, полученных по формулам (8) [21] и (9) [6]:

$$\frac{c_p^{'}-c_p^0}{R}=\frac{c_0+c_1\omega+c_2(1-\tau)^4+c_3\omega(1-\tau)^4}{1+c_4\omega+c_5\tau}+c_6(1-\tau)^{-1,1}+c_7\omega(1-\tau)^{-1,1}, \quad (8)$$

где $c_p^{'}, c_p^0$ – изобарные теплоемкости соответственно на линии начала кипения и в идеально газовом состоянии, кДж/(кмоль·К);

$\tau=T/T_{nc}$ – приведенная температура; T_{nc} – псевдокритическая температура газового конденсата;

c_0= 2,036014; c_1= 8,04181; c_2= -7,165011; c_3= 75,20381; c_4= 0,115; c_5= -0,359; c_6= 0,2209837; c_7= 0,3338437.

$$\Delta c_p^{'}=c_0+c_1\omega+c_2(1+\omega)(1-\tau)^3+c_3(1+\omega)\tau+c_4(1-\tau)^{-0,8}\exp[c_5(1/\tau-1)], \quad (9)$$

где c_0= -30,0334; c_1=32,2544; c_2= 174,099; c_3= 75,6304; c_4= 11,01534; c_5= -13,974;

$\Delta c_p^{'}$, кДж/(кмоль·К); $\tau=T/T_c$; T_c- критическая температура газового конденсата.

В таблице Р1 приведены рассчитанные значения изобарной теплоемкости $C_p^{'}$ газового конденсата Уренгойского месторождения (стандартная неопределенность расчетных значений составляет 1,2%).

4.1.4 Энтальпия газового конденсата на линии начала кипения $H^{'}(T)$ рассчитывалась по формулам (10) и (11) [1, 6]

$$\left[\left(H_c-H_c^0\right)-\left(H^{'}-H^0\right)\right]/RT_c=h_1(1-\tau)+h_2(1-\tau)^2+h_3(1-\tau)^{\beta_0}+\omega\left[h_4(1-\tau)+h_5(1-\tau)^2+h_6(1-\tau)^{\beta_1}\right], \quad (10)$$

где H_c, кДж/кг – значение энтальпии в критической точке;

H^o, H_c^o кДж/кг – значения энтальпии в идеально газовом состоянии соответственно при температуре Т и критической температуре T_c;

h_1= 0,34384; h_2= -2,3010; h_3= 4,14444; h_4= -4,5433; h_5= 20,3731; h_6= 6,6264; β_0= 0,442; β_1= 0,403.

$$\left(H_c-H_c^0\right)/RT_c=5,5944-10,0584\omega+2,367\omega^2, \quad (11)$$

В таблице Р1 приведены рассчитанные значения энтальпии Н' газового конденсата на линии начала кипения (стандартная неопределенность расчетных значений составляет 2,73 кДж/кг).

4.1.5 Энтропия газового конденсата на линии начала кипения S′ рассчитывалась по формулам (12) и (13) [1, 6]:

$$\left[\left(S_c - S_c^0\right) - \left(S' - S^0\right)\right] / R = s_1(1-\tau)/\tau + s_2(1-\tau)^2/\tau + s_3(1-\tau)^{\beta_0}/\tau + \omega\left[s_4(1-\tau)/\tau + s_5(1-\tau)^2/\tau + s_6(1-\tau)^{\beta_1}/\tau\right], \quad (12)$$

где s_1= 2,03515; s_2= -6,001; s_3= 2,26998; s_4= -9,5620; s_5= 14,830; s_6= 9,25085; β_0= 0,332; β_1= 0,409.

$$\left(S_c - S_c^0\right) / R = 7{,}5259 - 19{,}4864\,\omega + 42{,}21\omega^2, \quad (13)$$

где S_c, кДж/(кг·К) – значения энтропии в критической точке;

S° и S_c° кДж/(кг·К) - значения энтропии в идеально-газовом состоянии соответственно при температуре Т и критической температуре T_c.

В таблице Р1 приведены рассчитанные значения энтропии S′ газового конденсата на линии начала кипения (стандартная неопределенность расчетных значений составляет 0,09 кДж/(кг·К)).

4.1.6 Энтальпия ΔH_v^T парообразования газового конденсата при постоянной температуре рассчитывалась по формуле (14) [1, 6]:

$$\Delta H_V^T / RT_c = 7{,}086(1-\tau)^{0{,}349} + 12{,}04\omega(1-\tau)^{0{,}446}, \quad (14)$$

В таблице Р1 приведены рассчитанные значения ΔH_v^T. Стандартная неопределенность расчетных значений составляет 1,50%.

4.1.7 Энтропия ΔS_v^T парообразования газового конденсата при постоянной

температуре рассчитывалась как среднее результатов, полученных по формулам (15) и (16) [1, 6]:

$$\Delta S_V^T / R = 6{,}298(1-\tau)^{0{,}338}/\tau + 15{,}087(1-\tau)^{0{,}452}\omega/\tau + 11{,}822(1-\tau)\alpha - 30{,}555(1-\tau)\alpha\omega, \quad (15)$$

$$\Delta S_V^T / R = 5{,}984(1-\tau)^{0{,}318}/\tau + 13{,}995(1-\tau)^{0{,}460}\omega/\tau + 6{,}841(1-\tau) - 11{,}965(1-\tau)\omega, \quad (16)$$

В таблице Р1 приведены рассчитанные значения ΔS_v^T. Стандартная неопределенность расчетных значений составляет 2,20%.

4.1.8 Поверхностное натяжение $\sigma'(T)$ на линии начала кипения рассчитывалось как среднее результатов, полученных по формулам (17) [22, 23] и (19) [1]:

$$\sigma = \sigma_{20}\left[\left(T_{pc} - T\right)/\left(T_{pc} - 293{,}15\right)\right]^{1{,}19}, \quad (17)$$

где σ_{20}, мН/м – поверхностное натяжение при температуре 20°С – рассчитывается по формуле

$$\sigma_{20} = 16{,}83\left(\rho_4^{20}\right)^{1{,}477} M^{0{,}1547}, \quad (18)$$

$$\sigma^* = \sigma/\sigma_{0{,}6} = 3{,}6373(1-\tau)^{1{,}26} - 0{,}7149(1-\tau)^{1{,}76}, \quad (19)$$

где $\sigma_{0{,}6}$ – реперное значение поверхностного натяжения при τ=0,6.

$\sigma_{0{,}6}^*$ определяется из критериальной зависимости.

$$\sigma_{0{,}6}^* = \frac{\sigma_{0{,}6}}{\kappa^{1/3} p_{pc}^{2/3} T_{pc}^{1/3}} \sum_{j=0}^{3} a_j A^j, \quad (20)$$

где a_o= 6,392; α_1= -2,176; α_2=0,6012; α_3=-0,0639; А – критерий Филиппова;

К=1,38054·10^{-23}Дж/к; P_{pc}, Н/м^2; T_{pc}, К.

Безразмерные значения $\square_{0,6}^{*}$ аппроксимированы уравнением

$$\sigma_{0,6}^{*} = \exp\left[s_0 + s_1 M / 100 + s_2 \left(\rho_4^{20}\right)^3 + s_3 10 \ln\left(n_D^{20}\right) + s_4 Y + s_5 Y\left(k_w - 10\right)\right], \quad (21)$$

K_W – фактор Ватсона; $Y = 100 R_E \left(n_D^{20} - \rho_4^{20}\right) / M$; R_E- удельная рефракция по Эйкману;

s_0= 9,774502; s_1= 0,1631078; s_2= 1,124604; s_3= -0,5296408; s_4= -0,8197291; s_5= 0,2082522.

В таблице Р1 приведены рассчитанные значения $\square'$ газового конденсата. Стандартная неопределенность расчетных значений составляет 1,60%.

4.1.9 Коэффициент динамической вязкости на линии начала кипения η' рассчитывался как среднее результатов полученных по формулам (22) [1, 24] и (33) [1, 25]:

$$\ln \eta^{*} = A + (B_0 + B_1 / \tau)\varphi_i / (\varphi - \varphi_i), \quad (22)$$

где η^{*}- приведенная вязкость; $\tau = T/T_{pc}$; $\varphi = V/V_{pc}$; $\varphi_i = V_i/V_{pc}$; T_{pc}, V_{pc} – значения псевдокритических соответственно температуры и молярного объема.

Приведенная вязкость рассчитывается по формуле

$$\eta^{*} = \left(\eta' - \eta^{0}\right) V^{2/3} / (MT)^{1/2}, \quad (23)$$

где η'- коэффициент динамической вязкости на линии начала кипения, МПа·с; η^{o} – коэффициент динамической вязкости разреженного газа МПа·с; М – масса

киломоля, кг/кмоль.

Вязкость разряженного газа при τ < 1,5определяется по формуле Стила и Тодоса

$$\eta^0 \xi = 1{,}5643\,\tau^{0{,}94}, \tag{24}$$

где $\xi = T_{pc}^{1/6} / M^{1/2} / P_{pc}^{2/3}$ - комплекс Камеринг-Онесса [20, 27]

Коэффициенты уравнения (22) рассчитываются по двух параметрическим зависимостям вида

$$A = Z_0 + Z_1 Y + Z_2 Y^2 + Z_3 K_W + Z_4 Y/(K_W - 9), \tag{25}$$

$$\varphi_i = Z_0 + Z_1 Y + Z_2 Y^2 + Z_3 K_W + Z_4 Y/(K_W - 9), \tag{26}$$

$$B_0 = Z_0 + Z_1 \omega + Z_2 \omega^2 + Z_3 K_W + Z_4 \omega/(K_W - 9), \tag{27}$$

$$B_1 = Z_0 + Z_1 \omega + Z_2 \omega^2 + Z_3 K_W + Z_4 \omega/(K_W - 9), \tag{28}$$

где K_w – фактор Ватсона; Y – характеристический комплекс, учитывающий ацентричность молекул

$$K_W = 1{,}216(T_{bv})^{1/3} / \rho_{15}^{15}, \tag{29}$$

$$Y = 100\left[\left(n_D^{20}\right)^2 - 1\right]\left(n_D^{20} - \rho_4^{20}\right)/\left[M\rho_4^{20}\left(n_D^{20} + 0{,}4\right)\right], \tag{30}$$

где ρ_4^{20}, n_D^{20} - соответственно относительная плотность и показатель преломления при температуре t = 20°C;

ρ_{15}^{15} - относительная плотность при температуре t = 15°C.

$$\rho_{15}^{15} = 1{,}0009\left[\rho_4^{20} - \gamma(15 - \lambda_0)\right], \tag{31}$$

где γ – температурная поправка плотности [28]

$$\gamma = \left[1{,}706 - 43{,}65 / MR_E\right]^{-1}. \tag{32}$$

Значения коэффициентов Z_i представлены в таблице 2

Таблица 2

Значения коэффициентов в уравнениях (26-29)

Коэф-фициент	Z_0	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
A	5,86558	-12,63934	15,33584	-0,132716	0,777644
B_0	-2,070435	-1,526733	0,495741	0,320887	$-2{,}84315\cdot10^{-2}$
B_1	1,472011	0,3733031	0,2330461	$-9{,}69232\cdot10^{-2}$	-1,653622
φ_i	0,264004	$9{,}47343\cdot10^{-2}$	-0,186951	$-3{,}34258\cdot10^{-3}$	$7{,}66749\cdot10^{-3}$

$$\Delta\eta^* = \exp\left[AX^{1,5} + BX^3 + CX^8 + DX^{10,5}\ln(\tau_\xi)\right] - 1, \tag{33}$$

где $\Delta\eta^*$- приведенная вязкость определяется по (23), переменная X – по соотношению

$$X = \rho_\xi^* / \left[\tau_\xi^{\rho_1}\right], \tag{34}$$

где $\tau_\xi = T / T_\xi$; $\rho^*_\xi = \rho / \rho_\xi$; $\rho_1 = 0{,}1\left(\upsilon^*_\xi\right)^5$; T_ξ – температура фиксированного значения приведенной вязкости; ρ – плотность при температуре Т, кг/м^3; ρ_ξ – плотность, кг/м^3 при температуре T_ξ, К и давлении P_{pc}, МПа.

Расчет температуры T_ξ проводится по двух параметрическому уравнению

$$T_\xi / T_{pc} = 0{,}6592591 - 0{,}1709597Y - 0{,}01088077K_W - \\ -0{,}0721121Y / \left(K_W - 9\right) + 0{,}1077843Y^2 + 0{,}0226019\left(M / 100\right), \quad (35)$$

где Y – характеристический комплекс, определяемый по формуле (30); K_w – фактор Ватсона, определяемый по формуле (29).

Коэффициенты A, B, C, D в (33) зависят от индивидуальных свойств жидкости и определяются по соотношению

$$F = f_0 + f_1 Y + f_2\left(K_W / 10\right) + f_3\left(K_W / 10\right)^2, \quad (36)$$

Значения коэффициентов уравнения (33), аппроксимированных зависимостью (36) представлены в таблице 3.

Таблица 3

Значения коэффициентов уравнения (33), (36)

Коэффициент	f_0	f_1	f_2	f_3
A	-75,095609	7,7282428	139,27582	-61,990086
B	131,62054	-10,954723	-231,37228	102,94091
C	-48,221585	3,2622499	84,669971	-37,267337
D	-24,118043	0,05563355	41,902559	-18,234842

В таблице Р1 приведены значения η' газового конденсата на линии начала кипения.

Стандартная неопределенность расчетных значений составляет 8,5%.

4.1.10 Коэффициент теплопроводности λ' на линии начала кипения рассчитывался как среднее результатов полученных по формулам (37) [26], (38), (42) [1, 3, 5].

$$\lambda' = \sum_{i=0}^{1} \sum_{j=0}^{2} a_{ij} \tau^i A^j , \qquad (37)$$

где $\tau = T/T_{pc}$; A – определяющий критерий подобия Филиппова [56, 61, 62, 66].

$$A = 100\pi\tau = 0{,}625 , \qquad (38)$$

Коэффициенты уравнения (37) представлены в таблице 4.

Таблица 4

Значения коэффициентов a_{ij} уравнения (38)

i	$j = 0$	$j = 1$	$j = 2$
0	0,185670	-0,037531	0,032386
1	-0,128972	0,031435	-0,032526

Формулы (39) и (42) представляют собой результат близких по точности методик, разработанных авторами [1, 3, 5] .

Первая форма уравнения имеет вид

$$\Delta\lambda^* = \frac{C_1\rho_\lambda^* + C_2\rho_\lambda^*/\tau_\lambda + C_3\rho_\lambda^*/\tau_\lambda^2 + C_4\rho_\lambda^{*2}/\tau_\lambda^3}{1 + C_5\rho_\lambda^*/\tau_\lambda^5} , \qquad (39)$$

где $\Delta\lambda^* = \left(\lambda - \lambda^0\right)\Lambda_\lambda \cdot 10^4$; $\Lambda_\lambda = 1/\left(T^{1/2} M^{1/6} \rho^{2/3}\right)$; λ, λ^0, Вт/(м·К); $\rho_\lambda{}^* = \rho / \rho_\lambda$;

$\tau_\lambda = T / T_\lambda$.

Температура фиксированного значения теплопроводности рассчитывается по уравнению

$$T_\lambda / T_{pc} = c_0 + c_1 Y + c_2 Y^2 + c_3\left(K_W - 10\right) + c_4\left(K_W - 10\right)^2 + c_5 Y\left(K_W - 10\right),$$

где $Y = R_E\left(n_D^{20} - \rho_4^{20}\right)/M$; $c_0 = 0{,}180689$; $c_1 = 1{,}279527$; $c_2 = -0{,}443805$;

$c_3 = 0{,}032758$; $c_4 = 0{,}020290$; $c_5 = -0{,}180112$.

Плотность ρ рассчитывается по УС (47)[1]. Опорное значение плотности ρ_λ при температуре T_λ и давлении $P = P_{pc}$ также рассчитывается по УС (47).

Теплопроводность разреженного газа λ^o рассчитывается по формуле

$$\lambda^o \cdot 10^3 = \frac{\eta^\circ}{M}\left(16{,}75 + 1{,}15 C_v^\infty\right), \qquad (40)$$

где λ^o, Вт/(м·К); η^o, мкПа·с; C_v^∞ - изохорная теплоемкость в состоянии идеального газа, кДж/(кмоль·К); M - молярная масса, кг/кмоль.

Величину η^o рассчитывают по формуле Стила и Тодоса (24), а идеально-газовую теплоемкость определяют по разработанной нами n-ρ-M - методике (см.[1])

Коэффициенты C_i уравнения (39) были аппроксимированы двухпараметрической зависимостью (41). Значения коэффициентов c_{ij} представлены в табл. 5

$$C_i = c_{i0} + c_{i1} Y + c_{i2}(K_w - 10) + c_{i3} Y(K_w - 10) + c_{i4} Y^2, \qquad (41)$$

Таблица 5

Значения коэффициентов c_{ij} уравнения (41)

c_{ij}	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
c_{i0}	$0{,}204390 \cdot 10^{-2}$	1,680487	-2,904145	1,686053	0,838634
c_{i1}	-0,695245	-1,122808	4,206791	-2,740641	-1,296082
c_{i2}	-0,229917	0,313671	0,190280	-0,341391	-0,264053
c_{i3}	0,116596	-0,034522	-0,597869	0,646504	0,479159
c_{i4}	1,476049	-1,496842	-0,525802	0,549570	0,0

Вторая формула (уравнение (42)) была установлена в результате анализа экспериментальных данных. В основу её положен экспериментально установленный факт – прямолинейный (либо близкий к нему) характер изотерм теплопроводности в жидкой фазе. В безразмерной форме интерполяционное уравнение имеет вид

$$\Delta\lambda^* = A(\tau_\lambda)\rho_\lambda^{*2} + B(\tau_\lambda)\rho_\lambda^{*8}, \tag{42}$$

$$A(\tau_\lambda) = A_0 + A_1/\tau_\lambda + A_2/\tau_\lambda^2, \tag{43}$$

$$B(\tau_\lambda) = B_0 + B_1/\tau_\lambda. \tag{44}$$

Анализ зависимости коэффициентов A_i и B_i в уравнениях (43) и (44) показал, что эти зависимости также являются многофакторными, но с достаточной точностью для обобщения может быть использована двухпараметрическая зависимость (41). То есть коэффициенты A_i и B_i определяются по уравнениям

$$A_i = a_{i0} + a_{i1}Y + a_{i2}(K_w - 10) + a_{i3}Y(K_w - 10) + a_{i4}Y^2, \tag{45}$$

$$B_i = b_{i0} + b_{i1}Y + b_{i2}(K_w - 10) + b_{i3}Y(K_w - 10) + b_{i4}Y^2. \tag{46}$$

Значения коэффициентов a_{ij} и b_{ij} представлены в табл. 6.

Таблица 6

Значения коэффициентов a_{ij} и b_{ij} в уравнениях (45), (46)

i,j	A_0	A_1	A_2	B_0	B_1
i,0	0,15519727	0,5273538	-0,39723886	-0,33422569	0,30709824
i,1	0,24478143	-2,612638	2,3526207	1,5774289	-1,5849624
i,2	-0,12682638	0,26076327	-0,18329726	0,007405679	0,03780367
i,3	0,54566064	-1,7456126	1,2611914	0,53715452	-0,58605539
i,4	-2,3297041	9,6474196	-7,3137163	-4,0344172	4,0298514

В таблице Р1 приведены рассчитанные значения λ' на линии начала кипения газового конденсата. Стандартная неопределенность расчетных значений λ' составляет 3,5%.

4.2 Теплофизические свойства газового конденсата Уренгойского месторождения в жидкой фазе в диапазоне температур 250…600 К и давлений до60 МПа

4.2.1 Плотность ρ рассчитывалась по локальному термическому уравнению состояния

$$P = K(\tau)\,\rho^2 + L(\tau)\,\rho^8 \qquad (47)$$

где температурные функции $K(\tau)$ и $L(\tau)$ определяются по уравнениям

$$K^*(\tau) = K(\tau)/K(\tau_0) = \sum_{i=1}^{3} k_i \tau^i, \qquad (48)$$

$$L^*(\tau) = L(\tau)/L(\tau_0) = \sum_{i=1}^{3} l_i \tau^i, \qquad (49)$$

где при $T_{pc} \le 750$ К, $\tau_0 = 0{,}6$;

$k_0 = 5{,}194997$; $k_1 = -11{,}56064$; $k_2 = 9{,}482536$; $k_3 = -3{,}127349$;

$l_0 = 0{,}6243408$; $l_1 = 0{,}838046$; $l_2 = 1{,}007374$; $l_3 = 1{,}081703$.

Опорные значения коэффициентов определяются по соотношениям

$$K(\tau_0)(\rho_4^{20})^2 = k_0 + k_1 T_{pc} + k_2[(13 - K_W)(10 - K_W)] + k_3\omega, \qquad (50)$$

$$L(\tau_0)(\rho_4^{20})^8 = l_0 + l_1 T_{pc} + l_2[(13 - K_W)(10 - K_W)] + l_3\omega, \qquad (51)$$

где $k_0 = 29{,}40516$; $k_1 = -0{,}3175597$; $k_2 = 2{,}186032$; $k_3 = 130{,}6964$;

$l_0 = -375{,}9973$; $l_1 = 1{,}075399$; $l_2 = 3{,}413777$; $l_3 = -212{,}4517$.

Для повышения точности расчетов проведена корректировка значений коэффициентов уравнения (47) по экспериментальному значению относительной плотности ρ_4^{20}. Скорректированные значения коэффициентов определяются по соотношениям: в таблице Р3 приведены рассчитанные значения изобарной теплоемкости газового конденсата Уренгойского месторождения. $K' = K cor^2$, $L' = L cor^8$, $cor = 1000\ \rho_4^{20} / \rho_{20}^{расч}$, где $\rho_{20}^{расч}$ – значение плотности при атмосферном давлении (кг/м^3) и температуре $T_o = 293{,}15$ К, рассчитанное по уравнению (47) без корректировки коэффициентов.

В таблице Р2 приведены значения плотности газового конденсата; стандартная неопределенность расчетных значений составляет 0,80%.

4.2.2 Изобарная теплоемкость C_p рассчитывалась по уравнениям (8) и (47) с использованием аппарата дифференциальной термодинамики [30].

В частности, из уравнения состояния в форме (47) следует

$$C_p(p,T) = C_p(p_1,T) + T[(K'\rho^2 + L'\rho^8)^2/(2K\rho^3 + 8L\rho^9) -$$
$$- (K'\rho_1^2 + L'\rho_1^8)^2/(2K\rho_1^3 + 8L\rho_1^9) - K''(\rho - \rho_1) - L''(\rho^7 - \rho_1^7)/7], \qquad (48)$$

где нижний индекс «1» относит соответствующее свойство к атмосферному давлению, либо давлению насыщения; K, L, K', L', K'', L'' — соответственно

температурные функции уравнения состояния (47) и их первые и вторые производные.

В таблице Р3 приведены рассчитанные значения изобарной теплоемкости газового конденсата Уренгойского месторождения. Стандартная неопределенность расчетных значений составляет 1,22%.

4.2.3 Энтальпия H(P,T) и энтропия S(P,T) рассчитывались по уравнению состояния (47) с использованием дифференциальных уравнений термодинамики [30] и уравнений (10) и (12).

В частности из уравнения состояния в форме (47) следует

$$h(\rho,T)-h(\rho_1,T) = (2K(T) - TK(T)')\rho + (8L(T) - TL(T)')\rho^7/7 - (2K(T) - TK(T)')\rho_1 + (8L(T) - TL(T)')\rho_1^7/7 \quad (49)$$

$$S(\rho,T)-S(\rho_1,T) = -(K(T)'\rho + L(T)')\rho^7/7 - K(T)'\rho_1 - L(T)')\rho_1^7/7 \quad (50)$$

В таблицах Р4 и Р5 приведены рассчитанные значения соответственно энтальпии и энтропии газового конденсата. Стандартная неопределенность расчетных значений H(P, T) и S(P, T) составляют соответственно 2,7 кДж/кг и 0,009 кДж/(кг·К).

4.2.4 Коэффициент динамической вязкости η(P,T) газового конденсата рассчитывали как среднее результатов, полученных по формулам (22) и (33). В таблице Р6 приведены результаты расчета. Стандартная неопределенность расчетных значений составляет 8,5%.

4.2.5 Коэффициент теплопроводности λ (P,T) газового конденсата рассчитывался как среднее результатов, полученных по формулам (38) и (42). В таблице Р7 приведены результаты расчета. Стандартная неопределенность расчетных значений составляет 3,0%.

Таблица Р1

Теплофизические свойства газового конденсата Уренгойского месторождения
на линии насыщения

T, K	p, МПа	ρ, кг/м^3	c_p, кДж/(кг·К)	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	Δh_V^T, кДж/кг	Δs_V^T, кДж/(кг·К)	σ, мН/м	η, мкПа·с	$\lambda \cdot 10^4$, Вт/(м·К)
250	$1{,}420 \cdot 10^{-4}$	802,95	1,9117	-100,8	-0,2496	416,8	1,707	27,84	1689,7	1209,7
260	$3{,}193 \cdot 10^{-4}$	795,63	1,9389	*81,52	-0,1997	412,3	1,626	26,92	1348,9	1201,5
270	$6{,}662 \cdot 10^{-4}$	788,23	1,9684	-61,76	-0,1498	407,7	1,55	26,02	1110,1	1190,8
280	$1{,}301 \cdot 10^{-3}$	780,75	1,9999	-41,58	-0,0998	403,0	1,478	25,11	935,59	1177,8
290	$2{,}398 \cdot 10^{-3}$	773,19	2,0333	-20,99	-0,0499	398,2	1,412	24,22	803,51	1162,8
300	$4{,}195 \cdot 10^{-3}$	765,55	2,0684	0	0	393,3	1,349	23,32	700,39	1146,2
310	$7{,}005 \cdot 10^{-3}$	757,82	2,1051	21,40	0,0498	388,4	1,290	22,43	618,00	1128,4
320	$1{,}122 \cdot 10^{-2}$	750,00	2,1433	43,20	0,0997	383,3	1,234	21,55	550,69	1109,4
330	$1{,}731 \cdot 10^{-2}$	742,07	2,1828	65,41	0,1494	378,1	1,181	20,67	494,73	1089,8
340	$2{,}583 \cdot 10^{-2}$	734,04	2,2236	88,01	0,1991	372,9	1,131	19,80	447,54	1069,5
350	$3{,}738 \cdot 10^{-2}$	725,90	2,2655	111,0	0,2487	367,4	1,083	18,93	407,17	1048,8
360	$5{,}262 \cdot 10^{-2}$	717,64	2,3085	134,4	0,2982	361,9	1,038	18,07	372,19	1027,9
370	$7{,}224 \cdot 10^{-2}$	709,25	2,3524	158,2	0,3476	356,2	0,9947	17,21	341,63	1006,9
380	$9{,}694 \cdot 10^{-2}$	700,72	2,3972	182,3	0,3969	350,4	0,9529	16,36	314,70	985,80
390	0,1274	692,05	2,4428	206,9	0,4460	344,5	0,9127	15,51	290,74	964,73

Продолжение таблицы Р1

T, К	p, МПа	ρ, кг/м^3	c_p, кДж/(кг·К)	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	Δh_V^T, кДж/кг	Δs_V^T, кДж/(кг·К)	σ, мН/м	η, мкПа·с	λ·10^4, Вт/(м·К)
400	0,1643	683,22	2,4892	231,9	0,4950	338,3	0,8740	16,68	269,31	943,74
410	0,2083	674,23	2,5362	257,3	0,5439	332,0	0,8367	13,85	250,02	922,86
420	0,2598	665,04	2,5840	283,1	0,5927	325,5	0,8006	13,2	232,59	902,13
430	0,3193	655,66	2,6324	309,3	0,6412	318,7	0,7656	12,21	216,73	881,55
440	0,3873	646,06	2,6816	335,9	0,6897	311,8	0,7316	11,40	202,22	861,15
450	0,4639	636,22	2,7314	362,9	0,7380	304,6	0,6985	10,60	188,95	840,91
460	0,5494	626,11	2,7821	390,3	0,7861	297,1	0,6661	9,817	176,70	820,86
470	0,6438	615,71	2,8338	418,2	0,8340	289,3	0,6344	9,038	165,39	800,96
480	0,7472	604,97	2,8866	446,6	0,8818	281,1	0,6032	8,269	154,88	781,33
490	0,85928	593,86	2,9411	475,4	0,9294	272,6	0,5724	7,511	145,08	761,63
500	0,97997	582,33	2,9976	504,7	0,9768	263,6	0,5419	6,764	135,91	742,16
510	1,1089	570,30	3,0569	534,5	1,024	254,1	0,5115	6,031	127,29	725,36
520	1,2459	557,71	3,1203	565,0	1,071	244,0	0,4811	5,312	119,15	706,69
530	1,3904	544,43	3,1896	596,0	0,117	233,2	0,4505	4,608	111,42	688,04
540	1,5420	530,33	3,2677	627,7	1,164	221,5	0,4194	3,922	104,05	669,33
550	1,7003	515,20	3,3595	660,3	1,211	208,8	0,3874	3,255	96,962	650,46
560	1,8647	498,77	3,4739	693,8	1,257	194,7	0,3542	2,610	90,105	631,27

Окончание таблицы Р1

T, K	p, МПа	ρ, кг/м^3	c_p, кДж/(кг·К)	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	Δh_V^T, кДж/кг	Δs_V^T, кДж/(кг·К)	σ, мН/м	η, мкПа·с	λ·10^4, Вт/(м·К)
570	2,0348	480,58	3,6282	728,5	1,303	178,7	0,3188	1,991	83,401	611,52
580	1,420·10^{-4}	802,95	1,9117	-100,8	-0,2496	416,8	1,707	27,84	1689,7	1209,7
590	3,193·10^{-4}	795,63	1,9389	*81,52	-0,1997	412,3	1,626	26,92	1348,9	1201,5

Таблица Р4

Удельная энтальпия газового конденсата Уренгойского месторождения, кДж/кг

Т, К	Давление р, МПа							
	0,1	1,0	3,0	5,0	10	20	40	60
250	-100,8	-99,91	-98,08	-96,17	-91,47	-81,99	-62,92	-43,70
260	-81,52	-80,69	-78,83	-76,99	-72,29	-62,88	-43,85	-24,65
270	-61,76	-60,94	-59,07	-57,21	-52,56	-43,21	-24,28	-5,145
280	-41,58	-40,73	-38,90	-37,08	-32,47	-23,15	-4,330	14,78
290	-20,99	-20,16	-18,34	-16,53	-11,96	-2,725	16,00	35,05
300	0	0,7979	2,561	4,364	8,891	18,06	36,74	55,70
310	21,4	22,20	23,97	25,75	30,22	39,29	57,87	76,82
320	43,2	44,00	45,73	47,48	51,90	60,92	79,35	98,24
330	65,41	66,17	67,88	69,62	74,01	82,93	101,2	120,0
340	88,01	88,76	90,44	92,15	96,46	105,2	123,4	142,1
350	111,0	111,7	113,4	115,0	119,2	128,0	146,1	164,7
360	134,4	135,1	136,7	138,3	142,5	151,1	169,1	187,6
370	158,2	158,9	160,4	162,0	166,1	174,6	192,4	210,9
380	182,3	182,9	184,5	186,0	190,0	198,4	216,1	234,5
390	-	208,2	209,7	211,2	215,1	223,3	240,8	259,2
400	-	233,1	234,5	236,0	239,8	247,9	265,2	283,5
410	-	258,4	259,8	261,2	264,9	272,8	290,0	308,1
420	-	284,1	285,4	286,8	290,4	298,1	315,1	333,2
430	-	310,2	311,5	312,8	316,2	323,7	340,5	358,5
440	-	336,8	337,9	339,1	342,4	349,7	366,3	384,2
450	-	363,6	364,7	365,8	368,9	376,0	392,4	410,2
460	-	390,9	391,8	392,9	395,8	402,7	418,8	436,5
470	-	418,7	419,5	420,4	423,1	429,7	445,6	463,2
480	-	721,7	995,9	448,3	450,8	457,1	472,7	490,2
490	-	475,5	476,0	476,6	478,8	484,8	500,1	517,5
500	-	504,6	504,8	505,3	507,1	512,8	527,8	545,1
510	-	-	534,1	534,4	535,9	541,2	555,8	572,9
520	-	-	564,1	564,1	565,1	570,0	584,3	601,3
530	-	-	594,4	594,1	594,7	599,1	613,0	629,8
540	-	-	625,4	624,7	624,7	628,5	642,1	658,7
550	-	-	657,1	656,0	655,3	658,5	671,6	688,0
560	-	-	689,58	687,8	686,4	688,9	701,5	717,7
570	-	-	722,9	720,5	718,2	719,9	731,9	747,8

Таблица Р5

Удельная энтропия газового конденсата Уренгойского месторождения, кДж/(кг·К)

Т, К	Давление р, МПа							
	0,1	1,0	3,0	5,0	10	20	40	60
250	-0,2496	-0,2506	-0,2527	-0,2549	-0,2602	-0,2703	-0,2888	-0,3057
260	-0,1997	-0,2001	-0,2030	-0,2052	-0,2106	-0,2209	-0,2398	-0,2569
270	-0,1498	-0,1508	-0,1532	-0,1554	-0,1610	-0,1716	-0,1908	
280	-0,0998	-0,1010	-0,1033	-0,1057	-0,1114	-0,1222	-0,1419	-0,1595
290	-0,0499	-0,0509	-0,0535	-0,0558	-0,0616	-0,0729	-0,0928	-0,1107
300	0	-0,001	-0,0036	-0,0010	-0,0122	-0,0235	-0,0410	-0,0621
310	0,0498	0,0485	0,0459	0,0433	0,0371	0,0254	0,0043	-0,0138
320	0,0999	0,0984	0,0957	0,0930	0,0865	0,0745	0,0531	0,0345
330	0,1494	0,1481	0,1452	0,1425	0,1357	0,1233	0,1015	0,0826
340	0,1991	0,1978	0,1948	0,1919	0,1850	0,1122	0,1498	0,1306
350	0,2487	0,2473	0,2442	0,2412	0,2340	0,2207	0,1977	0,1783
360	0,2982	0,2967	0,2935	0,2904	0,2829	0,2692	0,2456	0,2258
370	0,3476	0,3460	0,3426	0,3393	0,3315	0,3173	0,2932	0,2730
380	0,3969	0,3952	0,3917	0,3883	0,3801	0,3654	0,3406	0,3200
390	-	0,4425	0,4388	0,4352	0,4266	0,4113	0,3858	0,3648
400	-	0,4913	0,4874	0,4835	0,4746	0,4587	0,4324	0,4110
410	-	0,5401	0,5359	0,5318	0,5224	0,5058	0,4787	0,4569
420	-	0,5887	0,5842	0,5799	0,5700	0,5527	0,5247	0,5023
430	-	0,6369	0,6321	0,6276	0,6171	0,5989	0,5700	0,5471
440	-	0,6851	0,6800	0,6751	0,6640	0,6449	0,6150	0,5916
450	-	0,7331	0,7276	0,7223	0,7105	0,6904	0,6594	0,6354
460	-	0,7807	0,7747	0,7691	0,7565	0,7354	0,7032	0,6785
470	-	0,8282	0,8217	0,8156	0,8021	0,7798	0,7463	0,7209
480	-	0,8755	0,8685	0,8619	0,8473	0,8237	0,7888	0,7627
490	-	0,9229	0,9150	0,9077	0,8920	0,8669	0,8305	0,8037
500	-	-	0,9610	0,9531	0,9361	0,9094	0,8713	0,8436
510	-	-	1,0068	0,9980	0,9794	0,9509	0,9111	0,8825
520	-	-	1,0521	1,0423	1,022	0,9915	0,9497	0,9201
530	-	-	1,0962	1,0852	1,0628	1,0301	0,9862	0,9555
540	-	-	1,141	1,1286	1,1038	1,0686	1,0225	0,9906
550	-	-	1,1854	1,1712	1,1436	1,1056	1,057	1,0239
560	-	-	1,2284	1,2119	1,1810	1,1398	1,0885	1,0541
570	-	-	1,2703	1,251	1,2162	1,1714	1,1172	1,0813

Таблица Р6

Вязкость газового конденсата Уренгойского месторождения, мкПа·с

Т, К	Давление р, МПа							
	0,1	1,0	3,0	5,0	10	20	40	60
250	1630,3	1647,0	1684,7	1722,6	1819,8	2024,2	2480,4	3012,1
260	1304,9	1317,9	1347,3	1377,2	1452,6	1610,1	1956,7	2353,2
270	1074,8	1085,7	1109,3	1133,3	1193,9	1320,7	1595,2	1903,9
280	905,54	914,50	934,27	954,14	1004,5	1109,0	1333,9	1582,6
290	776,75	784,34	801,05	818,04	861,03	949,50	1138,2	1344,6
300	675,97	682,51	697,20	711,97	749,12	825,57	987,42	1162,6
310	595,41	601,25	614,08	627,10	659,94	727,16	868,19	1019,6
320	529,64	534,81	546,35	557,96	587,32	647,12	771,97	905,06
330	475,04	479,66	490,14	500,68	527,18	581,03	692,91	811,25
340	428,99	433,31	442,88	452,45	476,65	525,74	626,94	733,41
350	389,74	393,72	402,53	411,41	433,65	478,71	571,28	667,81
360	355,87	359,56	367,82	376,04	396,72	438,35	523,58	611,99
370	326,36	329,85	337,53	345,27	364,54	403,37	482,41	564,03
380	300,46	303,71	311,01	318,25	336,42	372,83	446,65	522,36
390	-	280,60	287,52	294,39	311,59	345,95	415,23	485,93
400	-	260,04	266,61	273,18	289,56	322,17	387,59	453,95
410	-	241,55	247,91	254,21	269,88	300,97	363,05	425,75
420	-	224,94	231,04	237,13	252,22	282,07	341,27	400,73
430	-	209,85	215,81	221,71	236,31	265,09	321,84	378,52
440	-	196,13	201,95	207,71	221,93	249,78	304,46	358,77
450	-	183,58	189,30	194,95	208,86	236,02	288,90	341,12
460	-	172,07	177,72	183,30	196,99	223,53	274,97	325,47
470	-	161,42	167,06	172,60	186,13	212,26	262,50	311,52
480	-	151,58	157,22	162,75	176,22	202,07	251,39	299,22
490	-	142,39	148,10	153,66	167,15	192,84	241,54	270,81
500	-	133,80	139,60	145,25	158,84	184,55	218,73	257,84
510	-	-	131,67	137,44	151,23	177,12	208,31	245,90
520	-	-	124,23	130,17	144,27	160,26	198,71	234,86
530	-	-	117,23	123,40	137,94	152,41	189,82	224,70
540	-	-	110,61	117,09	132,26	145,07	181,57	215,26
550	-	-	104,31	111,23	117,50	138,22	173,92	206,51
560	-	-	98,330	98,870	111,16	131,79	166,75	198,38
570	-	-	92,598	92,594	105,16	125,75	160,08	190,80

Таблица Р7

Теплопроводность газового конденсата Уренгойского месторождения $\lambda \cdot 10^4$, Вт/(м·К)

Т, К	Давление р, МПа							
	0,1	1,0	3,0	5,0	10	20	40	60
250	1196,1	1198,4	1203,4	1208,3	1220,3	1243,5	1286,9	1326,7
260	1190,9	1193,3	1198,7	1204,1	1217,0	1241,8	1288,1	1330,6
270	1182,3	1185,0	1190,7	1196,3	1210,1	1236,7	1285,9	1330,9
280	1170,7	1173,5	1179,6	1185,6	1200,3	1228,4	1280,4	1327,7
290	1156,6	1159,6	1166,0	1172,4	1188,0	1217,6	1272,3	1321,8
300	1140,4	1143,5	1150,4	1157,2	1173,5	1204,7	1261,9	1313,6
310	1122,7	1126,0	1133,2	1140,2	1157,5	1190,2	1249,7	1303,3
320	1103,8	1107,2	1114,7	1122,1	1140,2	1174,2	1236,0	1291,6
330	1083,9	1087,4	1095,3	1103,1	1121,9	1157,3	1221,4	1278,6
340	1063,4	1067,2	1075,4	1083,4	1103,1	1139,9	1205,9	1264,9
350	1042,5	1046,4	1055,0	1063,4	1083,8	1121,9	1190,1	1250,4
360	1021,4	1025,5	1034,5	1043,2	1064,4	1103,8	1173,9	1235,7
370	1000,2	1004,5	1013,8	1023,0	1044,9	1085,6	1157,5	1220,7
380	979,13	983,57	993,36	1002,8	1025,5	1067,5	1141,3	1205,7
390	-	962,17	972,93	982,76	1006,3	1049,6	1125,1	1190,7
400	-	942,22	952,73	962,98	987,37	1031,9	1109,1	1175,8
410	-	921,78	932,82	943,46	968,69	1014,4	1093,4	1161,2
420	-	901,72	913,11	924,18	950,31	997,48	1078,01	1146,8
430	-	881,82	893,79	905,26	932,28	980,77	1062,9	1132,7
440	-	862,25	874,70	886,65	914,63	964,39	1048,1	1118,9
450	-	842,93	855,93	868,33	897,30	948,49	1033,7	1105,3
460	-	823,90	837,46	850,38	880,38	932,87	1019,6	1092,1
470	-	805,03	819,26	832,71	863,75	917,67	1005,9	1079,1
480	-	786,42	801,31	815,34	847,49	902,88	992,59	1066,5
490	-	767,91	783,58	798,25	831,61	888,38	979,54	1054,1
500	-	749,51	766,03	781,40	816,00	874,28	966,81	1042,0
510	-	-	748,63	764,78	800,73	860,51	954,32	1030,2
520	-	-	731,37	748,33	785,70	847,03	942,12	1018,5
530	-	-	714,16	732,03	770,93	833,86	930,20	1007,1
540	-	-	696,94	715,86	756,43	820,96	918,48	995,82
550	-	-	679,63	699,79	742,12	808,31	907,00	984,67
560	-	-	662,21	683,71	728,03	795,86	895,64	973,66
570	-	-	644,47	667,64	714,14	783,66	884,48	962,72

Таблица Р3

Изобарная теплоемкость газового конденсата Уренгойского месторождения

Т, К	Теплоемкость C_p, кДж/(кг · К), при давлении *p*, МПа							
	0,1	1,0	3,0	5,0	10	20	40	60
250	1,9117	1,9111	1,9098	1,9052	1,9057	1,9008	1,8939	1,8896
260	1,9389	1,9382	1,9368	1,9355	1,9323	1,9270	1,9195	1,9148
270	1,9684	1,9676	1,9660	1,9645	1,9611	1,9553	1,9472	1,9422
280	1,9999	1,9990	1,9973	1,9956	1,9918	1,9856	1,9769	1,9716
290	2,0333	2,0324	1,0305	2,0287	2,0246	2,0177	2,0085	2,0029
300	2,0684	2,0674	2.0653	2,0633	2,0588	2,0515	2,0415	2,0357
310	2,1051	2,1040	2,1016	2,0994	2,0945	2,0866	2,0760	2,0699
320	2,1433	2,1420	2,1395	2,1371	2,1317	2,1231	2,1119	2,1056
330	2,1828	2,1814	2,1786	2,1760	2,1701	2,16,9	2,1490	2,1424
340	2,2236	2,2221	2,2190	2,2161	2,2097	2,1998	2,1872	2,1804
350	2,2655	2,2638	2,2604	2,2573	2,2503	2,2396	2,2264	2,2193
360	2,3085	2,3067	2,3029	2,2994	2,2918	2,2803	2,2664	2,2590
370	2,3524	2,3503	2,9461	2,3423	2,3340	3215	2,3070	2,2994
380	2,3972	2,3950	2,3903	2,3861	2,3770	2,3637	2,3483	2,3405
390	-	2,4376	2,4324	2,4278	2,4178	2,4035	2,3872	2,3792
400	-	2,4835	2,4777	2,4725	2,4616	2,4462	2,4291	2,4208
410	-	2,5298	2,5233	2,5175	2,5055	2,4888	2,4708	2,4623
420	-	2,5769	2,5696	2,5631	2,5498	2,5318	2,5129	2,5040
430	-	2,6243	2,6159	2,6087	2,5741	2,5745	2,5545	2,5453
440	-	2,6723	2,6628	2,6547	2,6384	2,6172	2,5960	2,864
450	-	2,7207	2,7099	2,7006	2,6825	2,6594	2,6369	2,6269
460	-	2,7697	2,7572	2,7466	2,7263	2,7011	2,6773	2,6667
470	-	2,8195	2,8049	2,7928	2,7700	2,7425	2,7170	2,7058
480	-	2,8698	2,8529	2,8389	2,8131	2,7828	2,7555	2,7436
490	-	2,9218	2,9014	2,8851	2,8558	2,8225	2,7932	2,7804
500	-	2,9752	2,9507	2,9315	2,8980	2,8611	2,8296	2,8159
510	-	-	3,0009	2,9783	2,9396	2,8997	2,8646	2,8498
520	-	-	3,0531	3,0260	2,9813	2,9356	2,8986	2,8825
530	-	-	3,1083	3,0753	3,0231	2,9721	2,9317	2,9142
540	-	-	3,1678	3,1274	3,0662	3,0089	2,9647	2,9454
550	-	-	3,2352	3,1847	3,1123	3,0479	2,9995	2,9785
560	-	-	3,3162	3,2524	3,1661	3,0933	3,0401	3,0170
570	-	-	3,4230	3,3410	3,2374	3,1549	3,0962	3,0707

Таблица Р2

Плотность газового конденсата Уренгойского месторождения

Т, К	Плотность р, кг/м^3, при давлении р, МПа							
	0,1	1,0	3,0	5,0	10	20	40	60
250	805,00	805,52	506,67	807,80	810,58	815,90	825,70	834,59
260	797,12	797,68	798,89	800,10	803,03	808,63	818,91	828,18
270	789,22	789,81	791,10	792,37	795,48	801,38	812,16	821,83
280	781,29	781,91	783,28	784,91	794,91	794,14	805,44	815,53
290	773,32	773,98	775,43	776,86	780,34	786,90	798,76	809,27
300	765,30	766,00	767,55	769,06	772,74	779,67	792,10	803,06
310	757,23	757,98	759,62	761,23	765,13	772,44	785,48	796,90
320	749,11	749,90	751,65	753,37	757,50	765,22	778,90	790,79
330	740,92	741,77	743,63	745,46	749,84	758,00	772,34	784,73
340	732,66	733,57	735,56	737,50	742,16	750,78	765,81	778,71
350	724,33	725,30	727,42	729,49	734,45	743,55	759,32	772,74
360	715,91	716,95	719,22	721,43	726,70	736,33	752,86	766,82
370	707,40	708,52	710,95	713,30	718,91	729,10	746,43	760,94
380	698,79	699,99	702,59	705,11	711,09	721,87	740,04	755,12
390	-	691,35	694,15	696,85	703,22	714,63	733,67	749,34
400	-	682,60	685,61	688,50	695,30	707,39	727,34	743,60
410	-	673,72	676,96	680,07	687,34	700,15	721,05	737,92
420	-	664,69	668,19	671,54	679,31	692,89	714,78	732,28
430	-	655,50	659,29	662,89	671,23	685,63	708,55	726,69
440	-	646,12	650,24	654,13	663,07	678,35	702,36	721,14
450	-	636,54	641,02	645,24	654,84	671,06	696,19	715,65
460	-	626,73	631,62	636,19	646,53	663,76	690,06	710,19
470	-	616,64	622,00	626,98	638,12	656,44	683,96	704,78
480	-	606,24	612,14	617,58	629,61	649,10	677,88	699,40
490	-	595,48	602,01	607,97	620,99	641,73	671,84	694,07
500	-	584,29	591,55	598,11	612,24	634,34	665,82	688,78
510	-	-	580,72	587,97	603,65	626,91	659,82	683,52
520	-	-	569,45	577,51	594,29	619,44	653,85	678,29
530	-	-	557,67	566,68	585,06	611,92	647,89	673,09
540	-	-	545,28	555,42	575,62	604,35	641,94	667,91
550	-	-	532,14	543,66	565,96	596,72	636,00	662,76
560	-	-	518,11	531,31	556,04	589,02	630,07	657,62
570	-	-	502,96	518,28	545,83	581,24	624,13	652,50

5. Заключение

Таблицы теплофизических свойств газового конденсата Уренгойского газоконденсатного месторождения таблицы Р1 – Р7 рассчитаны по уравнениям и методикам, разработанным на основе анализа достоверных экспериментальных данных о свойствах нефти, нефтепродуктов, газовых конденсатов и их фракций, углеводородов, и в настоящее время являются единственными.

6. Литература

1. Григорьев Б.А., Богатов Г.Ф., Герасимов А.А. Теплофизические свойства нефти, газовых конденсатов и их фракций / Под ред. Б.А. Григорьева. – М.: Изд-во МЗИ, 1999. – 372 с.

2. Григорьев Б.А., Герасимов А.А., Ланчаков Г.А. Теплофизические свойства и фазовые равновесия газовых конденсатов и их фракций / Под ред. Б.А. Гр1. 3. Григорьев Б.А. Исследование теплофизических свойств нефтей, нефтепродуктов и углеводородов: Дис. ... докт. техн. наук.- Грозный: ГНИ, 1979.- 524 с.

4. Курумов Д.С. Термические свойства н-алканов и фракций Мангышлакской нефти в жидком и газообразном состояниях: Дис. ... докт. техн. наук.- Грозный, 1991.- 440 с.

5. Богатов Г.Ф. Теплопроводность индивидуальных углеводородов и нефтепродуктов в жидком состоянии: Дис. ... докт. техн. наук.- Грозный, 1992.- 424 с.

6. Герасимов А.А. Калорические свойства нормальных алканов и многокомпонентных углеводородных смесей в жидкой и газовой фазах, включая критическую область: Дис. ... докт. техн. наук.- Калининград, 2000.- 434 с.

7. Овчинников Н.А. Плотность нефтяных фракций и нефтепродуктов, полученных физическими и каталитическими процессами переработки нефти: Дис. ... канд. техн. наук.- Грозный, 1992.- 169 с.

8. Болдырев Д.В. Разработка методов расчета вязкости нефтепродуктов: Дис. ... канд. техн. наук.- Грозный, 1994.- 227 с.

9. Магомадов А.С. Исследование вязкости газовых конденсатов и их фракций при различных температурах и давлениях: Дис. ... канд. техн. наук.- Краснодар: КПИ, 1978.- 190 с.

10. Экспериментальное исследование термодинамических свойств и коэффициентов переноса газоконденсатов и легких фракций нефтей в жидкой и паровой фазах. Отчет НИР/ Калининград. техн. ин-т рыб. пром. и хоз.- Калининград, 1993.- 107 с.

11. Таблицы рекомендуемых справочных данных. Плотность газовых конденсатов и их фракций / А.А. Муталибов, В.В. Шубин, А.А. Абдурахманов, Л.Н. Астафьева, В.Д. Плыкина // ВНИЦ МВ Госстандарта СССР.- М.,1989.- 67 с. Деп. в (ГСССД Р307-89).

12. Таблицы рекомендуемых справочных данных. Теплопроводность газовых конденсатов и их фракций / А.А. Муталибов, В.В. Шубин, Г.Н. Махмудов, Р.Р. Валитов, Л.Н. Астафьева // ВНИЦ МВ Госстандарта СССР.- М.,1989.- 40 с. Деп. в (ГСССД Р309-89).

13. Таблицы рекомендуемых справочных данных. Вязкость газовых конденсатов и их фракций / А.А. Муталибов, В.В. Шубин, А.А. Абдурахманов, И.М. Югай, Л.Н. Астафьева // ВНИЦ МВ Госстандарта СССР.- М., 1989.- 56с. Деп. в (ГСССД Р308-89).

14. Экспериментальное исследование теплофизических свойств стабильных газовых конденсатов и их фракций в жидкой фазе: Отчет о НИР / Кубанский государственный технологический университет; Руководитель А.С. Магомадов.- Тема №112.04.14.- Краснодар: КГТУ, 1994.- 171 с.

15. Казарян В.А. Теплофизические свойства индивидуальных углеводородов и газовых конденсатов.- М.: Изд-во "Техника" ООО "ТУМА ГРУПП", 2002.- 448 с.

16. Жидкие углеводороды и нефтепродукты/Под. ред. М.И. Шахпоронова, Л.П. Филиппова.- М.: Изд-во МГУ, 1989.- 192 с.

17. Научные основы прогноза фазового поведения пластовых газоконденсатных систем /А.И. Гриценко, И.А. Гриценко, В.В. Юшкин, Т.Д. Островская. – М.: Недра, 1995. – 432 с.

18. Graboski M.S., Daubert T.E. A modified Soave equation of state for phase equilibrium calculations. 1: Hydrocarbon systems // Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. 1978. Vol. 17. P. 443-448. 2: Systems containting Co_2, H_2S,N_2 and CO // Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. 1979. Vol. 18. P. 300-306.

19. Брусиловский А.И. Фазовые превращения при разработке нефти и газа. М.: «Грааль», 2002.

20. Филиппов Л. П. Методы расчета и прогнозирование свойств веществ. М.: Изд-

во МГУ, 1988.

21. Герасимов А.А., Григорьев Б.А., Кузнецов А.А. Новое обобщенное уравнение для расчета изобарной теплоемкости на линии насыщения // ТВТ. 2001. Т. 39. № 3. с. 426-433.

22. Немзер Б.В. Поверхностное натяжение парафиновых углеводородов и нефтепродуктов: Дис. … канд. техн. наук. Грозный, 1985.

23. Немзер Б.В., Малофеев В.А., Григорьев Б.А. Поверхностное натяжение, удельные избыточные энтропия и энергия поверхностного слоя фракций нефти Самотлорского месторождения. М., 1990. Деп. В ВИНИТИ 20.06.90, №5256-В90.

24. Kashiwagi H., Makita T. Viskosity of twele hydrocarbon liquids in the temperature range 298-348 K at pressures up to 110 M Pa // Int. Joyr. of Themophysics . 1982. Vol. 3. № 4. P. 289-305.

25. Lee H., Thodos G. generalized viscosyti behavior of fluids over the complete gaseous and liquid states // Ind. Eng. Chem. Res. 1998. Vol.27. № 12. P. 2377-2384.

26. Геллер В.З., Запорожан Г.В., Роткоп А.Л. Обобщение данных о теплофизических свойствах нефтепродуктов. Теплопроводность. // ИФЖ. 1981. Т.40. № 5. С. 914.

27. Рид Р., Праускнц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие: Пер. с англ. Под ред. Б.И. Соколова. – 3 изд. Л.: Химия, 1992.

28. Плотность (удельный объем) жидких нефтей и нефтепродуктов / Григорьев Б.А., Расторгуев Ю.Л., Ковальский Е.В., Шевченко Н.В. РМР-8. ГСССД Методика. 1982. 26 с.

29. .Kesler M.G., Lee B.I. Improve prediction of enthalpy of fractions // Hydrocarbon Processing.- 1976.-V.55, No.3.- P.153-158.

30. Сычев В.В. Дифференциальные уравнения термодинамики. Учебное пособие для вузов. – 2-е изд. Перераб. М.: Высшая школа, 1991. – 224 с.

gost.e-ecolog.ru