

**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
ЯМБУРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ЛИНИИ
НАЧАЛА КИПЕНИЯ (ЛИНИИ НАСЫЩЕНИЯ) И
В ЖИДКОЙ ФАЗЕ В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР 250...600 К
ПРИ ДАВЛЕНИИ ДО 60 МПа**

ГСССД 290 – 2013

(ОКОНЧАТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ, тема RU.3.058-2014)

Москва – 2013

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)**

**ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА
СТАНДАРТНЫХ СПРАВЧНЫХ ДАННЫХ**

Таблицы стандартных справочных данных

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

**ГСССД
290–2013**

Tables of Standard Reference Data

Thermophysical properties of the gas condensate of
Yamburgsky 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
290–2013**

ДЕПОНИРОВАННАЯ РУКОПИСЬ

УДК 547.216:536.7

Таблицы стандартных справочных данных ГСССД 290 – 2013. Теплофизические свойства газового конденсата Ямбургского 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, – 35 с.: - Ил. - Библиогр. назв. – Рус. – назв. Депонированы во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» 31.10.2013 г., № 882 – 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 Ямбургского 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 Ямбургского газоконденсатного месторождения в диапазоне температур 250...600 К и давлении до 60 МПа в жидкой фазе, а также на линии 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_v^T и энтропии ΔS_v^T 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 Ямбургского 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°C, относительная плотность ρ_4^{20} , молярная масса M , 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 Ямбургского 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 Ямбургского 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 метанонафтяных 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
Ямбургского месторождения

Температура начала кипения, °С	0	45
Температура °С отгона, % (по объему)	10	79
	30	112
	50	136
	70	180
	90	287
Показатель преломления, n_D^{20}		1,4320
Относительная плотность, ρ_4^{20}		0,7862
Молярная масса, М		133,0
Среднеобъемная температура кипения T_{bv} , К		431,95

4. Уравнения и методы расчета таблиц теплофизических свойств газового конденсата Ямбургского 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]

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

Параметры:

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

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

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

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

$T_c, K, p_c, \text{МПа}$ – 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]

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

Параметры:

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

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

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

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

$$\alpha = \Omega_c^3; \quad \beta = Z_c^* + \Omega_c - 1;$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$c = \rho_{20}^{зк} / \rho_{20}^{нен} - \tau_b^{зк} / \tau_b^{нен}, \quad (5)$$

где $\rho_{20}^{зк}$ - плотность газоконденсата при температуре 20°C;

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

$$\tau_b^{зк} = \frac{T_{bv}^{зк}}{T_{pc}^{зк}} - \text{приведенная среднеобъемная температура кипения}$$

газоконденсата;

$$\tau_b^{пен} = \frac{T_b^{пен}}{T_c^{зк}} - \text{приведенная нормальная температура кипения пентана}$$

$$(\tau_b^{пен} = 0,6584).$$

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

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

где B – индивидуальный для каждого вещества коэффициент;

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

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

Где ρ_0 – плотность при температуре T_0 ;

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

Здесь $T_0 = 293,15 \text{ К}$, 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 составляет 0,46 %.

4.1.3 Изобарная теплоемкость газового конденсата на линии начала кипения

$C_p'(T)$ 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 идеальном 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 Ямбургского 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]

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

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

H^0 , H_c^0 кДж/кг – значения энтальпии в идеальном газовом состоянии соответственно при температуре T и критической температуре T_c ;

$$h_1 = 0,34384; h_2 = -2,3010; h_3 = 4,14444; h_4 = -4,5433; h_5 = 20,3731; h_6 = 6,6264;$$

$$\beta_0 = 0,442; \beta_1 = 0,403.$$

$$(H_c - H_c^0) / RT_c = 5,5944 - 10,0581\omega + 23,67\omega^2, \quad (11)$$

В таблице P1 приведены рассчитанные значения энтальпии H' 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]:

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

где $s_1 = 2,03515$; $s_2 = -6,001$; $s_3 = 2,26998$; $s_4 = -9,5620$; $s_5 = 14,830$; $s_6 = 9,25085$; $\beta_0 = 0,332$; $\beta_1 = 0,409$.

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

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

S^0 и S_c^0 кДж/(кг·К) – значения энтропии в идеальном-газовом состоянии соответственно при температуре T и критической температуре T_c .

В таблице P1 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 P1 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]:

$$\Delta S_v^T / R = 6,2984(1-\tau)^{0,338} / \tau + 15,0871(1-\tau)^{0,452} \omega / \tau + 11,8228(1-\tau)\alpha - 30,5553(1-\tau)\alpha\omega, \quad (15)$$

$$\Delta S_v^T / R = 5,9848(1-\tau)^{0,318} / \tau + 13,9954(1-\tau)^{0,460} \omega / \tau + 6,8417(1-\tau) - 11,9651(1-\tau)\omega, \quad (16)$$

В таблице P1 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]:

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

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

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

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

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

$\sigma_{0,6}^*$ 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 $a_0 = 6,392$; $\alpha_1 = -2,176$; $\alpha_2 = 0,6012$; $\alpha_3 = -0,0639$; A – критерий Филиппова;

$K = 1,38054 \cdot 10^{-23}$ Дж/к; P_{pc} , Н/м²; T_{pc} , К.

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

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

K_W – фактор Ватсона; $Y = 100 R_E (n_D^{20} - \rho_4^{20}) / M$; 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 σ' 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

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

где η' - коэффициент динамической вязкости на линии начала кипения, МПа·с; η^0 – коэффициент динамической вязкости разреженного газа МПа·с; M – масса киломоля, кг/кмоль.

Вязкость разреженного газа при $\tau < 1,5$ определяется по формуле Стила и Тодоса

$$\eta^0 \xi = 1,5643 \tau^{0,94}, \quad (24)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ρ_{15}^{15} - относительная плотность при температуре $t = 15^\circ\text{C}$.

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

где γ – температурная поправка плотности [28]

$$\gamma = [1,706 - 43,65 / MR_E]^{-1}. \quad (32)$$

Значения коэффициентов Z_i представлены в таблице 2

Таблица 2

Значения коэффициентов в уравнениях (26-29)

Коэфф и- циент	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	$-2,84315 \cdot 10^{-2}$
B_1	1,472011	0,3733031	0,2330461	$-9,69232 \cdot 10^{-2}$	-1,653622
φ_i	0,264004	$9,47343 \cdot 10^{-2}$	-0,186951	$-3,34258 \cdot 10^{-3}$	$7,66749 \cdot 10^{-3}$

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

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

$$X = \rho_{\xi}^* / [\tau_{\xi}^{\rho_1}], \quad (34)$$

где $\tau_{\xi} = T / T_{\xi}$; $\rho_{\xi}^* = \rho / \rho_{\xi}$; $\rho_1 = 0,1(\nu_{\xi}^*)^5$; T_{ξ} – температура фиксированного значения приведенной вязкости; ρ – плотность при температуре T , кг/м³; ρ_{ξ} – плотность, кг/м³ при температуре T_{ξ} , К и давлении P_{pc} , МПа.

Расчет температуры T_{ξ} проводится по двух параметрическому уравнению

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

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

$$F = f_0 + f_1Y + f_2(K_W / 10) + f_3(K_W / 10)^2, \quad (36)$$

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

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

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

$$A = 100\pi\tau = 0,625, \quad (38)$$

Коэффициенты уравнения (37) представлены в таблице 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

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

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

Температура фиксированного значения теплопроводности рассчитывается по уравнению

$$T_\lambda / T_{pc} = c_0 + c_1Y + c_2Y^2 + c_3(K_W - 10) + c_4(K_W - 10)^2 + c_5Y(K_W - 10),$$

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

$$c_3 = 0,032758; c_4 = 0,020290; \quad c_5 = -0,180112.$$

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^0 рассчитывается по формуле

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

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

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

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

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

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

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

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

$$B(\tau_\lambda) = B_0 + B_1/\tau_\lambda. \quad (44)$$

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

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

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

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 составляет 3,5%.

4.2 Теплофизические свойства газового конденсата Ямбургского месторождения в жидкой фазе в диапазоне температур 250...600 К и давлений до 60 МПа

4.2.1 Плотность ρ рассчитывалась по локальному термическому уравнению состояния

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

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

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

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

где при $T_{pc} \leq 750 \text{ K}$, $\tau_0 = 0,6$;

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

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

Опорные значения коэффициентов определяются по соотношениям

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

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

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 Ямбургского месторождения. $K' = K_{\text{cor}}^2$, $L' = L_{\text{cor}}^8$, $\text{cor} = 1000 \rho_4^{20} / \rho_{20}^{\text{расч}}$, где $\rho_{20}^{\text{расч}}$ – значение плотности при атмосферном давлении (кг/м^3) и температуре $T_0 = 293,15 \text{ K}$, 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

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

$$- (K' \rho_1^2 + L' \rho_1^8)^2 / (2K \rho_1^3 + 8L \rho_1^9) - K''(\rho - \rho_1) - L''(\rho^7 - \rho_1^7)/7], \quad (48)$$

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 Ямбургского 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 соответственно 2,7 кДж/кг и 0,009 кДж/(кг·К).

4.2.4 Коэффициент динамической вязкости $\eta(P,T)$ 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 $\lambda (P,T)$ 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%.

Теплофизические свойства газового конденсата Ямбургского месторождения на линии насыщения

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	$\lambda \cdot 10^4$, Вт/(м·К)
250	$4,468 \cdot 10^{-4}$	818,08	1,8258	-96,45	-0,2441	380,1	1,555	29,74	2083,6	1185,0
260	$8,297 \cdot 10^{-4}$	810,81	1,8546	-78,01	-0,1954	376,0	1,481	28,79	1629,3	1175,3
270	$1,483 \cdot 10^{-3}$	803,47	1,8855	-59,13	-0,1466	371,9	1,412	27,83	1317,9	1163,5
280	$2,564 \cdot 10^{-3}$	796,06	1,9184	-39,84	-0,0978	367,7	1,347	26,89	1094,6	1149,9
290	$4,300 \cdot 10^{-3}$	788,57	1,9531	-20,12	-0,0489	363,4	1,287	25,95	928,64	1134,8
300	$7,005 \cdot 10^{-3}$	781,00	1,9895	0	0	359,1	1,230	25,01	801,01	1118,5
310	$1,110 \cdot 10^{-2}$	773,34	2,0274	20,53	0,0489	354,6	1,176	24,08	700,44	1101,2
320	$1,713 \cdot 10^{-2}$	765,59	2,0667	41,48	0,0977	350,1	1,126	23,15	619,43	1083,2
330	$2,579 \cdot 10^{-2}$	757,74	2,1072	62,84	0,1466	345,5	1,078	22,23	552,83	1064,7
340	$3,793 \cdot 10^{-2}$	749,79	2,1489	84,60	0,1954	340,8	1,033	21,31	497,17	1045,8
350	$5,453 \cdot 10^{-2}$	741,74	2,1916	106,7	0,2441	336,0	0,9897	20,40	450,00	1026,7
360	$7,673 \cdot 10^{-2}$	733,57	2,2353	129,3	0,2927	331,0	0,9485	19,49	409,57	1007,6
370	0,1058	725,27	2,2798	152,2	0,3413	326,0	0,9090	18,59	374,45	988,43
380	0,1430	716,85	2,3251	175,6	0,3897	320,8	0,8712	17,70	343,71	969,29
390	0,1898	708,29	2,3711	199,3	0,4381	315,5	0,8349	16,81	316,52	950,24
400	0,2474	699,58	2,4178	223,5	0,4863	310,0	0,8000	15,93	292,36	931,32
410	0,3171	690,70	2,4650	248,0	0,5345	304,4	0,7663	15,06	270,73	912,54
420	0,3998	681,66	2,5128	273,0	0,5825	298,6	0,7338	14,19	251,22	893,93
430	0,4962	672,42	2,5611	298,3	0,6303	292,7	0,7023	13,33	233,59	875,49
440	0,6067	662,98	2,6099	324,1	0,6780	286,5	0,6717	12,48	217,54	857,23
450	0,7311	653,32	2,6593	350,2	0,7256	280,1	0,6419	11,64	202,89	839,13
460	0,8689	643,41	2,7093	376,8	0,7730	273,5	0,6128	10,81	189,44	821,20
470	1,0189	633,23	2,7600	403,8	0,8203	266,6	0,5843	9,995	177,07	803,43
480	1,1796	622,74	2,8116	431,2	0,8674	259,5	0,5564	9,184	165,64	785,80
490	1,3488	611,92	2,8643	459,1	0,9143	252,0	0,5289	8,384	155,02	768,31
500	1,5239	600,71	2,9184	487,5	0,9610	244,1	0,5017	7,595	145,13	750,93
510	1,7021	589,06	2,9745	516,3	1,007	235,8	0,4746	6,819	135,89	733,78

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	$\lambda \cdot 10^4$, Вт/(м·К)
520	1,8801	576,91	3,0335	545,6	1,054	227,1	0,4477	6,058	127,20	717,76
530	2,0545	564,18	3,0965	575,6	1,100	217,7	0,4206	5,311	119,02	701,78
540	2,2220	550,74	3,1656	606,1	1,146	207,7	0,3933	4,582	111,25	685,79
550	2,3792	536,45	3,2437	637,3	1,192	196,8	0,3654	3,870	103,86	669,71
560	2,5228	521,12	3,3362	669,3	1,237	184,9	0,3367	3,180	96,774	653,43
570	2,6502	504,43	3,4531	702,3	1,283	171,7	0,3065	2,515	89,928	636,80
580	2,7589	485,92	3,6145	736,5	1,328	156,5	0,2742	1,878	83,261	619,59
590	2,8468	464,82	3,8701	772,4	1,373	138,6	0,2384	1,277	76,688	601,41

Удельная энтальпия газового конденсата Ямбургского месторождения, кДж/кг

Т, К	Давление р, МПа							
	0,1	1,0	3,0	5,0	10	20	40	60
250	-96,45	-95,60	-93,75	-91,92	-87,25	-77,93	-59,11	-40,18
260	-78,01	-77,17	-75,34	-73,52	-68,87	-59,60	-40,86	-21,94
270	-59,13	-58,30	-56,49	-54,65	-50,05	-40,81	-22,14	-3,306
280	-39,84	-39,02	-37,21	-35,40	-30,86	-21,64	-3,084	15,74
290	-20,12	-19,32	-17,50	-15,74	-11,19	-2,067	16,43	35,16
300	0	0,8139	2,576	4,375	8,861	17,90	36,34	55,00
310	20,53	21,32	23,09	24,84	29,28	38,25	56,57	75,24
320	41,48	42,24	43,98	45,70	50,08	59,02	77,23	95,83
330	62,84	63,60	65,30	67,01	71,35	80,18	98,31	116,8
340	84,6	85,35	87,03	88,73	92,99	101,7	119,7	138,1
350	106,7	107,4	109,0	110,7	114,9	123,6	141,4	159,8
360	129,3	130,0	131,6	133,2	137,3	145,9	163,7	182,0
370	152,2	152,9	154,4	156,0	160,1	168,5	186,1	204,4
380	-	177,5	179,0	180,6	184,6	192,9	210,4	228,5
390	-	201,1	202,6	204,1	208,0	216,2	233,5	251,6
400	-	225,2	226,6	228,1	231,9	239,9	257,1	275,1
410	-	249,6	251,0	252,4	256,1	264,0	281,0	298,9
420	-	274,5	275,8	277,2	280,8	288,5	305,3	323,2
430	-	299,6	300,9	302,2	305,7	313,2	329,9	347,6
440	-	325,3	326,8	327,8	331,1	338,4	354,9	372,6
450	-	351,3	352,4	353,5	356,7	363,9	380,1	397,7
460	-	377,7	378,7	379,8	382,8	389,8	405,8	423,2
470	-	404,6	405,4	406,4	409,2	415,9	431,7	449,1
480	-	-	432,5	433,4	436,0	442,4	457,9	475,2
490	-	-	460,0	460,8	463,1	469,3	484,5	501,7
500	-	-	488,0	488,6	490,7	496,5	511,5	528,5
510	-	-	516,3	516,7	518,5	524,0	538,6	555,5
520	-	-	545,0	545,2	546,7	551,7	566,1	582,8
530	-	-	574,4	574,4	575,4	580,0	594,0	610,6
540	-	-	604,2	603,9	604,4	608,5	622,2	638,6
550	-	-	634,6	633,9	633,8	637,4	650,6	666,9
560	-	-	665,6	664,5	663,7	666,8	679,5	695,6
570	-	-	697,5	695,8	694,3	696,6	708,8	724,7
580	-	-	730,3	727,9	725,4	727,0	738,7	754,3
590	-	-	764,4	761,0	757,4	758,2	769,2	784,5

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

Т, К	Давление p, МПа							
	0,1	1,0	3,0	5,0	10	20	40	60
250	-0,2441	-0,2450	-0,2471	-0,2491	-0,2542	-0,2637	-0,2815	-0,2976
260	-0,1954	-0,1963	-0,1984	-0,2005	-0,2056	-0,2155	-0,2335	-0,2499
270	-0,1466	-0,1476	-0,1498	-0,1519	-0,1573	-0,1673	-0,1857	-0,2022
280	-0,0978	-0,0989	-0,1011	-0,1033	-0,1087	-0,1190	-0,1377	-0,1545
290	-0,0489	-0,0509	-0,0523	-0,0546	-0,0601	-0,0107	-0,0898	-0,1068
300	0	-0,0011	-0,0035	-0,0058	-0,0115	-0,0223	-0,0417	-0,0589
310	0,0489	0,0477	0,0452	0,0428	0,0367	0,0258	0,0060	-0,0115
320	0,0977	0,0966	0,0940	0,0915	0,0854	0,0740	0,0538	0,0360
330	0,1466	0,1454	0,1428	0,1402	0,1339	0,1222	0,1014	0,0835
340	0,1954	0,1941	0,1913	0,1886	0,1821	0,1701	0,1489	0,1307
350	0,2441	0,2428	0,2399	0,2371	0,2304	0,2180	0,1963	0,1778
360	0,2927	0,2913	0,2883	0,2854	0,2784	0,2656	0,2433	0,2246
370	0,3413	0,3398	0,3367	0,3336	0,3264	0,3132	0,2905	0,2713
380	-	0,3853	0,3821	0,3789	0,3713	0,3576	0,3343	0,3149
390	-	0,4336	0,4302	0,4269	0,4190	0,4048	0,3809	0,3611
400	-	0,4817	0,4781	0,4746	0,4663	0,4516	0,4270	0,4069
410	-	0,5297	0,5259	0,5222	0,5136	0,4982	0,4730	0,4524
420	-	0,5775	0,5734	0,5696	0,5605	0,5445	0,5185	0,4975
430	-	0,625	0,6207	0,6166	0,6071	0,5904	0,5636	0,5422
440	-	0,6724	0,6678	0,6634	0,6533	0,6359	0,6082	0,5863
450	-	0,7196	0,7147	0,7101	0,6994	0,6811	0,6525	0,6301
460	-	0,7667	0,7614	0,7564	0,7450	0,7259	0,6962	0,6733
470	-	0,8136	0,8078	0,8025	0,7903	0,7702	0,7395	0,7160
480	-	-	0,8540	0,8481	0,8352	0,8139	0,7820	0,7579
490	-	-	0,8999	0,8936	0,8797	0,8572	0,8240	0,7992
500	-	-	0,9453	0,9385	0,9235	0,8996	0,8650	0,8395
510	-	-	0,9901	0,9824	0,9663	0,9410	0,9049	0,8786
520	-	-	1,0356	1,0273	1,0096	0,9826	0,9449	0,9178
530	-	-	1,0800	1,0708	1,0515	1,0226	0,9832	0,9552
540	-	-	0,1241	1,1138	1,0926	1,0617	1,0203	0,9914
550	-	-	1,1680	1,1563	1,1329	1,0996	1,0562	1,0262
560	-	-	1,2104	1,1970	1,1710	1,1352	1,0895	1,0584
570	-	-	1,2533	1,2378	1,2088	1,1701	1,1219	1,0896
580	-	-	1,2944	1,2763	1,2436	1,2016	1,1508	1,1171
590	-	-	1,3340	1,3124	1,2754	1,2298	1,1760	1,1410

Вязкость газового конденсата Ямбургского месторождения, мкПа·с

Т, К	Давление р, МПа							
	0,1	1,0	3,0	5,0	10	20	40	60
250	1961,8	1982,8	2029,7	2076,9	2198,7	2457,6	3044,4	3745,9
260	1542,4	1558,5	1594,2	1630,0	1722,4	1917,2	2351,6	2858,9
270	1252,0	1264,7	1292,9	1321,6	1394,4	1547,0	1883,5	2269,2
280	1041,9	1052,3	1075,6	1099,0	1158,5	1282,3	1552,1	1857,1
290	884,71	893,39	912,77	932,51	982,40	1085,7	1308,7	1556,9
300	763,46	770,86	787,54	804,32	847,16	935,18	1123,5	1331,1
310	667,52	673,94	688,67	703,34	740,52	817,15	979,50	1156,3
320	590,03	595,79	608,82	621,80	654,80	722,24	864,40	1018,0
330	526,31	531,54	543,18	554,90	584,49	644,67	771,04	906,21
340	473,20	477,97	488,47	499,14	525,91	580,36	693,73	814,36
350	428,17	432,48	442,18	451,96	476,45	526,08	629,06	737,63
360	389,56	393,61	402,55	411,56	434,18	479,92	574,17	672,88
370	356,18	359,93	368,27	376,63	397,69	440,08	526,99	617,50
380	-	330,51	338,37	346,21	365,86	405,46	486,24	569,81
390	-	304,60	311,99	319,42	337,98	375,15	450,63	528,32
400	-	281,60	288,65	295,71	313,25	348,44	419,43	492,06
410	-	261,07	267,81	274,57	291,33	324,76	391,88	460,21
420	-	242,64	249,13	255,62	271,67	303,62	367,40	431,96
430	-	226,02	232,29	238,53	254,05	284,72	345,66	407,02
440	-	210,91	217,04	223,09	238,12	267,76	326,26	384,83
450	-	197,16	203,15	209,07	223,72	252,47	308,92	365,06
460	-	184,58	190,47	196,30	210,65	238,69	293,40	347,51
470	-	173,00	178,85	184,62	198,75	226,23	279,53	331,90
480	-	-	168,14	173,88	187,90	214,99	267,15	318,08
490	-	-	158,27	164,01	177,97	204,83	256,13	305,97
500	-	-	149,10	154,89	168,91	195,67	246,45	273,55
510	-	-	140,58	146,46	160,62	187,46	220,26	260,37
520	-	-	132,63	138,64	153,06	180,17	209,71	248,20
530	-	-	125,18	131,39	146,18	160,75	199,98	236,99
540	-	-	118,17	124,65	139,97	152,81	190,95	226,62
550	-	-	111,54	118,40	134,48	145,40	182,59	217,07
560	-	-	105,28	112,64	129,75	138,48	174,81	208,15
570	-	-	99,328	107,39	125,97	132,01	167,56	199,90
580	-	-	93,683	92,583	105,17	125,94	160,79	192,17
590	-	-	88,347	86,575	99,473	120,22	154,44	184,96

Теплопроводность газового конденсата Ямбургского 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	1161,4	1163,6	1168,3	1173,0	1184,4	1206,6	1248,2	1286,6
260	1153,9	1156,2	1161,3	1166,2	1178,5	1202,1	1246,2	1286,9
270	1143,6	1146,1	1151,4	1156,8	1169,7	1194,7	1241,3	1284,2
280	1131,0	1133,6	1139,3	1144,9	1158,7	1185,0	1233,9	1278,9
290	1116,4	1119,2	1125,1	1131,1	1145,6	1173,3	1224,5	1271,3
300	1100,5	1103,3	1109,6	1115,8	1131,0	1160,0	1213,3	1262,0
310	1083,3	1086,3	1092,9	1099,4	1115,3	1145,6	1201,0	1251,2
320	1065,3	1068,5	1075,4	1082,2	1098,8	1130,2	1187,5	1239,4
330	1046,8	1050,1	1057,3	1064,4	1081,7	1114,2	1173,5	1226,8
340	1028,1	1031,5	1038,9	1046,4	1064,3	1098,0	1159,0	1213,7
350	1009,1	1012,6	1020,4	1028,2	1046,7	1081,6	1144,4	1200,3
360	990,16	993,90	1001,9	1009,9	1029,2	1065,2	1129,7	1186,8
370	971,34	975,20	983,62	991,87	1011,8	1048,9	1115,0	1173,3
380	-	956,67	965,48	974,03	994,61	1032,8	1100,5	1159,9
390	-	938,39	947,47	956,38	977,72	1017,0	1086,2	1146,7
400	-	920,33	929,81	939,05	961,03	1001,5	1072,3	1133,7
410	-	902,55	912,40	922,02	944,80	986,46	1058,7	1121,1
420	-	885,08	895,34	905,30	928,82	971,65	1045,3	1108,7
430	-	867,95	878,59	888,87	913,26	957,25	1032,4	1096,7
440	-	851,01	862,17	872,81	898,01	943,26	1019,9	1085,0
450	-	834,40	845,99	857,08	883,14	929,60	1007,7	1073,6
460	-	818,03	830,12	841,68	868,65	916,36	995,91	1062,6
470	-	801,88	814,54	826,57	854,48	903,46	984,45	1051,9
480	-	-	799,15	811,72	840,66	890,96	973,34	1041,5
490	-	-	784,04	797,15	827,12	878,79	962,50	1031,4
500	-	-	769,09	782,78	813,93	866,96	952,05	1021,6
510	-	-	754,32	768,68	800,99	855,45	941,86	1012,2
520	-	-	739,70	754,73	788,35	844,25	931,97	1002,9
530	-	-	725,13	740,97	775,94	833,32	922,37	993,84
540	-	-	710,59	727,34	763,76	822,69	912,99	984,98
550	-	-	696,00	713,77	751,82	812,31	903,87	976,39
560	-	-	681,38	700,28	740,07	802,18	894,94	967,86
570	-	-	666,53	686,78	728,46	792,28	886,19	959,55
580	-	-	651,47	673,26	717,04	782,58	877,61	951,28
590	-	-	635,99	659,67	705,74	773,07	869,14	943,15

Плотность газового конденсата Ямбургского месторождения

Т, К	Плотность ρ , кг/м ³ , при давлении p, МПа							
	0,1	1,0	3,0	5,0	10	20	40	60
250	820,26	820,77	821,89	823,00	825,72	830,94	840,57	849,33
260	812,41	812,95	814,14	815,32	818,19	823,67	833,77	842,91
270	804,54	805,11	806,37	807,61	810,65	816,42	827,00	836,53
280	796,64	797,25	798,58	799,89	803,10	809,18	820,27	830,20
290	788,70	789,35	790,76	792,15	795,54	801,95	813,57	823,92
300	780,73	781,41	782,91	784,38	787,96	794,72	806,90	817,69
310	772,70	773,43	775,02	776,58	780,37	787,50	800,26	811,50
320	764,62	765,40	767,09	768,75	772,76	780,28	793,66	805,36
330	756,49	757,31	759,11	760,87	765,13	773,06	787,08	799,26
340	748,29	749,16	751,08	752,96	757,47	765,84	780,54	793,21
350	740,02	740,95	743,00	744,99	749,78	758,62	774,02	787,21
360	731,67	732,67	734,85	736,97	742,06	751,40	767,54	781,25
370	723,23	724,30	726,63	728,90	734,30	744,17	761,09	775,34
380	-	715,85	718,34	720,76	726,51	736,95	754,66	769,47
390	-	707,30	709,97	712,56	718,68	729,71	748,27	763,65
400	-	698,64	701,51	704,27	710,80	722,48	741,91	757,88
410	-	689,86	692,95	695,91	702,87	715,23	735,59	752,16
420	-	680,95	684,27	687,46	694,89	707,98	729,29	746,48
430	-	671,90	675,48	678,90	686,85	700,72	723,03	740,84
440	-	662,67	666,55	670,24	678,75	693,45	716,80	735,25
450	-	653,27	657,47	661,45	670,58	686,16	710,60	729,71
460	-	643,65	648,23	652,53	662,33	678,86	704,43	724,21
470	-	633,79	638,79	643,46	654,00	671,55	698,30	718,75
480	-	-	629,13	634,22	645,57	664,22	692,19	713,33
490	-	-	619,23	624,78	637,03	656,86	686,11	707,96
500	-	-	609,05	615,13	628,38	649,48	680,05	702,62
510	-	-	598,55	605,23	619,60	642,06	674,02	697,31
520	-	-	587,67	595,04	610,68	634,61	668,01	692,05
530	-	-	576,35	584,54	601,59	627,12	662,02	686,81
540	-	-	564,50	573,66	592,32	619,58	656,05	681,60
550	-	-	552,04	562,34	582,84	611,98	650,09	676,41
560	-	-	538,84	550,52	573,14	604,32	644,13	671,24
570	-	-	524,73	538,12	563,17	596,59	638,18	666,10
580	-	-	509,51	525,02	552,92	588,78	632,22	660,96
590	-	-	492,90	511,10	542,34	580,88	626,26	655,83

Изобарная теплоемкость газового конденсата Ямбургского 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	1,8258	1,8252	1,8240	1,8229	1,8202	1,8157	1,8091	1,8050
260	1,8546	1,8539	1,8526	1,8514	1,8484	1,8435	1,8364	1,8319
270	1,8855	1,8848	1,8833	1,8819	1,8787	1,8733	1,8656	1,8609
280	1,9184	1,9176	1,9160	1,9145	1,9110	1,9051	1,8968	1,8918
290	1,9531	1,9523	1,9505	1,9488	1,9449	1,9386	1,9298	1,9244
300	1,9895	1,9886	1,9867	1,9848	1,9806	1,9737	1,9643	1,9587
310	2,0274	2,0264	2,0243	2,0222	2,0177	2,0102	2,0002	1,9943
320	2,0667	2,0656	2,0632	2,0610	2,0560	2,0480	2,0374	2,0312
330	2,1072	2,1059	2,1034	2,1009	2,0955	2,0868	2,0756	2,0692
340	2,1489	2,1475	2,1447	2,1420	2,1361	2,1268	2,1149	2,1082
350	2,1916	2,1901	2,1870	2,1841	2,1776	2,1676	2,1551	2,1482
360	2,2353	2,2336	2,2302	2,2270	2,2200	2,2092	2,1960	2,1889
370	2,2798	2,2780	2,2741	2,2706	2,2630	2,2514	2,2375	2,2301
380	-	2,3190	2,3148	2,3109	2,3025	2,2901	2,2755	2,2679
390	-	2,3645	2,3599	2,3556	2,3465	2,3332	2,3177	2,3099
400	-	2,4106	2,4054	2,4007	2,3907	2,3764	2,3601	2,3521
410	-	2,4571	2,4512	2,4461	2,4351	2,4196	2,4026	2,3943
420	-	2,5039	2,4974	2,4916	2,4796	2,4629	2,4449	2,4363
430	-	2,5512	2,5439	2,5374	2,5241	2,5061	2,4871	2,4782
440	-	2,5987	2,5903	2,5831	2,5684	2,5489	2,5289	2,5196
450	-	2,6465	2,6370	2,6289	2,6126	2,5914	2,5702	2,5606
460	-	2,6948	2,6839	2,6746	2,6564	2,6334	2,6109	2,6008
470	-	2,7434	2,7309	2,7203	2,7000	2,6748	2,6510	2,6403
480	-	-	2,7779	2,7658	2,7430	2,7154	2,6899	2,6787
490	-	-	2,8251	2,8111	2,7853	2,7551	2,7278	2,7158
500	-	-	2,8726	2,8562	2,8269	2,7936	2,7644	2,7516
510	-	-	2,9207	2,9015	2,8680	2,8312	2,7997	2,7859
520	-	-	2,9695	2,9469	2,9084	2,8676	2,8334	2,8186
530	-	-	3,0201	2,9929	2,9484	2,9029	2,8659	2,8499
540	-	-	3,0733	3,0404	2,9885	2,9378	2,8974	2,8800
550	-	-	3,1310	3,0907	3,0298	2,9729	2,9288	2,9097
560	-	-	3,1965	3,1463	3,0743	3,0103	2,9621	2,9411
570	-	-	3,2766	3,2133	3,1275	3,0553	3,0023	2,9793
580	-	-	3,3857	3,3044	3,2016	3,1198	3,0615	3,0362
590	-	-	3,5621	3,4559	3,3321	3,2393	3,1750	3,1471

5. Заключение

Таблицы теплофизических свойств газового конденсата Ямбургского 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.

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 containing 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 ВИНТИ 20.06.90, №5256-B90.
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.