

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»

А. В. Моисеев

**РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-
ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕВОДОРОДНЫХ
СИСТЕМ, НЕФТЕЙ И НЕФТЕПРОДУКТОВ:
ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ**

Моисеев, А. В.

Расчетные методы определения физико-химических свойств углеводородных систем, нефтей и нефтепродуктов: Примеры и задачи : учеб. пособие / А. В. Моисеев. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КнАГТУ», 2010. – 179 с.

В пособии приведены основные расчетные методы определения важнейших физико-химических параметров и характеристик углеводородных систем (чистых углеводородов, их смесей, нефтей, нефтяных фракций, топлив), примеры расчетов и задачи для самостоятельного решения по дисциплинам «Химия нефти и газа» и «Расчеты химических процессов и реакторов».

Пособие предназначено для студентов специальности 240403 «Химическая технология природных энергоносителей и углеродных материалов» всех форм обучения.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1 Плотность	5
2 Молекулярная масса	21
3 Мольный объем	37
4 Поверхностное натяжение	40
5 Вязкость	46
5.1 Вязкость жидкостей	46
5.2 Вязкость газов и паров	49
6 Характеризующий фактор	64
7 Средняя температура кипения	64
8 Фракционный состав	78
9 Теплоемкость	88
10 Теплота испарения	105
11 Энтальпия	112
12 Теплопроводность	125
13 Давление насыщенных паров	132
14 Коэффициент активности и фугитивность	145
15 Критические параметры	148
15.1 Критическая температура	148
15.2 Критическое давление	150
15.3 Критический объем	153
15.4 Псевдокритические параметры	153
15.5 Приведенные параметры	154
16 Коэффициент сжимаемости	159
17 Константы фазового равновесия	160
Библиографический список	168
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Соотношения единиц международной системы с единицами других систем	169
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Варианты индивидуальных домашних заданий	171

Введение

Моделирование и расчет любого технологического процесса в нефтегазопереработке сопряжен с операциями над большим массивом физико-химических параметров.

Зачастую набор данных, характеризующих материальные потоки, крайне ограничен, что накладывает определенные ограничения на точность расчета и адекватность результатов объективной действительности.

Многие физико-химические характеристики углеводородных систем тесно связаны между собой, что позволяет использовать для их определения расчетные математические или графические методы.

Данное пособие призвано показать многообразие расчетных методов определения физико-химических параметров углеводородных систем (в частности нефтей и нефтепродуктов). В пособии приведены примеры и индивидуальные задания для отработки навыков расчетных процедур.

1. Плотность

Плотность – масса единицы объема

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (1.1)$$

При расчете физико-химических свойств нефтепродуктов принято пользоваться относительной плотностью, представляющей собой отношение плотностей жидкого нефтепродукта и дистиллированной воды при определенных температурах

$$d_{t_1}^{t_2} = \frac{\rho_{\text{нефтепродукта}}^{t_2}}{\rho_{\text{вода}}^{t_1}}, \quad (1.2)$$

где t_2 - температура нефтепродукта, °С;

t_1 - температура воды, °С.

В России стандартными температурами при определении плотности являются для воды 4 °С и для нефтепродуктов 20 °С (d_4^{20}).

В некоторых зарубежных странах за стандартную температуру принята одинаковая температура нефтепродукта и воды, равная 60 °F, что соответствует 15,6 °С (d_{15}^{15}).

Взаимный пересчет значений d_4^{20} и d_{15}^{15} производится с помощью уравнений:

$$d_{15}^{15} = d_4^{20} + \frac{0,0035}{d_4^{20}}, \quad (1.3)$$

$$d_{15}^{15} = 0,0093 + 0,994d_4^{20}, \quad (1.4)$$

$$d_{15}^{15} = d_4^{20} + 5\alpha, \quad (1.5)$$

где α - средняя температурная поправка на 1 °С, которая вычисляется по формуле

$$\alpha = 0,001828 - 0,00132d_4^{20} \quad (1.6)$$

или определяется по таблице

Средние температурные поправки α для нефтепродуктов

Таблица 1.1

d_4^{20}	α	d_4^{20}	α	d_4^{20}	α
0,6700-0,6799	0,000937	0,7800-0,7899	0,000792	0,8900-0,8999	0,000647
0,6800-0,6899	0,000924	0,7900-0,7999	0,000778	0,9000-0,9099	0,000633
0,6900-0,6999	0,000910	0,8000-0,8099	0,000765	0,9100-0,9199	0,000620
0,7000-0,7099	0,000897	0,8100-0,8199	0,000752	0,9200-0,9299	0,000607
0,7100-0,7199	0,000884	0,8200-0,8299	0,000738	0,9300-0,9399	0,000594
0,7200-0,7299	0,000870	0,8300-0,8399	0,000725	0,9400-0,9499	0,000581
0,7300-0,7399	0,000857	0,8400-0,8499	0,000712	0,9500-0,9599	0,000567
0,7400-0,7499	0,000844	0,8500-0,8599	0,000699	0,9600-0,9699	0,000554
0,7500-0,7599	0,000831	0,8600-0,8699	0,000686	0,9700-0,9799	0,000541
0,7600-0,7699	0,000818	0,8700-0,8799	0,000673	0,9800-0,9899	0,000522
0,7700-0,7799	0,000805	0,8800-0,8899	0,000660	0,9900-1,0000	0,000515

Температурная зависимость плотности нефтей и нефтепродуктов описывается уравнениями

- Д. И. Менделеева (в интервале температур от 0 до 150 °С)

$$d_4^t = d_4^{20} - \alpha(t - 20); \quad (1.7)$$

- А. К. Мановяна (до 300 °С)

$$d_4^t = 1000d_4^{20} - \frac{0,58}{d_4^{20}}(t - 20) - \frac{|t - 1200(d_4^{20} - 0,68)|}{1000}(t - 20); \quad (1.8)$$

-энтропийно-информационной модели

$$d_{жс} = d_4^{20} \tau^{f(\tau, d_4^{20})}, \quad (1.9)$$

$$f(\tau, d_4^{20}) = -0,0022 - \frac{0,0103}{\tau} - 0,12344\tau - 0,81529d_4^{20} + \quad (1.10)$$

$$+ 0,7498(d_4^{20})^2 + 4,5 \cdot 10^{-5} \tau^*, \quad (1.11)$$

$$\tau = \frac{T}{293,15},$$

$$\tau^* = \frac{T_{кип}^0}{100}. \quad (1.12)$$

Для определения относительной плотности жидких нефтепродуктов при высоких температурах можно воспользоваться графиками, представленными на рисунках 1.1 и 1.2.

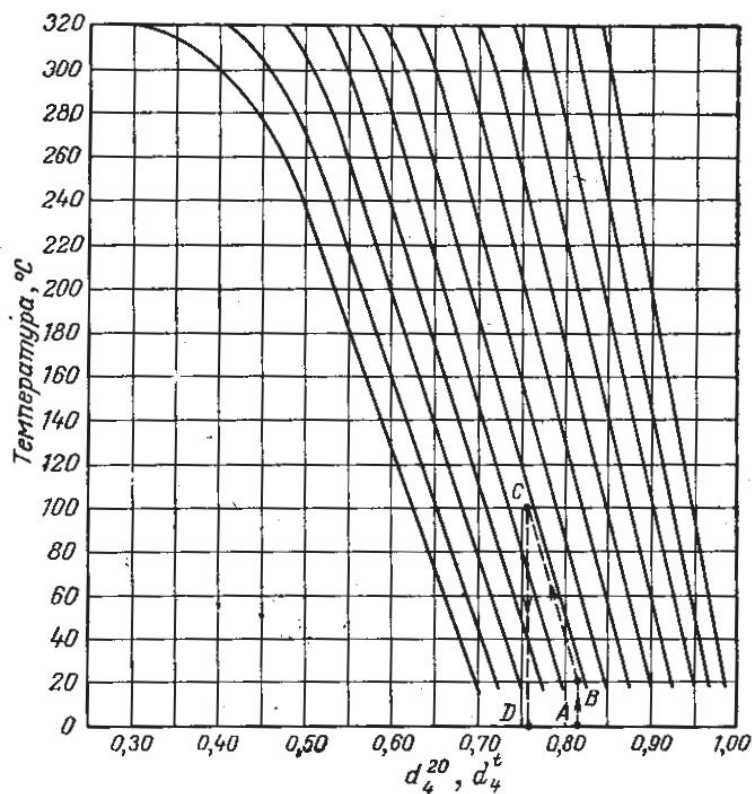


Рисунок 1.1 – График для определения относительной плотности жидких нефтепродуктов d_4^t при известной их плотности d_4^{20}

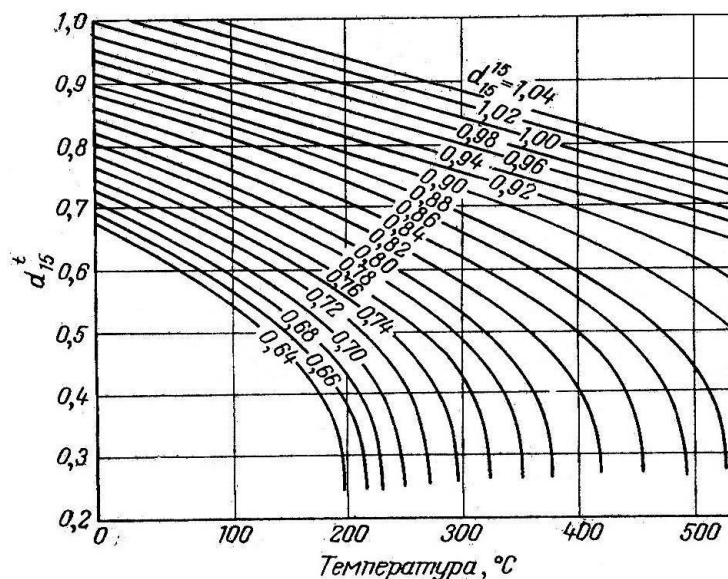


Рисунок 1.2 – График для определения относительной плотности жидких нефтепродуктов d'_{15} при высоких температурах при известной их плотности d_{15}^{15}

Абсолютная плотность жидкого нефтепродукта при температуре T (К) определяется по уравнению

$$\rho_T = \frac{\rho_{293}}{1 + \beta(T - 293)}, \quad (1.13)$$

где β - коэффициент объемного расширения, определяемый по графику на рисунке 1.3.

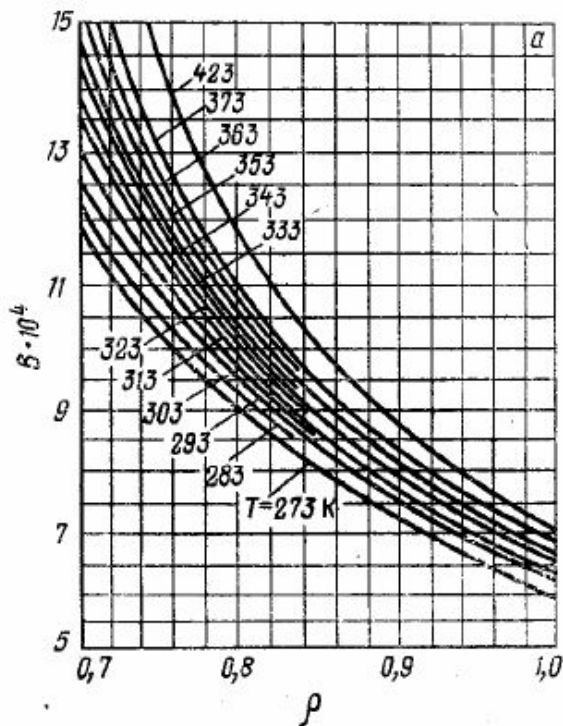


Рисунок 1.3 – Зависимость коэффициента объемного расширения нефтепродуктов от относительной плотности (по Крэггу)

или по уравнению (для нефтепродуктов первичной перегонки $d_{15}^{15} = 0,51 - 1,0$; не содержащих ароматических углеводородов, смолисто-асфальтеновых веществ и твердого парафина)

$$\beta = A + 2B(t - 15), \quad (1.14)$$

$$\lg(A \cdot 10^5) = 1,09 + \frac{0,7}{d_{15}^{15}}, \quad (1.15)$$

$$\lg(B \cdot 10^8) = \frac{2,10}{d_{15}^{15}} - 0,69. \quad (1.16)$$

Также для расчета коэффициента объемного расширения нефтепродуктов применима формула

$$\beta = \frac{0,04314}{(t_{кр} - t)^{0,641}}, \quad (1.17)$$

где $t_{кр}$ - критическая температура, °С.

Для вычисления относительной плотности узких нефтяных фракций можно рекомендовать эмпирические формулы:

- зависимость относительной плотности фракции от её средней температуры кипения (формула ГрозНИИ)

$$d_4^{20} = d_0 \left(\frac{t_{cp}}{100} \right)^n, \quad (1.18)$$

где $d_0 = 0,65 + 0,09(d_4^{20})_{нефти}$;

$$n = 0,13 - 0,0011t_{зн} ;$$

$t_{зн}$ - температура застывания нефти, °С;

при этом можно принимать для малосернистых нефтей $d_0 = 0,736$ и $n = 0,13$, а для сернистых - $d_0 = 0,722$ и $n = 0,16$;

- зависимость относительной плотности фракции от её коэффициента рефракции (формула БашНИИНП)

$$d_4^{20} = \sqrt{2,841n_D^{20} - 3,468}, \quad (1.19)$$

где n_D^{20} - коэффициент рефракции узкой фракции;

- формулу Ставцева и Выричек

$$d_4^{20} = \frac{M}{a_1 + a_2 T_{cp.об}^{a_3}}, \quad (1.20)$$

где $T_{cp.об}$ - средняя объемная температура кипения, К;

$$a_1 = 0,0694297 ;$$

$$a_2 = 0,5078154 ;$$

$$a_3 = 2,394693 ;$$

- двухпараметрическую зависимость относительной плотности от молекулярной массы и коэффициента рефракции

$$d_4^{20} = a_0 + a_1 \sqrt{n_D^{20}} + a_2 \ln \frac{M}{100}, \quad (1.21)$$

где $a_0 = -3,128806$;

$a_1 = 3,251704$;

$a_2 = 3,414347 \cdot 10^{-2}$;

- трехпараметрическую зависимость относительной плотности от молекулярной массы, коэффициента рефракции и средней объемной температуры кипения

$$d_4^{20} = a_0 + a_1 \sqrt{n_D^{20}} + a_2 \ln \frac{M}{100} + a_3 \ln \frac{T_{cp.ob.}}{100}, \quad (1.22)$$

где $a_0 = -2,84009$;

$a_1 = 2,773804$;

$a_2 = -5,380611 \cdot 10^{-2}$;

$a_3 = 0,2114023$.

Средняя относительная плотность смеси жидких компонентов определяется по правилу аддитивности

$$d_{см} = \frac{V_1 d_1 + V_2 d_2 + \dots + V_n d_n}{V_1 + V_2 + \dots + V_n} = \varphi_1 d_1 + \varphi_2 d_2 + \dots + \varphi_n d_n, \quad (1.23)$$

$$d_{см} = \frac{G_1 + G_2 + \dots + G_n}{\frac{G_1}{d_1} + \frac{G_2}{d_2} + \dots + \frac{G_n}{d_n}} = \frac{1}{\frac{\omega_1}{d_1} + \frac{\omega_2}{d_2} + \dots + \frac{\omega_n}{d_n}}, \quad (1.24)$$

где d_1, d_2, \dots, d_n - относительные плотности компонентов смеси;

V_1, V_2, \dots, V_n - объёмы компонентов, м³;

$\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ - объёмные доли компонентов;

G_1, G_2, \dots, G_n - массы компонентов, кг;

$\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ - массовые доли компонентов.

Абсолютная плотность газов и паров (кг/м³) вычисляется по формуле

$$\rho = \frac{M}{22,4} \cdot \frac{T_0 P}{T P_0}, \quad (1.25)$$

где M - молярная масса газа или пара, кг/кмоль;

$T_0 = 273$ - нормальная температура, К;

T - температура, при которой определяется плотность, К;

$P_0 = 101325$ - нормальное давление, Па;

P - давление, при котором определяется плотность, Па.

Относительная плотность газа равна отношению массы m газа, занимающего объём V при некоторой температуре и давлении, к массе m_1 воздуха, занимающего тот же объём V при тех же температуре и давлении

$$d = \frac{m}{m_1}. \quad (1.26)$$

Плотность газовой смеси, состоящей из n компонентов определяется по уравнению

$$\rho_{см} = \sum_{i=1}^n y_i \rho_i, \quad (1.27)$$

где y_i - объемная доля компонента в газовой смеси (при нормальных условиях объемная доля может быть заменена на мольную);

ρ_i - плотность чистого компонента газовой смеси, кг/м³.

Определение плотности жидких нефтяных фракций, находящихся под давлением до 1,5 МПа можно проводить по номограммам на рисунках 1.4 и 1.5.

Пример 1.1. Определить относительную плотность нефтепродукта d_{15}^{15} по известной плотности $d_4^{20} = 0,7610$.

Решение. Для решения задачи воспользуемся несколькими уравнениями и сравним результаты.

По уравнению (1.3):

$$d_{15}^{15} = d_4^{20} + \frac{0,0035}{d_4^{20}} = 0,7610 + \frac{0,0035}{0,7610} = 0,7656.$$

По уравнению (1.4):

$$d_{15}^{15} = 0,0093 + 0,994d_4^{20} = 0,0093 + 0,994 \cdot 0,7610 = 0,7657.$$

Для расчета относительной плотности d_{15}^{15} по уравнению (1.5) необходимо вычислить значение коэффициента α по уравнению (1.6) или определить по таблице 1.1:

$$\alpha = 0,001828 - 0,00132d_4^{20} = 0,001828 - 0,00132 \cdot 0,7610 = 0,000823$$

или $\alpha = 0,000818$

$$d_{15}^{15} = d_4^{20} + 5\alpha = 0,7610 + 5 \cdot 0,000823 = 0,7651,$$

$$d_{15}^{15} = d_4^{20} + 5\alpha = 0,7610 + 5 \cdot 0,000818 = 0,7651.$$

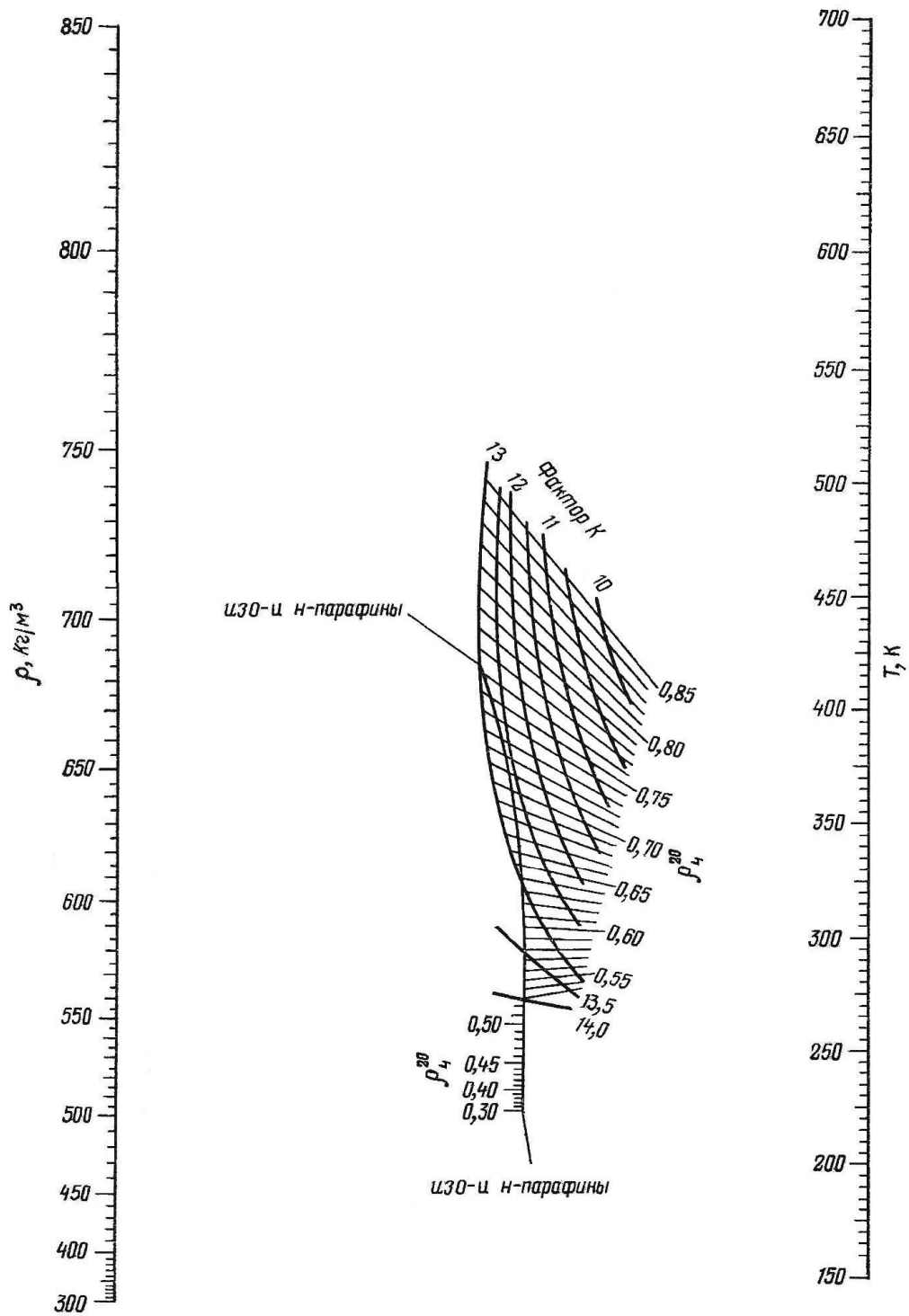


Рисунок 1.4 – Зависимость плотности жидких углеводородов и нефтяных фракций от температуры и характеризующего фактора при постоянном давлении (для низких плотностей)

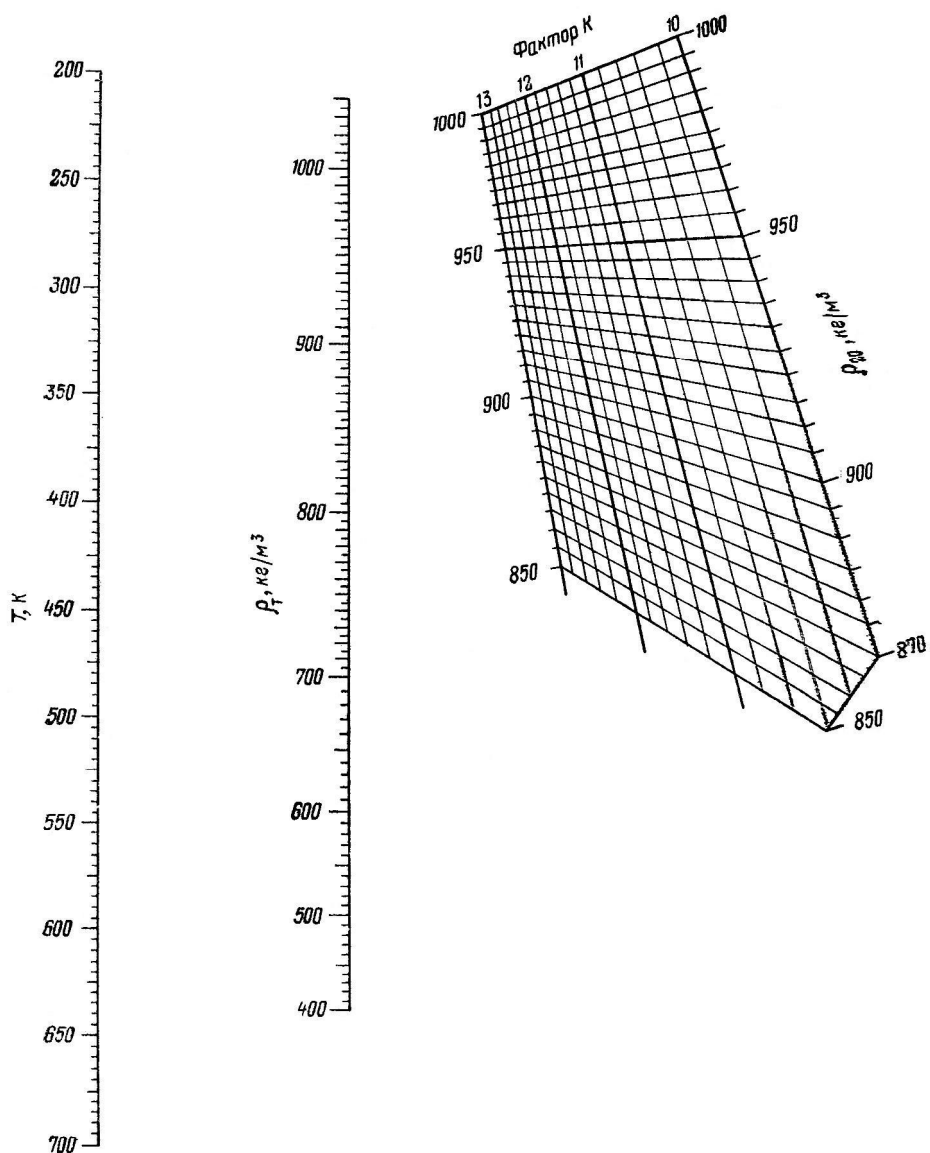


Рисунок 1.5 – Зависимость плотности жидких углеводородов и нефтяных фракций от температуры и характеризующего фактора при постоянном давлении (для высоких плотностей)

Пример 1.2. Определить абсолютную плотность нефтепродукта, имеющего относительную плотность $d_4^{20} = 0,7330$, при $72\text{ }^\circ\text{C}$.

Решение. По уравнению Мановяна (1.8):

$$\begin{aligned}
 d^{72} &= 1000d_4^{20} - \frac{0,58}{d_4^{20}}(t - 20) - \frac{|t - 1200(d_4^{20} - 0,68)|}{1000}(t - 20) = \\
 &= 1000 \cdot 0,7330 - \frac{0,58}{0,7330}(72 - 20) - \frac{|72 - 1200(0,7330 - 0,68)|}{1000}(72 - 20) = \\
 &= 691,42
 \end{aligned}$$

По графику, изображенному на рисунке $d_4^{72} = 0,725$, тогда $d^{72} = 1000 \cdot 0,725 = 725 \text{ кг/м}^3$.

Пример 1.3. Определить абсолютную плотность углекислого газа при температуре 45°C и давлении 120000 Па .

Решение. По уравнению (1.25):

$$\rho = \frac{M}{22,4} \cdot \frac{T_0 P}{T P_0} = \frac{44}{22,4} \cdot \frac{273 \cdot 120000}{(45 + 273) \cdot 101325} = 1,997 \text{ кг/м}^3.$$

Пример 1.4. Определить плотность смеси, состоящей из 42% (масс.) нефтепродукта А плотностью $d_4^{20} = 0,7500$ и нефтепродукта Б плотностью $d_4^{20} = 0,8100$.

Решение. По уравнению (1.24):

$$d_{см} = \frac{1}{\frac{\omega_A}{d_A} + \frac{\omega_B}{d_B}} = \frac{1}{\frac{0,42}{0,7500} + \frac{1 - 0,42}{0,8100}} = 0,784.$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Определить относительную плотность нефтепродукта d_4^{20} по его относительной плотности $d_{15}^{15} = 0,7321$.
2. Определить относительную плотность нефтепродукта d_{15}^{15} по его относительной плотности $d_4^{20} = 0,689$.
3. Определить относительную плотность нефтепродукта d_4^{20} по его относительной плотности $d_{15}^{15} = 0,8232$.
4. Определить относительную плотность нефтепродукта d_{15}^{15} по его относительной плотности $d_4^{20} = 0,761$.
5. Определить относительную плотность нефтепродукта d_4^{20} по его относительной плотности $d_{15}^{15} = 0,8950$.

24. Определить относительную плотность нефтепродукта d_{15}^{15} по его относительной плотности $d_4^{20} = 0,823$.
25. Определить относительную плотность нефтепродукта d_4^{20} по его относительной плотности $d_{15}^{15} = 0,9012$.
26. Определить относительную плотность нефтепродукта d_{15}^{15} по его относительной плотности $d_4^{20} = 0,860$.
27. Определить относительную плотность нефтепродукта d_4^{20} по его относительной плотности $d_{15}^{15} = 0,8312$.
28. Определить относительную плотность нефтепродукта d_{15}^{15} по его относительной плотности $d_4^{20} = 0,746$.
29. Определить относительную плотность нефтепродукта d_4^{20} по его относительной плотности $d_{15}^{15} = 0,7887$.
30. Определить относительную плотность нефтепродукта d_{15}^{15} по его относительной плотности $d_4^{20} = 0,92$.
31. Относительная плотность нефтепродукта $d_4^{20} = 0,721$. Найти его относительную плотность при $65\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
32. Относительная плотность нефтепродукта $d_{15}^{15} = 0,744$. Найти его относительную плотность при $30\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
33. Относительная плотность нефтепродукта $d_4^{20} = 0,820$. Найти его относительную плотность при $50\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
34. Относительная плотность нефтепродукта $d_{15}^{15} = 0,75$. Найти его относительную плотность при $60\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
35. Относительная плотность нефтепродукта $d_4^{20} = 0,692$. Найти его относительную плотность при $55\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
36. Относительная плотность нефтепродукта $d_{15}^{15} = 0,911$. Найти его относительную плотность при $65\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
37. Относительная плотность нефтепродукта $d_4^{20} = 0,723$. Найти его относительную плотность при $40\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
38. Относительная плотность нефтепродукта $d_{15}^{15} = 0,885$. Найти его относительную плотность при $90\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
39. Относительная плотность нефтепродукта $d_4^{20} = 0,825$. Найти его относительную плотность при $85\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
40. Относительная плотность нефтепродукта $d_{15}^{15} = 0,760$. Найти его относительную плотность при $70\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
41. Относительная плотность нефтепродукта $d_4^{20} = 0,813$. Найти его относительную плотность при $72\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
42. Относительная плотность нефтепродукта $d_{15}^{15} = 0,920$. Найти его относительную плотность при $110\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.

43. Относительная плотность нефтепродукта $d_4^{20} = 0,742$. Найти его относительную плотность при $52\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
44. Относительная плотность нефтепродукта $d_{15}^{15} = 0,920$. Найти его относительную плотность при $110\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
45. Относительная плотность нефтепродукта $d_4^{20} = 0,692$. Найти его относительную плотность при $46\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
46. Относительная плотность нефтепродукта $d_{15}^{15} = 0,863$. Найти его относительную плотность при $90\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
47. Относительная плотность нефтепродукта $d_4^{20} = 0,795$. Найти его относительную плотность при $85\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
48. Относительная плотность нефтепродукта $d_{15}^{15} = 0,840$. Найти его относительную плотность при $90\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
49. Относительная плотность нефтепродукта $d_4^{20} = 0,725$. Найти его относительную плотность при $75\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
50. Относительная плотность нефтепродукта $d_{15}^{15} = 0,915$. Найти его относительную плотность при $95\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
51. Относительная плотность нефтепродукта $d_4^{20} = 0,875$. Найти его относительную плотность при $65\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
52. Относительная плотность нефтепродукта $d_{15}^{15} = 0,885$. Найти его относительную плотность при $105\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
53. Относительная плотность нефтепродукта $d_4^{20} = 0,727$. Найти его относительную плотность при $87\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
54. Относительная плотность нефтепродукта $d_{15}^{15} = 0,792$. Найти его относительную плотность при $68\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
55. Относительная плотность нефтепродукта $d_4^{20} = 0,823$. Найти его относительную плотность при $77\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
56. Относительная плотность нефтепродукта $d_{15}^{15} = 0,844$. Найти его относительную плотность при $56\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
57. Относительная плотность нефтепродукта $d_4^{20} = 0,923$. Найти его относительную плотность при $120\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
58. Относительная плотность нефтепродукта $d_{15}^{15} = 0,724$. Найти его относительную плотность при $50\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
59. Относительная плотность нефтепродукта $d_4^{20} = 0,720$. Найти его относительную плотность при $60\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
60. Относительная плотность нефтепродукта $d_{15}^{15} = 0,869$. Найти его относительную плотность при $70\text{ }^\circ\text{C}$ двумя способами.
61. Определить абсолютную плотность метана при $20\text{ }^\circ\text{C}$ и 780 мм рт. ст.
62. Определить абсолютную плотность этана при $75\text{ }^\circ\text{C}$ и $1,2\text{ кгс/см}^2$.
63. Определить абсолютную плотность пропана при $140\text{ }^\circ\text{C}$ и 12395 кгс/м^2 .

64. Определить абсолютную плотность н-бутана при 200 °С и 1900 мм рт. ст.
65. Определить абсолютную плотность пропилена при 130 °С и 1,1 кгс/см².
66. Определить абсолютную плотность углеводородного газа, молекулярная масса которого равна 58, при 80 °С и атмосферном давлении.
67. Определить абсолютную плотность газов гидроочистки ДТ (молекулярная масса равна 34) при 200 °С и 0,4 МПа.
68. Определить абсолютную плотность крекинг-газа при 300 °С и 1000 мм рт. ст, если его молекулярная масса равна 30.
69. Определить абсолютную плотность газа гидрокрекинга при 270 °С и 1,7 кгс/см², если его молекулярная масса равна 35.
70. Определить абсолютную плотность газа пиролиза при 400 °С и 14000 кгс/м², если его молекулярная масса равна 25.
71. Определить абсолютную плотность метана при 65 °С и 1,2 кгс/см².
72. Определить абсолютную плотность этана при 100 °С и 800 мм рт. ст.
73. Определить абсолютную плотность пропана при 120 °С и 1030 мм рт. ст.
74. Определить абсолютную плотность н-бутана при 180 °С и 11000 кгс/м².
75. Определить абсолютную плотность пропилена при 125 °С и 1,4 кгс/см².
76. Определить абсолютную плотность углеводородного газа, молекулярная масса которого равна 58, при 90 °С и 775 мм рт. ст.
77. Определить абсолютную плотность газов гидроочистки ДТ (молекулярная масса равна 34) при 300 °С и 0,25 МПа.
78. Определить абсолютную плотность крекинг-газа при 270 °С и 11200 кгс/м², если его молекулярная масса равна 30.
79. Определить абсолютную плотность газа гидрокрекинга при 350 °С и 900 мм рт. ст., если его молекулярная масса равна 35.
80. Определить абсолютную плотность газа пиролиза при 200 °С и 1,25 кгс/см², если его молекулярная масса равна 25.
81. Определить абсолютную плотность метана при 60 °С и 18000 кгс/м².
82. Определить абсолютную плотность этана при 175 °С и 1,85 кгс/см².
83. Определить абсолютную плотность пропана при 150 °С и 1,24 кгс/см².
84. Определить абсолютную плотность н-бутана при 170 °С и 1400 мм рт. ст.
85. Определить абсолютную плотность пропилена при 100 °С и 1,0 кгс/см².
86. Определить абсолютную плотность углеводородного газа, молекулярная масса которого равна 58, при 120 °С и атмосферном давлении.
87. Определить абсолютную плотность газов гидроочистки ДТ (молекулярная масса равна 34) при 240 °С и 0,5 МПа.
88. Определить абсолютную плотность крекинг-газа при 200 °С и 1500 мм рт. ст, если его молекулярная масса равна 30.

89. Определить абсолютную плотность газа гидрокрекинга при 370 °С и 1,72 кгс/см², если его молекулярная масса равна 35.
90. Определить абсолютную плотность газа пиролиза при 300 °С и 12000 кгс/м², если его молекулярная масса равна 25.
91. Определить относительную плотность смеси, состоящей из 150 кг бензина плотностью $d_{15}^{15} = 0,7320$ и 140 кг керосина плотностью $d_{15}^{15} = 0,8072$.
92. Определить относительную плотность смеси, содержащей (в % масс.) 25 бензина плотностью $d_4^{20} = 0,74$; 25 керосина плотностью $d_4^{20} = 0,82$ и 50 дизельной фракции плотностью $d_4^{20} = 0,85$.
93. Смесь состоит из 2,2 м³ этана; 7,5 м³ пропана и 5,3 м³ н-бутана (при н.у.). Определить абсолютную плотность газовой смеси.
94. Смесь узких нефтяных фракций содержит 3 компонента, содержания которых равны соответственно (% об.) 22, 18 и 60. Плотности их d_4^{20} равны соответственно 0,75; 0,7619 и 0,775. Найти относительную плотность смеси.
95. Смесь состоит из трех компонентов массами 60, 80 и 110 кг, имеющих плотность d_4^{30} равную соответственно 0,72; 0,78 и 0,81. Определить плотность смеси d_4^{20} .
96. Определить относительную плотность смеси, состоящей из 120 кг бензина плотностью $d_{15}^{15} = 0,7249$; 120 кг керосина плотностью $d_{15}^{15} = 0,804$ и 100 кг атмосферного газойля плотностью $d_{15}^{15} = 0,8418$.
97. Определить относительную плотность смеси, содержащей (в % масс.) 35 бензина плотностью $d_4^{20} = 0,72$ и 65 керосина плотностью $d_4^{20} = 0,83$.
98. Смесь состоит из 5 м³; 3,12 м³ этана; 4,3 м³ пропана и 1,1 м³ н-бутана (при н.у.). Определить абсолютную плотность газовой смеси.
99. Смесь узких нефтяных фракций содержит 3 компонента, содержания которых равны соответственно (% об.) 32, 17 и 51. Плотности их d_{15}^{15} равны соответственно 0,7944; 0,7958 и 0,7974. Найти относительную плотность смеси d_4^{20} .
100. Смесь состоит из трех компонентов содержанием (% масс.) 20, 25 и 55, имеющих плотность d_4^{40} равную соответственно 0,69; 0,75 и 0,83. Определить плотность смеси d_4^{20} .
101. Определить относительную плотность смеси, состоящей из 20 кг бензина плотностью $d_{15}^{15} = 0,7389$ и 140 кг керосина плотностью $d_{15}^{15} = 0,8081$.
102. Определить относительную плотность смеси, содержащей (в % масс.) 45 бензина плотностью $d_4^{20} = 0,71$; 25 керосина плотностью $d_4^{20} = 0,81$ и 30 дизельной фракции плотностью $d_4^{20} = 0,87$.

103. Смесь состоит из 4,2 м³ этана; 2,5 м³ пропана и 7,3 м³ н-бутана (при н.у.). Определить абсолютную плотность газовой смеси.
104. Смесь узких нефтяных фракций содержит 3 компонента, содержания которых равны соответственно (% об.) 13, 17 и 70. Плотности их d_4^{20} равны соответственно 0,7999; 0,8025 и 0,8064. Найти относительную плотность смеси.
105. Смесь состоит из трех компонентов массами 40, 45 и 95 кг, имеющих плотность d_4^{35} равную соответственно 0,71; 0,72 и 0,75. Определить плотность смеси d_4^{20} .
106. Определить относительную плотность смеси, состоящей из 98 кг бензина плотностью $d_{15}^{15} = 0,7279$; 100 кг керосина плотностью $d_{15}^{15} = 0,8022$ и 150 кг атмосферного газойля плотностью $d_{15}^{15} = 0,8468$.
107. Определить относительную плотность смеси, содержащей (в % масс.) 36 бензина плотностью $d_4^{20} = 0,756$ и 64 керосина плотностью $d_4^{20} = 0,845$.
108. Смесь состоит из 2,23 м³; 4,71 м³ этана; 8,5 м³ пропана и 5,58 м³ н-бутана (при н.у.). Определить абсолютную плотность газовой смеси.
109. Смесь узких нефтяных фракций содержит 3 компонента, содержания которых равны соответственно (% об.) 30, 30 и 40. Плотности их d_{15}^{15} равны соответственно 0,8117; 0,8202 и 0,8301. Найти относительную плотность смеси d_4^{20} .
110. Смесь состоит из трех компонентов содержанием (% масс.) 15, 25 и 60, имеющих плотность d_4^{50} равную соответственно 0,71; 0,73 и 0,81. Определить плотность смеси d_4^{20} .
111. Определить относительную плотность смеси, состоящей из 55 кг бензина плотностью $d_{15}^{15} = 0,7711$ и 100 кг керосина плотностью $d_{15}^{15} = 0,8128$.
112. Определить относительную плотность смеси, содержащей (в % масс.) 10 бензина плотностью $d_4^{20} = 0,76$; 28 керосина плотностью $d_4^{20} = 0,83$ и 62 дизельной фракции плотностью $d_4^{20} = 0,866$.
113. Смесь состоит из 10,2 м³ этана; 5,5 м³ пропана и 6,2 м³ н-бутана (при н.у.). Определить абсолютную плотность газовой смеси.
114. Смесь узких нефтяных фракций содержит 3 компонента, содержания которых равны соответственно (% об.) 25, 35 и 40. Плотности их d_4^{20} равны соответственно 0,843; 0,849 и 0,851. Найти относительную плотность смеси.
115. Смесь состоит из трех компонентов массами 160, 80 и 125 кг, имеющих плотность d_4^{25} равную соответственно 0,71; 0,75 и 0,80. Определить плотность смеси d_4^{20} .

- 116.** Определить относительную плотность смеси, состоящей из 50 кг бензина плотностью $d_{15}^{15} = 0,732$; 120 кг керосина плотностью $d_{15}^{15} = 0,8072$ и 100 кг атмосферного газойля плотностью $d_{15}^{15} = 0,8348$.
- 117.** Определить относительную плотность смеси, содержащей (в % масс.) 25 бензина плотностью $d_4^{20} = 0,756$ и 65 керосина плотностью $d_4^{20} = 0,842$.
- 118.** Смесь состоит из 2,35 м³; 4,71 м³ этана; 4,82 м³ пропана и 10,1 м³ н-бутана (при н.у.). Определить абсолютную плотность газовой смеси.
- 119.** Смесь узких нефтяных фракций содержит 3 компонента, содержания которых равны соответственно (% об.) 40, 20 и 40. Плотности их d_{15}^{15} равны соответственно 0,7512; 0,7573 и 0,7661. Найти относительную плотность смеси d_4^{20} .
- 120.** Смесь состоит из трех компонентов содержанием (% масс.) 35, 35 и 30, имеющих плотность d_4^{40} равную соответственно 0,716; 0,721 и 0,799. Определить плотность смеси d_4^{20} .

2. Молекулярная масса

Молекулярная масса нефтей и получаемых из них нефтепродуктов – один из важнейших показателей, широко используемый в технологических расчетах.

Молекулярная масса индивидуальных веществ рассчитывается по их химическим формулам и атомным массам элементов, входящих в состав молекул.

Нефть и нефтепродукты характеризуются средней молекулярной массой, так как в их состав входит большое число разнородных соединений.

Между молекулярной массой и температурой кипения нефтяных фракций существует определенная зависимость: чем больше молекулярная масса нефтяной фракции, тем выше её температура кипения.

В расчетной практике молекулярную массу наиболее часто определяют по эмпирическим формулам. Наибольшее применение нашла общая формула, предложенная Б. П. Войновым

$$M = a + bt_{\text{ср.мол.}} + ct_{\text{ср.мол.}}^2, \quad (2.1)$$

где $t_{\text{ср.мол.}}$ - средняя молекулярная температура кипения продукта, °С,

a , b и c - коэффициенты.

Для парафиновых углеводородов, в частности, формула Б. П. Войнова имеет вид

$$M = 60 + 0,3t_{\text{ср.мол.}} + 0,001t_{\text{ср.мол.}}^2, \quad (2.2)$$

$$M = 52,63 - 0,246T_{\text{ср.мол.}} + 0,001T_{\text{ср.мол.}}^2. \quad (2.3)$$

Для нефтяных фракций с введением характеризующего фактора применима формула Войнова-Эйгенсона

$$M = 7K - 21,5 + (0,76 - 0,04K) \cdot t_{\text{ср.мол.}} + (0,0003K - 0,00245) \cdot t_{\text{ср.мол.}}^2, \quad (2.4)$$

Формула Войнова была уточнена А. С. Эйгенсоном путем подбора коэффициентов a , b и c в зависимости от значения характеризующего фактора

Коэффициенты к формуле Войнова-Эйгенсона

Таблица 2.1

Характеризующий фактор К	a	b	c
10,0	56	0,230	0,00080
10,5	57	0,240	0,00090
11,0	59	0,240	0,00100
11,5	63	0,225	0,00115
12,0	69	0,180	0,00140

Для ароматических углеводородов пригодна формула

$$M = -8,8 + 0,06T + 0,00055T^2. \quad (2.5)$$

Для узких нефтяных фракций молекулярную массу можно определять по формуле БашНИИНП

$$M = (160 - 5K) - 0,075t_{\text{ср.мол.}} + 0,000156Kt_{\text{ср.мол.}}^2. \quad (2.6)$$

При наличии в качестве исходного данного коэффициента рефракции можно использовать формулу Р. Херша

$$\lg M = 1,939436 + 0,0019764t_{\text{ср.мол.}} + \lg(2,1500 - n_D^{20}). \quad (2.7)$$

Для нормальных парафиновых углеводородов пользуются уравнением Эдвина – Кокса

$$\lg T_{\text{ср.мол.}} = 1,07575 + 0,949 \lg M - 0,101(\lg M)^2. \quad (2.8)$$

Для нефтей и нефтепродуктов Бриджман предложил зависимость между молекулярной массой и относительной плотностью

$$M = \frac{39d_4^{20}}{1 - d_4^{20}} \quad (2.9)$$

и логарифмическую зависимость между молекулярной массой и средней температурой кипения

$$\lg M = 2,51 \lg(t + 393) - 4,7523. \quad (2.10)$$

Из имеющихся двухпараметрических зависимостей можно рекомендовать корреляцию Кесслера и Ли

$$\begin{aligned} M = & -12272,6 + 9486,4d_{15}^{15} + (8,37414 - 5,99166d_{15}^{15})T_{\text{ср.об.}} + \\ & + \left[1 - 0,77084d_{15}^{15} - 0,02058(d_{15}^{15})^2 \right] \cdot \left(0,7465 - \frac{222,47}{T_{\text{ср.об.}}} \right) \cdot \frac{10^7}{T_{\text{ср.об.}}} + \\ & + \left[1 - 0,80882d_{15}^{15} + 0,2226(d_{15}^{15})^2 \right] \cdot \left(0,32284 - \frac{17,355}{T_{\text{ср.об.}}} \right) \cdot \frac{10^{12}}{T_{\text{ср.об.}}^3} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Сим и Дюберт предложили другую двухпараметрическую зависимость

$$M = 5,805 \cdot 10^{-5} T^{2,3776} (d_{15}^{15})^{-0,9371}. \quad (2.12)$$

Существует зависимость, предложенная Риизи

$$\ln M = -11,985 + 2,4966 \ln T - 1,174 \ln d_{15}^{15}. \quad (2.13)$$

Для расчетов средней молекулярной массы бензинов и их фракций применяют формулу

$$M = 0,4T_{50} - 45, \quad (2.14)$$

где T_{50} - температура выкипания 50 % бензина, К.

Также существует приближенная формула Крэга

$$M = \frac{44,29d_{15}^{15}}{1,03 - d_{15}^{15}}. \quad (2.15)$$

Для расчетов средней молекулярной массы любых углеводородов и нефтяных фракций существует формула

$$M = 3,9802\tau^{3,1612 + \frac{1,3014}{\tau} + 0,0287\tau - 2,3986d_4^{20} + 1,0844(d_4^{20})^2}, \quad (2.16)$$

где $\tau = \frac{T_{кип}}{100}$ - приведенная температура кипения.

Среднюю молекулярную массу смеси известного состава рассчитывают по формулам

$$M = \sum_{i=1}^n M_i x'_i, \quad (2.17)$$

$$M = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{M_i}}, \quad (2.18)$$

или

$$M = M_1 x'_1 + M_2 x'_2 + \dots + M_n x'_n, \quad (2.19)$$

$$M = \frac{1}{\frac{x_1}{M_1} + \frac{x_2}{M_2} + \dots + \frac{x_n}{M_n}}, \quad (2.20)$$

где M_i - средняя молекулярная масса компонента смеси, кг/кмоль;

x'_i - мольная доля компонента в смеси,

x_i - массовая доля компонента в смеси.

Зависимость средней молекулярной массы от средней мольной температуры кипения и характеризующего фактора представлена на рисунке 2.1.

Зависимость средней молекулярной массы от средней мольной температуры кипения и относительной плотности представлена на рисунках 2.2 и 2.3.

Зависимость молекулярной массы алканов нормального и изостроения от нормальной температуры кипения приведена на рисунках 2.4 и 2.5.

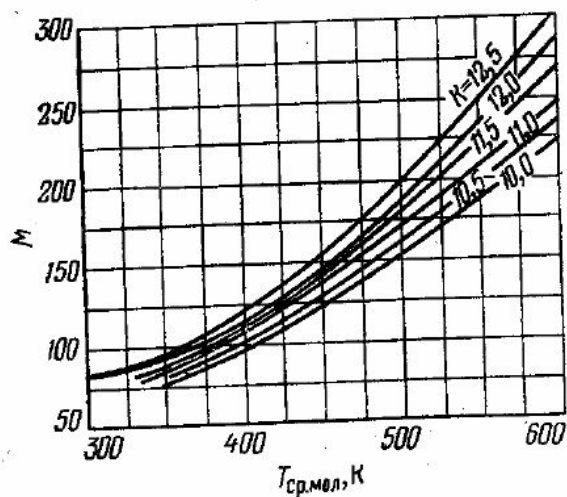


Рисунок 2.1 – Зависимость молекулярной массы от средней мольной температуры кипения и характеризующего фактора

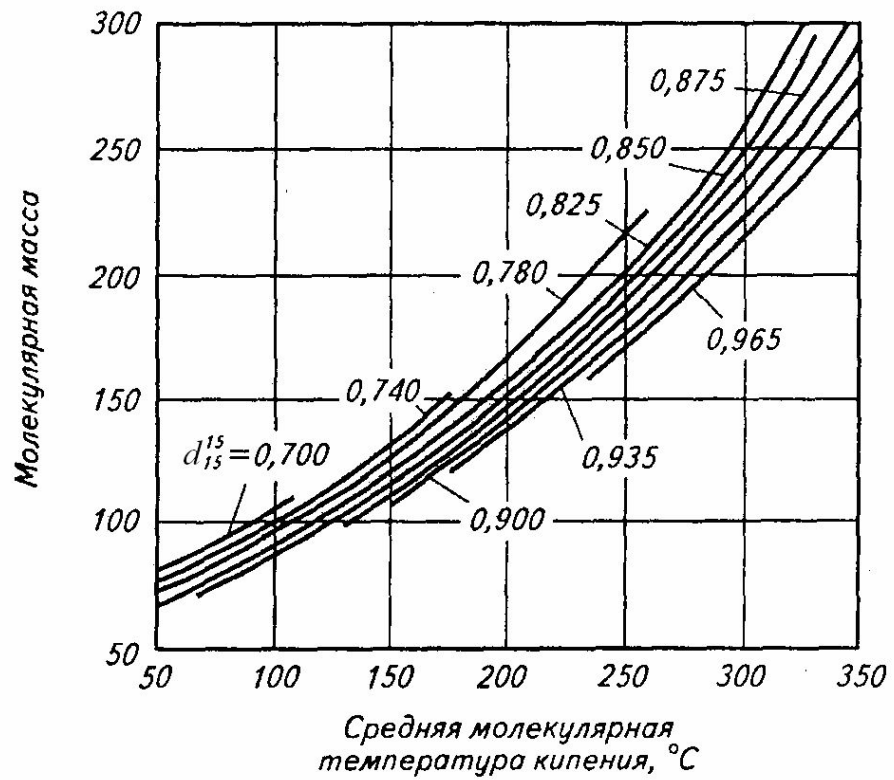


Рисунок 2.2 – Зависимость молекулярной массы нефтепродуктов от плотности и средней мольной температуры кипения

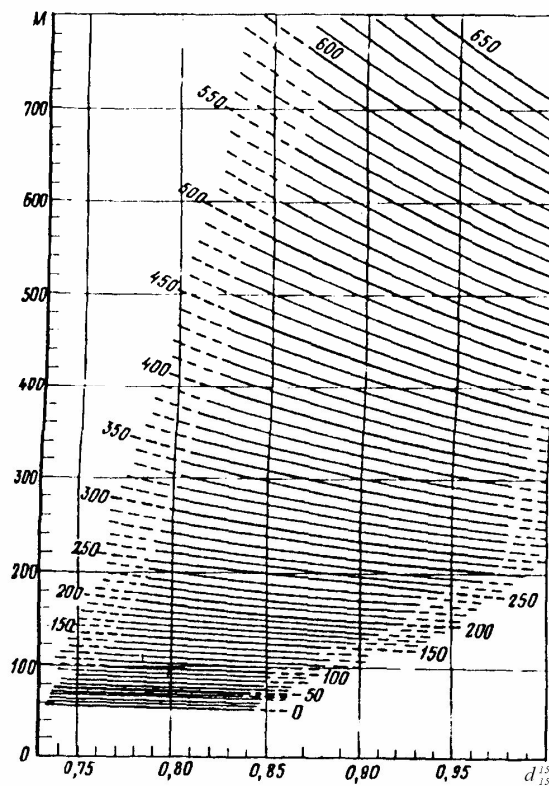
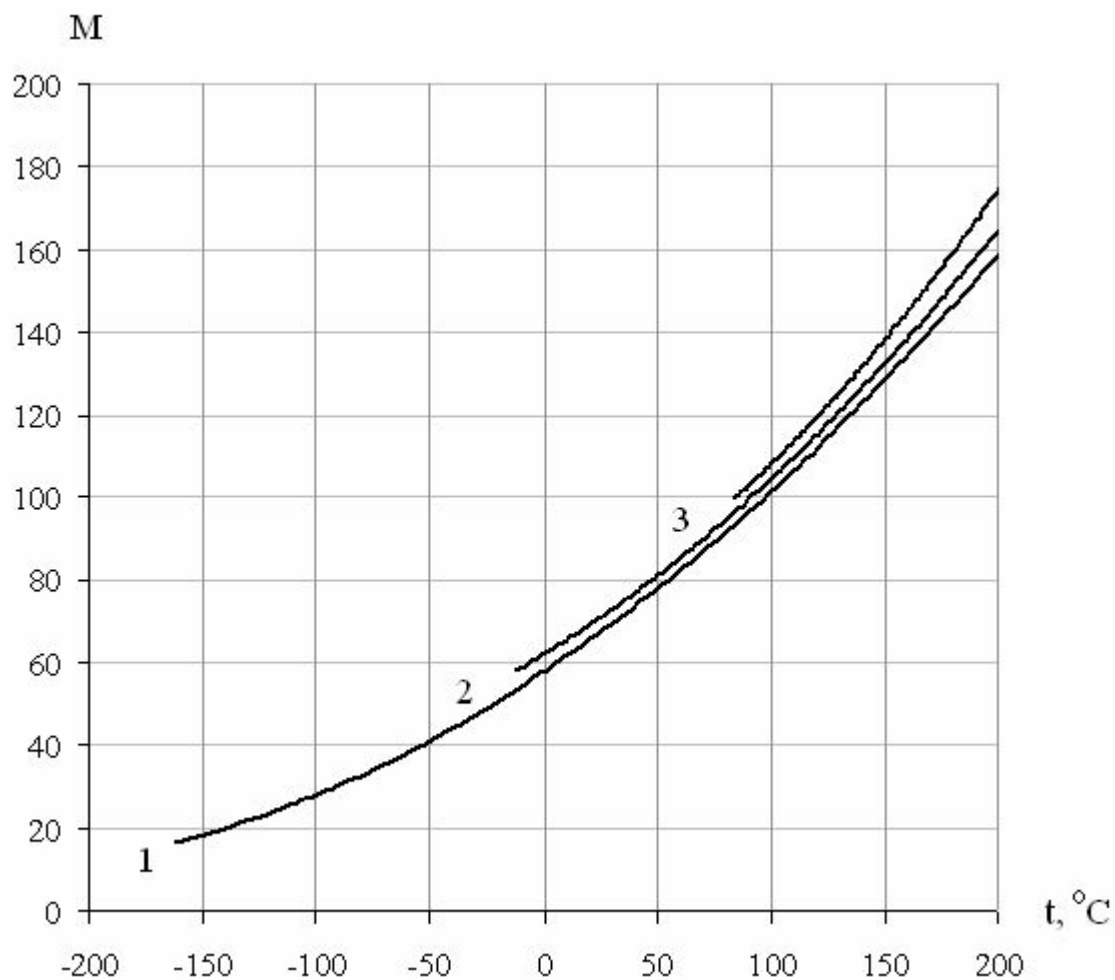


Рисунок 2.3 - Зависимость молекулярной массы нефтепродуктов от плотности и средней мольной температуры кипения (цифры у кривых - средние температуры кипения фракций)



1 – алканы нормального строения

2 – монометил- или моноэтилзамещенные алканы

3 – все другие изомеры

Рисунок 2.4 - Зависимость молекулярной массы алканов нормального и изостроения от нормальной температуры кипения

Кривые, приведенные на данном графике приближенно аппроксимируются следующими полиномиальными уравнениями вида формулы Б. П. Войнова:

- для кривой 1

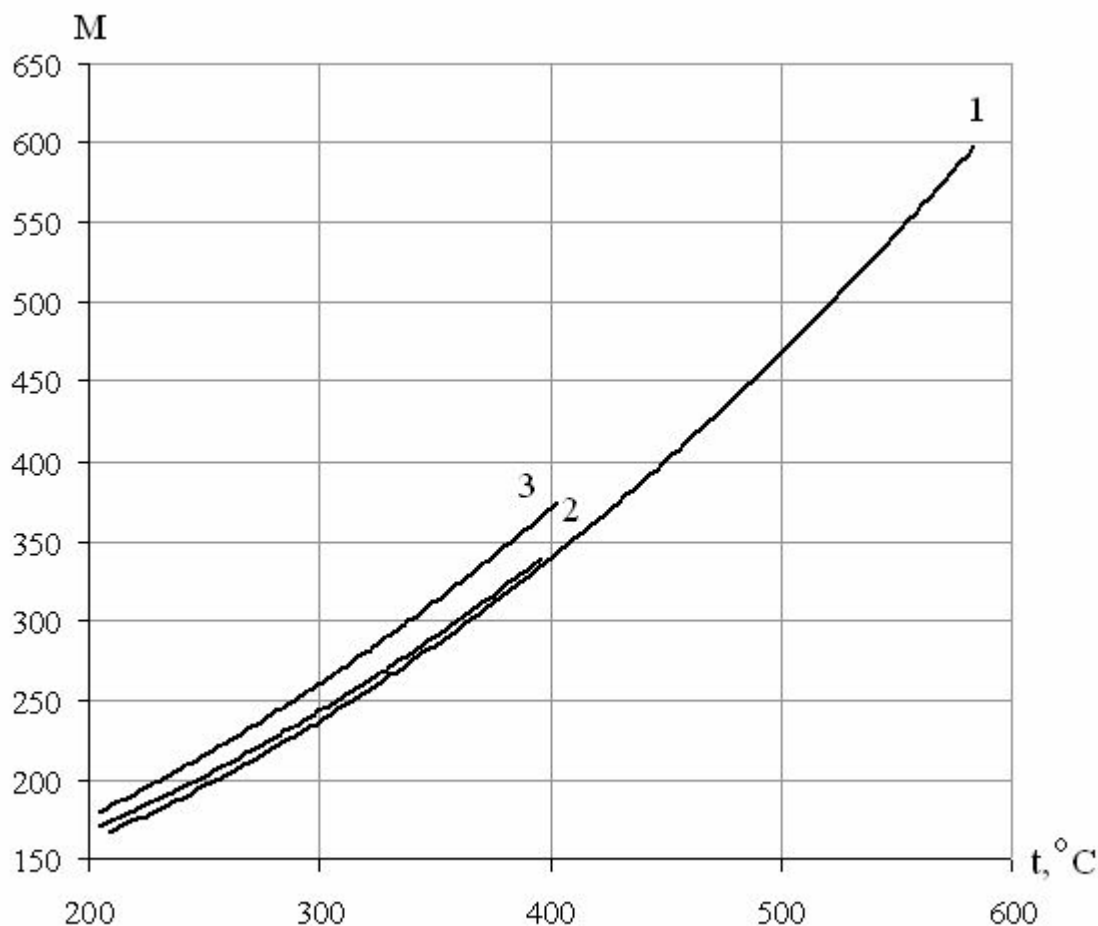
$$M = 57,915 + 0,3672t + 0,0007t^2; \quad (2.21)$$

- для кривой 2

$$M = 62,161 + 0,3346t + 0,0009t^2; \quad (2.22)$$

- для кривой 3

$$M = 67,78 + 0,2737t + 0,0013t^2. \quad (2.23)$$



1 – алканы нормального строения

2 – монометил- или моноэтилзамещенные алканы

3 – все другие изомеры

Рисунок 2.5 - Зависимость молекулярной массы алканов нормального и изостроения от нормальной температуры кипения

Кривые, приведенные на данном графике приближенно аппроксимируются следующими полиномиальными уравнениями вида формулы Б. П. Войнова:

- для кривой 1

$$M = 92,364 + 0,0757t + 0,0014t^2; \quad (2.24)$$

- для кривой 2

$$M = 92,276 + 0,1268t + 0,0013t^2; \quad (2.25)$$

- для кривой 3

$$M = 86,142 + 0,1941t + 0,0013t^2. \quad (2.26)$$

Пример 2.1. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции 85 – 180 °С.

Решение. Воспользуемся уравнением Войнова (2.2):

$$M = 60 + 0,3t_{\text{ср.мол.}} + 0,001t_{\text{ср.мол.}}^2$$

Пусть средняя температура, определенная по началу и концу кипения фракции будет среднемолярной, т.е.

$$t_{\text{ср}} = \frac{85 + 180}{2} = 132,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Тогда молекулярная масса

$$M = 60 + 0,3 \cdot 132,5 + 0,001 \cdot 132,5^2 = 117,3.$$

По уравнению Бриджимана (2.10):

$$\lg M = 2,511 \lg(t + 393) - 4,7523 = 2,511 \lg(132,5 + 393) - 4,7523 = 2,076,$$

$$M = 10^{2,076} = 119,22.$$

Пример 2.2. Определить молекулярную массу нефтепродукта, имеющего относительную плотность $d_4^{20} = 0,76$.

Решение. По уравнению Бриджимана (2.9):

$$M = \frac{39d_4^{20}}{1 - d_4^{20}} = \frac{39 \cdot 0,76}{1 - 0,76} = 123,5.$$

Пример 2.3. Определить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции 150 – 200 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7700$ и характеризующий фактор $K = 12$.

Решение. Средняя температура кипения фракции

$$t_{\text{ср}} = \frac{150 + 200}{2} = 175 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Пусть $t_{\text{ср.мол.}} = t_{\text{ср}}$, тогда воспользуемся уравнением Войнова-Эйгенсона (2.4):

$$\begin{aligned} M &= 7K - 21,5 + (0,76 - 0,04K) \cdot t_{\text{ср.мол.}} + (0,0003K - 0,00245) \cdot t_{\text{ср.мол.}}^2 = \\ &= 7 \cdot 12 - 21,5 + (0,76 - 0,04 \cdot 12) \cdot 175 + (0,0003 \cdot 12 - 0,00245) \cdot 175^2 = 146,84 \end{aligned}$$

$$\text{Относительная плотность } d_{15}^{15} = d_4^{20} + \frac{0,0035}{d_4^{20}} = 0,7700 + \frac{0,0035}{0,7700} = 0,775.$$

По уравнению Сима и Дюберта (2.12):

$$M = 5,805 \cdot 10^{-5} T^{2,3776} (d_{15}^{15})^{-0,9371} = 5,805 \cdot 10^{-5} (175 + 273)^{2,3776} (0,775)^{-0,9371} = 148,41$$

Для решения задачи можно использовать графики:

- по рисунку 2.1 при $T_{\text{ср}} = 448$ и $K = 12$ молекулярная масса $M \approx 147$;

- по рисунку 2.2 при $t_{cp} = 175$ °C и $d_{15}^{15} = 0,775$ молекулярная масса $M \approx 150$;

- по рисунку 2.3 при $t_{cp} = 175$ °C и $d_{15}^{15} = 0,775$ молекулярная масса $M \approx 140$;

Пример 2.4. Определить молекулярную массу смеси, состоящую из 0,15 массовых долей нефтепродукта молекулярной массой 95 и нефтепродукта молекулярной массой 120.

Решение. Массовая доля второго нефтепродукта $x_2 = 1 - x_1 = 1 - 0,15 = 0,85$.

Молекулярная масса смеси по формуле (2.20) равна

$$M = \frac{1}{\frac{x_1}{M_1} + \frac{x_2}{M_2}} = \frac{1}{\frac{0,15}{95} + \frac{0,85}{120}} = 115,4.$$

Пример 2.5. Приблизительно определить молярную массу газа и его мольный состав. Массовый состав газа приведен ниже

CH ₄	15 %
C ₂ H ₆	20 %
C ₃ H ₈	30 %
н-C ₄ H ₁₀	30 %
изо-C ₄ H ₁₀	5 %

Решение. Известно, что переход между мольными и массовыми концентрациями может быть осуществлен следующим образом:

$$\omega_i = \frac{\chi_i M_i}{\sum_i \chi_i M_i},$$

где $\sum_i \chi_i M_i = M$ - масса смеси.

Тогда

$$\chi_i = \omega_i \frac{M}{M_i}. \quad (*)$$

В данной задаче неизвестными являются одновременно мольные доли компонентов и молярная масса смеси. Для её решения воспользуемся методом последовательных приближений в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Определить начальное значение молярной массы смеси.
2. Рассчитать мольные доли компонентов.
3. Вычислить сумму мольных долей компонентов. Если она равна 1, то перейти к пункту 5, если не равна 1 – перейти к пункту 4.

4. Вычислить новое значение молярной массы смеси путем деления предыдущего значения молярной массы смеси на значение суммы мольных долей компонентов.

5. Вывести значения мольной массы смеси и мольных долей компонентов.

В качестве первого приближения молярной массы смеси примем, вычисленное по формуле:

$$M = \sum_i \omega_i M_i = 0,15 \cdot 16 + 0,2 \cdot 30 + 0,3 \cdot 44 + 0,3 \cdot 58 + 0,05 \cdot 58 = 41,9.$$

Мольные доли компонентов рассчитаем по уравнению (*):

CH ₄	0,393
C ₂ H ₆	0,279
C ₃ H ₈	0,286
н-C ₄ H ₁₀	0,217
изо-C ₄ H ₁₀	0,036
Σ	1,211

Т.к. значение суммы мольных долей компонентов не равно единице, то примем новое значение мольной массы смеси

$$M = \frac{41,9}{1,211} = 34,6$$

и рассчитаем мольные доли.

В конечном итоге получим значение мольной массы смеси $M = 34,61$, а мольные доли компонентов

CH ₄	0,324
C ₂ H ₆	0,231
C ₃ H ₈	0,236
н-C ₄ H ₁₀	0,179
изо-C ₄ H ₁₀	0,030
Σ	1,000

Задачи для самостоятельного решения

121. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 85, 120 и 135. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,722$.

122. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 90, 100 и 120. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_{15}^{15} = 0,8421$.

123. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 70, 125 и 150. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,698$.
124. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 90, 145 и 175. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_{15}^{15} = 0,7715$.
125. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 85, 100 и 160. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,763$.
126. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 98, 142 и 180. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_{15}^{15} = 0,8287$.
127. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 75, 85 и 95. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,725$.
128. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 110, 125 и 160. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_{15}^{15} = 0,7415$.
129. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 80, 120 и 175. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,842$.
130. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 115, 130 и 145. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_{15}^{15} = 0,7826$.
131. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 95, 125 и 160. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,795$.
132. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 105, 140 и 185. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_{15}^{15} = 0,7989$.

133. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 80, 128 и 170. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,803$.
134. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 100, 150 и 200. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_{15}^{15} = 0,7214$.
135. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 65, 130 и 155. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,787$.
136. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 95, 135 и 180. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_{15}^{15} = 0,7886$.
137. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 70, 140 и 200. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,843$.
138. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 88, 150 и 190. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_{15}^{15} = 0,8045$.
139. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 60, 138 и 165. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,712$.
140. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 85, 140 и 175. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_{15}^{15} = 0,7899$.
141. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 70, 150 и 185. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,791$.
142. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 95, 100 и 155. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_{15}^{15} = 0,6999$.
143. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 65, 85 и 120. Вычислить

- среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,821$.
- 144.** Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 100, 140 и 150. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_{15}^{15} = 0,7152$.
- 145.** Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 110, 120 и 138. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,755$.
- 146.** Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 80, 130 и 155. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_{15}^{15} = 0,7762$.
- 147.** Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 95, 105 и 125. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,872$.
- 148.** Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 115, 140 и 160. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_{15}^{15} = 0,8112$.
- 149.** Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 75, 110 и 135. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,771$.
- 150.** Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяных фракций, имеющих средние температуры кипения 85, 125 и 170. Вычислить среднюю молекулярную массу нефтяной фракции, имеющей плотность $d_{15}^{15} = 0,7431$.
- 151.** Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения 102 °С и характеризующий фактор 10. Задачу решить двумя способами.
- 152.** Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения 150 °С и относительную плотность $d_{15}^{15} = 0,75$. Задачу решить двумя способами.
- 153.** Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения 226 °С и относительную плотность $d_4^{20} = 0,8567$. Задачу решить двумя способами.
- 154.** Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения 139 °С и характеризующий фактор 10,5. Задачу решить двумя способами.

155. Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительную плотность $d_{15}^{15} = 0,76$. Задачу решить двумя способами.
156. Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения $79\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительную плотность $d_4^{20} = 0,7262$. Задачу решить двумя способами.
157. Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ и характеризующий фактор 11. Задачу решить двумя способами.
158. Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительную плотность $d_{15}^{15} = 0,83$. Задачу решить двумя способами.
159. Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения $155\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительную плотность $d_4^{20} = 0,7745$. Задачу решить двумя способами.
160. Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ и характеризующий фактор 11,5. Задачу решить двумя способами.
161. Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения $255\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительную плотность $d_{15}^{15} = 0,85$. Задачу решить двумя способами.
162. Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения $290\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительную плотность $d_4^{20} = 0,841$. Задачу решить двумя способами.
163. Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и характеризующий фактор 12. Задачу решить двумя способами.
164. Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительную плотность $d_{15}^{15} = 0,94$. Задачу решить двумя способами.
165. Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения $212\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительную плотность $d_4^{20} = 0,8069$. Задачу решить двумя способами.
166. Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ и характеризующий фактор 12,5. Задачу решить двумя способами.
167. Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения $275\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительную плотность $d_{15}^{15} = 0,835$. Задачу решить двумя способами.
168. Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения $270\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительную плотность $d_4^{20} = 0,855$. Задачу решить двумя способами.

169. Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения 250 °С и характеризующий фактор 10,8. Задачу решить двумя способами.
170. Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения 320 °С и относительную плотность $d_{15}^{15} = 0,88$. Задачу решить двумя способами.
171. Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения 320 °С и относительную плотность $d_4^{20} = 0,8653$. Задачу решить двумя способами.
172. Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения 165 °С и характеризующий фактор 11,7. Задачу решить двумя способами.
173. Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения 150 °С и относительную плотность $d_{15}^{15} = 0,755$. Задачу решить двумя способами.
174. Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения 242 °С и относительную плотность $d_4^{20} = 0,841$. Задачу решить двумя способами.
175. среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения 100 °С и характеризующий фактор 12,5. Задачу решить двумя способами.
176. Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения 270 °С и относительную плотность $d_{15}^{15} = 0,86$. Задачу решить двумя способами.
177. Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения 168 °С и относительную плотность $d_4^{20} = 0,7919$. Задачу решить двумя способами.
178. среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения 250 °С и характеризующий фактор 11,2. Задачу решить двумя способами.
179. Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения 160 °С и относительную плотность $d_{15}^{15} = 0,745$. Задачу решить двумя способами.
180. Определить среднюю молекулярную массу нефтепродукта, имеющего среднюю температуру кипения 90 °С и относительную плотность $d_4^{20} = 0,725$. Задачу решить двумя способами.
181. Смесь состоит из 20 кг н-гексана, 25 кг н-гептана и 40 кг н-октана. Определить среднюю молекулярную массу смеси.
182. Определить среднюю молекулярную массу широкой нефтяной фракции, состоящей из 30 % (масс.) бензина с молекулярной массой 115; 30 % (масс.) керосина с молекулярной массой 150 и 40 % (масс.) дизельного топлива с молекулярной массой 240.

183. Газовая смесь при нормальных условиях содержит $2,5 \text{ м}^3$ метана; $3,55 \text{ м}^3$ этана и $2,17 \text{ м}^3$ пропана. Определить среднюю молекулярную массу смеси.
184. Смесь состоит из 25 кг н-гептана, 18 кг н-октана и 25 кг н-нонана. Определить среднюю молекулярную массу смеси.
185. Определить среднюю молекулярную массу широкой нефтяной фракции, состоящей из 35 % (масс.) бензина с молекулярной массой 112; 25 % (масс.) керосина с молекулярной массой 145 и 40 % (масс.) дизельного топлива с молекулярной массой 245.
186. Газовая смесь при $25 \text{ }^\circ\text{C}$ и атмосферном давлении содержит $2,2 \text{ м}^3$ этана; $4,11 \text{ м}^3$ пропана и $3,5 \text{ м}^3$ н-бутана. Определить среднюю молекулярную массу смеси.
187. Смесь состоит из 18 кг н-пентана, 10 кг н-гексана и 15 кг н-гептана. Определить среднюю молекулярную массу смеси.
188. Определить среднюю молекулярную массу широкой нефтяной фракции, состоящей из 27 % (масс.) бензина с молекулярной массой 113; 23 % (масс.) керосина с молекулярной массой 142 и 50 % (масс.) дизельного топлива с молекулярной массой 242.
189. Газовая смесь при $25 \text{ }^\circ\text{C}$ и 2 атм содержит $5,7 \text{ м}^3$ метана; $2,25 \text{ м}^3$ этана и $3,75 \text{ м}^3$ пропана. Определить среднюю молекулярную массу смеси.
190. Смесь состоит из 16 кг н-гексана, 12 кг н-гептана и 18 кг н-октана. Определить среднюю молекулярную массу смеси.
191. Определить среднюю молекулярную массу широкой нефтяной фракции, состоящей из 24 % (масс.) бензина с молекулярной массой 114; 32 % (масс.) керосина с молекулярной массой 143 и 44 % (масс.) дизельного топлива с молекулярной массой 245.
192. Газовая смесь при $32 \text{ }^\circ\text{C}$ и $2,038 \text{ кгс/см}^2$ содержит $4,2 \text{ м}^3$ этана; $2,2 \text{ м}^3$ пропана и $3,0 \text{ м}^3$ н-бутана. Определить среднюю молекулярную массу смеси.
193. Смесь состоит из 10 кг н-гептана, 15 кг н-октана и 22 кг н-нонана. Определить среднюю молекулярную массу смеси.
194. Определить среднюю молекулярную массу широкой нефтяной фракции, состоящей из 31 % (масс.) бензина с молекулярной массой 112; 29 % (масс.) керосина с молекулярной массой 141 и 40 % (масс.) дизельного топлива с молекулярной массой 240.
195. Газовая смесь при $0 \text{ }^\circ\text{C}$ и 775 мм рт. ст. содержит $5,0 \text{ м}^3$ этана; $2,7 \text{ м}^3$ пропана и $3,22 \text{ м}^3$ н-бутана. Определить среднюю молекулярную массу смеси.
196. Смесь состоит из 11 кг н-гексана, 18 кг н-гептана и 20 кг н-октана. Определить среднюю молекулярную массу смеси.
197. Определить среднюю молекулярную массу широкой нефтяной фракции, состоящей из 40 % (масс.) бензина с молекулярной массой 111; 30 % (масс.) керосина с молекулярной массой 140 и 30 % (масс.) дизельного топлива с молекулярной массой 245.

198. Газовая смесь при 10 °С и 2 атм содержит 4,2 м³ метана; 3,5 м³ этана и 4,1 м³ пропана. Определить среднюю молекулярную массу смеси.
199. Смесь состоит из 21 кг н-гексана, 19 кг н-гептана и 25 кг н-октана. Определить среднюю молекулярную массу смеси.
200. Определить среднюю молекулярную массу широкой нефтяной фракции, состоящей из 30 % (масс.) бензина с молекулярной массой 115; 40 % (масс.) керосина с молекулярной массой 142 и 30 % (масс.) дизельного топлива с молекулярной массой 243.
201. Газовая смесь при 15 °С и 1,85 кгс/см² содержит 8,0 м³ этана; 4,45 м³ пропана и 3,8 м³ н-бутана. Определить среднюю молекулярную массу смеси.
202. Смесь состоит из 20 кг н-гептана, 35 кг н-октана и 25 кг н-нонана. Определить среднюю молекулярную массу смеси.
203. Определить среднюю молекулярную массу широкой нефтяной фракции, состоящей из 35 % (масс.) бензина с молекулярной массой 114; 35 % (масс.) керосина с молекулярной массой 144 и 30 % (масс.) дизельного топлива с молекулярной массой 244.
204. Газовая смесь при 22 °С и 0,15 МПа содержит 4,0 м³ этана; 2,15 м³ пропана и 3,18 м³ н-бутана. Определить среднюю молекулярную массу смеси.
205. Смесь состоит из 10 кг н-октана, 15 кг н-нонана и 27 кг н-декана. Определить среднюю молекулярную массу смеси.
206. Определить среднюю молекулярную массу широкой нефтяной фракции, состоящей из 45 % (масс.) бензина с молекулярной массой 115; 32 % (масс.) керосина с молекулярной массой 142 и 23 % (масс.) дизельного топлива с молекулярной массой 241.
207. Газовая смесь при 25 °С и 2,0 атм содержит 2,1 м³ метана; 4,5 м³ этана и 4,8 м³ пропана. Определить среднюю молекулярную массу смеси.
208. Смесь состоит из 16 кг н-октана, 14 кг н-нонана и 17 кг н-декана. Определить среднюю молекулярную массу смеси.
209. Определить среднюю молекулярную массу широкой нефтяной фракции, состоящей из 25 % (масс.) бензина с молекулярной массой 112; 35 % (масс.) керосина с молекулярной массой 142 и 40 % (масс.) дизельного топлива с молекулярной массой 245.
210. Газовая смесь при 25 °С и 1,5 ат содержит 8,1 м³ метана; 6,5 м³ этана и 5,2 м³ пропана. Определить среднюю молекулярную массу смеси.

3. Мольный объем

Для расчета мольного объема углеводородов (см³/моль) при 20 °С и 1 ат хорошие результаты дает формула Куртца и Липкина

$$V_M = 16,28N_1 + 13,15N_2 + 9,7N_3 - 6,2N_4 + C, \quad (3.1)$$

где N_1 - число групп CH_3 -, CH_2 - и CH - в открытых цепях;

N_2 - число групп CH_2 - и CH - в кольцах (исключая места соединения колец);

N_3 - число групп CH - в местах соединения колец;

N_4 - число двойных связей в молекуле (учитывая двойные связи в циклах);

$C = 31,2$ - постоянная величина для всех углеводородов за исключением н-парафинов;

$C = 32,6$ - постоянная величина для нормальных алифатических цепей.

В интервалах температур от -253 до +200 °С и давлений до 10000 ат (9,81·10³ МПа) применяется общая формула Куртца и Санкина

$$V_{M,p} = F_1K_1N_1 + F_1K_2N_2 + F_1K_3N_3 - F_1K_4N_4 + F_5K_5, \quad (3.2)$$

где N_1 , N_2 , N_3 и N_4 - имеют те же значения, что и в формуле Куртца и Липкина;

K_1 , K_2 , K_3 , K_4 и K_5 - зависят от температуры и принимаются по таблице 3.1;

F_1 , F_5 - принимаются по таблице 3.2.

Доли мольных объемов углеводородов в формуле Куртца и Санкина

Таблица 3.1

Температура, °С	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5
200	18,11	14,63	10,79	6,90	60,2
100	17,11	13,82	10,20	6,52	40,3
50	16,59	13,40	9,89	6,32	34,6
20	16,28	13,15	9,70	6,20	31,2
0	16,07	12,98	9,57	6,12	29,5
-50	15,54	12,55	9,26	5,82	26,0
-100	15,02	12,13	8,95	5,72	23,1
-253	13,15	11,13	8,90	4,0	-

Коэффициенты F_1 и F_5 в формуле Куртца и Санкина

Таблица 3.2

Давление, ат	Значение F_1	Значение F_5			
		0 °C	20 °C	50 °C	100 °C
0,99	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
250	0,990	0,900	0,900	0,890	0,845
500	0,982	0,840	0,835	0,840	0,745
1000	0,965	0,755	0,750	0,735	0,650
2000	0,938	0,665	0,660	0,640	0,550
3000	0,915	0,600	0,595	0,590	0,490
4000	0,895	0,580	0,575	0,560	0,455
5000	0,875	0,550	0,550	0,540	0,425
7500	0,839	0,530	0,530	0,515	0,410
10000	0,807	0,510	0,510	0,490	0,390

Аддитивно-групповой метод определения мольного объема ($\text{м}^3/\text{кмоль}$) базируется на величинах инкрементов атомов и структурных групп

$$V_M = 10^{-3} \sum N_i R_i, \quad (3.3)$$

где N_i - число атомов, связей и циклов в соединении;

R_i - инкременты атомов и структурных групп, принимаемые по таблице.

Инкременты атомов и структурных групп (по Шредеру)

Таблица 3.3

Атом или структурная группа	Инкремент
C, H, O, N	+7,0
F	+10,5
Cl	+24,5
Br	+31,5
I	+38,5
S	+21,0
Двойная связь	+7,0
Тройная связь	+14,0
Кольцо (цикл)	-7,0

Инкременты атомов (по Коппу)

Таблица 3.4

Атом	Инкремент
C	11,0
O с двумя насыщенными связями	7,8
O связанный с одним атомом кислорода	12,2
H	5,5
Cl	22,8
Br	27,8
I	37,5
S	22,6

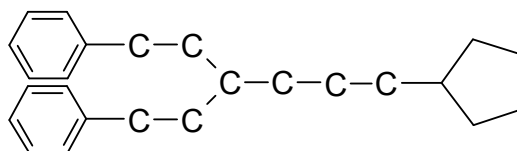
Учитывая влияние ассоциации, молярные объемы обычно рассчитывают при нормальной температуре кипения, пользуясь таблицей Ле Ба.

Доли для расчета молярных объемов ($\text{см}^3/\text{моль}$) при нормальных температурах кипения (таблица Ле Ба)

Таблица 3.5

Атомы, связи, вещества	Доля	Атомы, связи, вещества	Доля
<i>Атомы и связи в молекулах жидкостей</i>		Сера	25,6
Азот:		Углерод	14,8
Амины первичные	10,5	Фтор	8,7
Амины вторичные	12,0	Хлор	21,6
Бром	27,0	<i>Сжиженные газы</i>	
Водород	3,7	Азот	31,2
Кислород:		Аммиак	25,8
двойные связи	7,4	Бром	53,2
метилловые эфиры простые и сложные	9,1	Вода	18,9
этиловые эфиры простые и сложные	9,9	Водород	14,3
высшие эфиры простые и сложные	11,0	Воздух	29,9
кислоты	12,0	Двуокись серы	44,8
кислород, связанный с S, P, N	8,3	Двуокись углерода	34,0
Кольца:		Закись азота	36,4
трехчленное	-6,0	Йод	71,5
четырёхчленное	-8,5	Кислород	25,6
пятичленное	-11,5	Окись азота	23,6
шестичленное	-15,0	Окись углерода	30,7
нафталиновое	-30,0	Сероводород	32,9
антраценовое	-47,5	Хлор	48,4

Пример 3.1. Вычислить молярный объем углеводорода, имеющего структурную формулу



Решение. Воспользуемся формулой Куртца и Липкина (3.1).

$$N_1 = 8,$$

$$N_2 = 17,$$

$$N_3 = 0,$$

$$N_4 = 6.$$

Тогда молярный объем ($\text{см}^3/\text{моль}$):

$$V_M = 16,28N_1 + 13,15N_2 + 9,7N_3 - 6,2N_4 + C = \\ = 16,28 \cdot 8 + 13,15 \cdot 17 - 6,2 \cdot 6 + 31,2 = 347,79$$

4. Поверхностное натяжение

Для определения поверхностного натяжения жидкости можно использовать уравнение Катаяма

$$\sigma = 0,01085T_{кин} \left[\frac{\rho_{ж} - \rho_{л}}{M} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (4.1)$$

Наиболее простым методом является вычисление поверхностного натяжения по парахору

$$\sigma = \left[\frac{P_{ch}(\rho_{ж} - \rho_{л})}{M} \right]^4 \quad (4.2)$$

где P_{ch} - парахор.

Парахор может быть приближенно вычислен по формуле

$$P_{ch} = 40 + 2,38M \quad (4.3)$$

По аналогии с мольным объемом парахор может быть вычислен путем суммирования составляющих долей парахора каждой структурной единицы

$$P_{ch} = \sum nP_{chi} \quad (4.4)$$

где n - число атомов, связей или групп в молекуле;

P_{chi} - атомные и структурные составляющие доли парахора.

Наиболее точные значения парахора получаются при работе с составляющими долями, предложенными Квейлом и представленные в таблице 4.1.

Составляющие доли парахора органических соединений

Таблица 4.1

Атом, группа или связь	P_{chi}	Атом, группа или связь	P_{chi}
С	9,0	Тройная связь	40,6
Н	15,5	Кольца:	
О	19,8	трехчленные	12,5
S	49,1	четырёхчленные	6,0
N	17,5	пятичленные	3,0
Двойная связь на конце цепи	19,1	шестичленные	0,8

Поверхностное натяжение нефтепродуктов (Н/м) с относительной плотностью $d_4^{20} = 0,60 - 0,92$

$$\sigma = 10^{-2}(5d_4^{20} - 1,5), \quad (4.5)$$

Зависимость поверхностного натяжения (мН/м) нефтепродуктов от плотности имеет вид

$$\sigma = 0,0515\rho_T - 0,0166. \quad (4.6)$$

Согласно относительно новым исследованиям рекомендуется пользоваться двухпараметрической зависимостью поверхностного натяжения (мН/м)

$$\sigma_{20} = 16,83(d_4^{20})^{1,477} M^{0,1547}. \quad (4.7)$$

Большинство органических жидкостей при комнатной температуре имеет поверхностное натяжение 0,025 – 0,04 Н/м.

Поверхностное натяжение некоторых нефтепродуктов

Таблица 4.2

Нефтепродукт	Температура, °С	Поверхностное натяжение σ , мН/м
Бензин автомобильный	20	20,50
Бензин авиационный	20	21,60
Тяжелый бензин	20	23,60
Керосин	20	26,60
Дизельное топливо	20	30,80

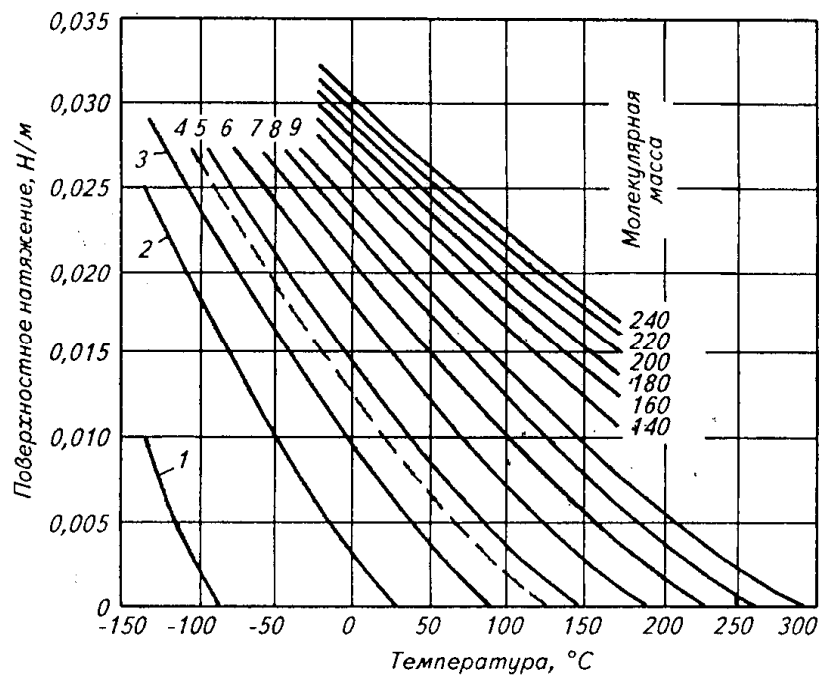
Поверхностное натяжение смесей при атмосферном давлении

$$\sigma_{см} = \frac{\sigma_1\sigma_2}{\sigma_1x_2 + \sigma_2x_1}. \quad (4.8)$$

Поверхностное натяжение смесей при повышенных давлениях

$$\sigma_{см} = 10^{-15} \sum_{i=1}^n \left[P_{ch} \frac{\rho_{ж}}{M_{ж}} x'_i - \frac{\rho_{п}}{M_{п}} y'_i \right]^4. \quad (4.9)$$

Зависимость поверхностного натяжения индивидуальных углеводородов и нефтяных фракций различной молекулярной массы от температуры приведен на рисунке 4.1.



1- метан; 2 – этан; 3 – пропан; 4 – изобутан; 5 – н-бутан; 6 – н-пентан; 7 – н-гексан; 8 – н-гептан; 9 – н-октан

Рисунок 4.1 – Зависимость поверхностного натяжения индивидуальных углеводородов и нефтяных фракций различной молекулярной массы от температуры

Пример 4.1. Определить поверхностное натяжение нефтяной фракции, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,81$.

Решение. Воспользуемся уравнением (4.5) и вычислим поверхностное натяжение при 20 °С

$$\sigma = 10^{-2}(5d_4^{20} - 1,5) = 10^{-2}(5 \cdot 0,81 - 1,5) = 0,0255 \text{ Н/м.}$$

Пример 4.2. Определить поверхностное натяжение нефтяной фракции, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,77$ и среднюю молекулярную массу 130, при 20 °С.

Решение. По уравнению (4.7):

$$\sigma_{20} = 16,83(d_4^{20})^{1,477} M^{0,1547} = 16,83 \cdot 0,77^{1,477} 130^{0,1547} = 24,29 \text{ мН/м.}$$

По графику, представленному на рисунке 4.1:

$$\sigma_{20} \approx 0,023 \text{ Н/м.}$$

Задачи для самостоятельного решения

- 211.** Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 108 – 140 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7531$. Задачу решить двумя способами.
- 212.** Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 140 – 168 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,776$. Задачу решить двумя способами.
- 213.** Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 108 – 140 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7531$. Задачу решить двумя способами.
- 214.** Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 168 – 195 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7961$. Задачу решить двумя способами.
- 215.** Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 195 – 216 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,815$. Задачу решить двумя способами.
- 216.** Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 216 – 230 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,8309$. Задачу решить двумя способами.
- 217.** Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 117 – 129 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,74$. Задачу решить двумя способами.
- 218.** Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 129 – 140 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7498$. Задачу решить двумя способами.
- 219.** Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 140 – 155 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,755$. Задачу решить двумя способами.
- 220.** Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 155 – 166 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,76$. Задачу решить двумя способами.
- 221.** Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 166 – 178 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7715$. Задачу решить двумя способами.
- 222.** Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 178 – 190 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7821$. Задачу решить двумя способами.
- 223.** Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 190 – 202 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7865$. Задачу решить двумя способами.

224. Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 202 – 214 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7925$. Задачу решить двумя способами.
225. Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 214 – 226 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,8023$. Задачу решить двумя способами.
226. Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 226 – 240 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,812$. Задачу решить двумя способами.
227. Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 160 – 178 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7814$. Задачу решить двумя способами.
228. Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 178 – 194 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7932$. Задачу решить двумя способами.
229. Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 194 – 208 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,8031$. Задачу решить двумя способами.
230. Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 208 – 220 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,8107$. Задачу решить двумя способами.
231. Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 220 – 234 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,8142$. Задачу решить двумя способами.
232. Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 234 – 244 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,8178$. Задачу решить двумя способами.
233. Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 145 – 183 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,8186$. Задачу решить двумя способами.
234. Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 183 – 212 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,84$. Задачу решить двумя способами.
235. Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 212 – 229 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,8458$. Задачу решить двумя способами.
236. Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 200 – 206 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,8431$. Задачу решить двумя способами.

- 237.** Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 206 – 243 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,8518$. Задачу решить двумя способами.
- 238.** Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 173 – 224 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,8316$. Задачу решить двумя способами.
- 239.** Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 224 – 248 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,8403$. Задачу решить двумя способами.
- 240.** Определить поверхностное натяжение при 20 °С нефтяной фракции 145 – 220 °С, имеющей плотность $d_4^{20} = 0,8325$. Задачу решить двумя способами.

5. Вязкость

5.1 Вязкость жидкостей

Различают динамическую, кинематическую и условную вязкость.

Динамическая вязкость μ (внутреннее трение) – способность реальных жидкостей оказывать сопротивление сдвигающим касательным усилиям. В СИ имеет размерность $\left[\frac{Н \cdot с}{м^2} = Па \cdot с \right]$. Часто в специализированной литературе (система СГС) встречается единица измерения *пуаз* [1 пз = 0,1 Па·с].

Кинематическая вязкость ν – величина равная отношению динамической вязкости жидкости к её плотности при той же температуре

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (5.1)$$

Единицей измерения кинематической вязкости в СИ является $[м^2/с]$. В системе СГС единицей измерения является *стокс* [1 Ст = 1 см²/с = 10⁻⁴ м²/с].

Условная вязкость – отношение времени истечения через калиброванное отверстие стандартного вискозиметра 200 мл нефтепродукта при определенной температуре t ко времени истечения 200 мл дистиллированной воды при 20 °С. Обозначается: $ВУ_t$ и измеряется условными градусами.

Между величинами условной и кинематической вязкости существуют зависимости:

- для ν от 1 до 120 мм²/с

$$\nu_t = 7,31^\circ ВУ_t - \frac{6,31}{\circ ВУ_t}; \quad (5.2)$$

- для $\nu > 120$ мм²/с

$$\nu_t = 7,4^\circ ВУ_t. \quad (5.3)$$

Для углеводородов характерно повышение вязкости с увеличением их молекулярной или температуры кипения.

Одним из наиболее простых, но неточных методов расчета коэффициента динамической вязкости (спз) является метод Саудерса, который заключается в расчете по формуле

$$\lg(\lg 10\mu) = \frac{J}{M} \rho_{ж} - 2,9, \quad (5.4)$$

где J - постоянная вязкости, вычисляемая суммированием долей, приведенных в таблице 5.1.

Доли для расчета постоянной J по Саудерсу

Таблица 5.1

Атом, группа, связь	Доля	Атом, группа, связь	Доля
H	+2,7	Br	+79
O	+29,7	I	+110
C	+50,2	Двойная связь	-15,5
N	+37,0	Кольцо 5-членное	-24
Cl	+60	Кольцо 6-членное	-21

Для расчета вязкости нефтей (мм²/с) можно использовать формулу

$$\frac{8,8}{\rho M^{1/2}} = \left(0,69 + \frac{0,0373}{\nu} \right) \left[1 - 0,237e^{-8,225/\nu} \right]. \quad (5.5)$$

Температурная зависимость вязкости при атмосферном давлении для углеводородов может быть выражена уравнением Торпа и Роджера

$$\mu_t = \frac{10C}{1 + \alpha \cdot t + \beta \cdot t^2}, \quad (5.6)$$

где C, α, β - константы, определяемые по таблице 5.2.

Значения констант в уравнении Торпа и Роджера

Таблица 5.2

Углеводород	$\alpha \cdot 10^2$	$\beta \cdot 10^6$	$C \cdot 10^3$	Углеводород	$\alpha \cdot 10^2$	$\beta \cdot 10^6$	$C \cdot 10^3$
Бензол	1,86	6,18	9,05	м-Ксилол	1,42	3,92	8,02
н-Гексан	1,12	3,34	3,96	о-Ксилол	1,70	5,64	11,03
изо-Гексан	1,10	3,60	3,71	п-Ксилол	1,47	4,58	8,46
н-Гептан	1,21	4,00	5,18	Октан	1,39	4,93	7,02
изо-Гептан	1,20	3,86	4,77	н-Пентан	1,04	2,30	2,83
Изопрен	1,00	1,54	2,60	Толуол	1,46	4,22	7,68

Вязкость при температуре t можно определить по формуле Гросса, имея при этом величины вязкостей при двух температурах. Сначала необходимо найти значение коэффициента n , а затем, используя одно из значений вязкости и температуру t , определить вязкость при этой температуре

$$\lg \frac{\nu_1}{\nu_2} = n \lg \frac{t_2}{t_1}. \quad (5.7)$$

Для расчета вязкости нефтепродуктов, значение которой не менее $0,2 \cdot 10^{-6}$ м²/с, применяют уравнение Вальтера

$$\lg \lg 10^6 (\nu + 0,8 \cdot 10^{-6}) = a + b \lg T. \quad (5.8)$$

Для вычислений по этому уравнению необходимо располагать значением вязкости при двух температурах - ν_1 при T_1 и ν_2 при T_2 , тогда коэффициенты a и b вычисляются как

$$b = \frac{\lg \lg 10^6 (\nu_1 + 0,8 \cdot 10^{-6}) - \lg \lg 10^6 (\nu_2 + 0,8 \cdot 10^{-6})}{\lg T_1 - \lg T_2}, \quad (5.9)$$

$$a = \lg \lg 10^6 (\nu_1 + 0,8 \cdot 10^{-6}) - b \lg T_1. \quad (5.10)$$

После этого можно подставлять значение коэффициентов в уравнение Вальтера и получать линейную зависимость вязкости от температуры для данного нефтепродукта.

Для вычисления вязкости жидкостей при повышенных давлениях (до 70 МПа) и температурах до 220 °С пригодно уравнение Манстона

$$\lg \frac{\nu}{\nu_T} = 0,142P(0,0239 + 0,762\nu_T^{0,278}), \quad (5.11)$$

где P - давление, для которого вычисляется вязкость, МПа;
 ν_T - вязкость при атмосферном давлении.

Вязкость смеси жидкостей можно рассчитывать по уравнению Кендалла и Монроэ

$$\mu_{см}^{1/3} = x_1' \mu_1^{1/3} + x_2' \mu_2^{1/3} \quad (5.12)$$

или уравнению, предложенному Аррениусом

$$\lg \mu_{см} = x_1 \lg \mu_1 + x_2 \lg \mu_2. \quad (5.13)$$

Вязкость смеси нефтепродуктов (сСт) можно вычислить по формуле

$$\lg \lg (\nu_{см} + 0,8) = (1 - x_B) \lg \lg (\nu_A + 0,8) - x_B \lg \lg (\nu_B + 0,8), \quad (5.14)$$

где x_B - массовая доля наиболее высоковязкого компонента смеси.

На рисунке 5.1 представлена номограмма для определения вязкости смеси нефтепродуктов разной вязкости при одной температуре.

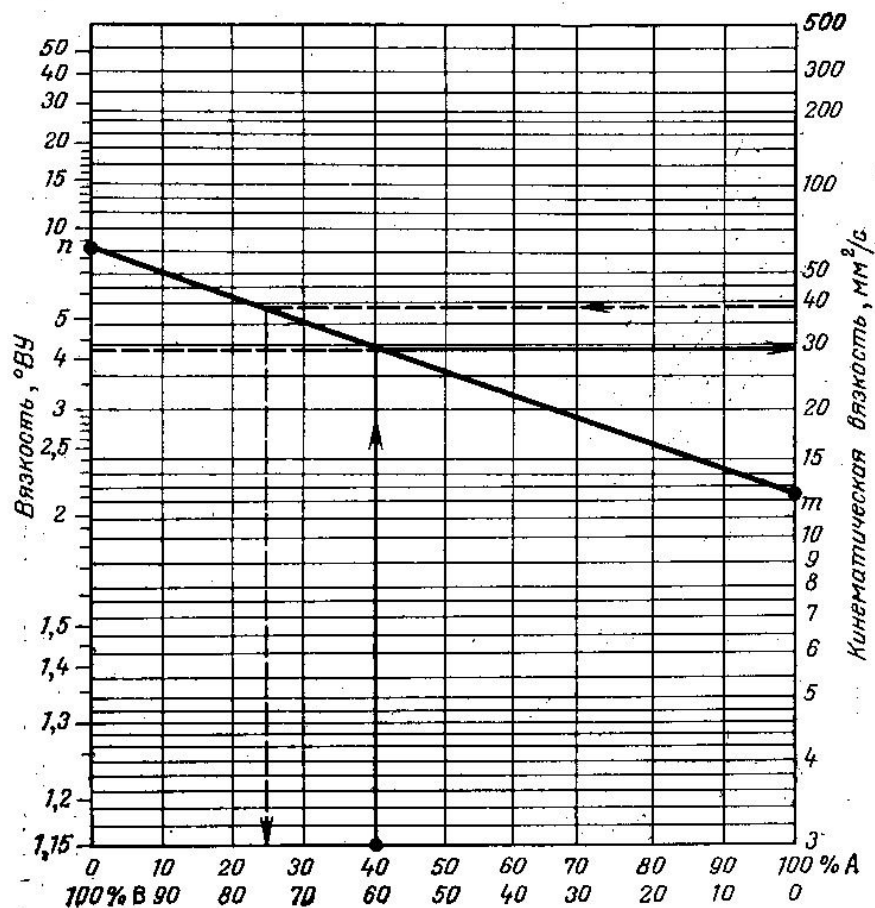


Рисунок 5.1 – Номограмма для определения вязкости смесей нефтепродуктов

Для работы с этой номограммой необходимо на правой вертикальной оси отложить вязкость менее вязкого продукта, а на левой – вязкость более вязкого продукта и соединить эти точки прямой линией (*mn*). Далее, находя на оси абсцисс точку, соответствующую содержанию менее вязкого компонента по верхней шкале, необходимо восстановить из неё перпендикуляр до прямой линии (*mn*) и из точки пересечения двух линий провести горизонтальную прямую к той оси, на которой указана нужная размерность вязкости.

5.2. Вязкость газов и паров

Для паров индивидуальных углеводородов, у которых $30 < M < 120$, при 273 К вязкость рассчитывается по формулам

$$\mu_0 = (1,445 - 0,42 \lg M) \cdot 10^{-7}, \quad (5.15)$$

$$\nu_0 = -3,4 - 1,23 \lg M. \quad (5.16)$$

Для расчетов вязкости индивидуальных углеводородных газов применяется формула Фроста

$$\mu = T(6,6 - 2,25 \lg M) \cdot 10^{-8}. \quad (5.17)$$

Также применимо уравнение, предложенное Фальковским

$$\mu_0 = 1,286 \cdot 10^{-4} M^{1/2} p_{кр}^{2/3} T_{пр} \quad (5.18)$$

Вязкость углеводородных паров при атмосферном давлении можно определить с помощью диаграммы, приведенной на рисунке 5.2.

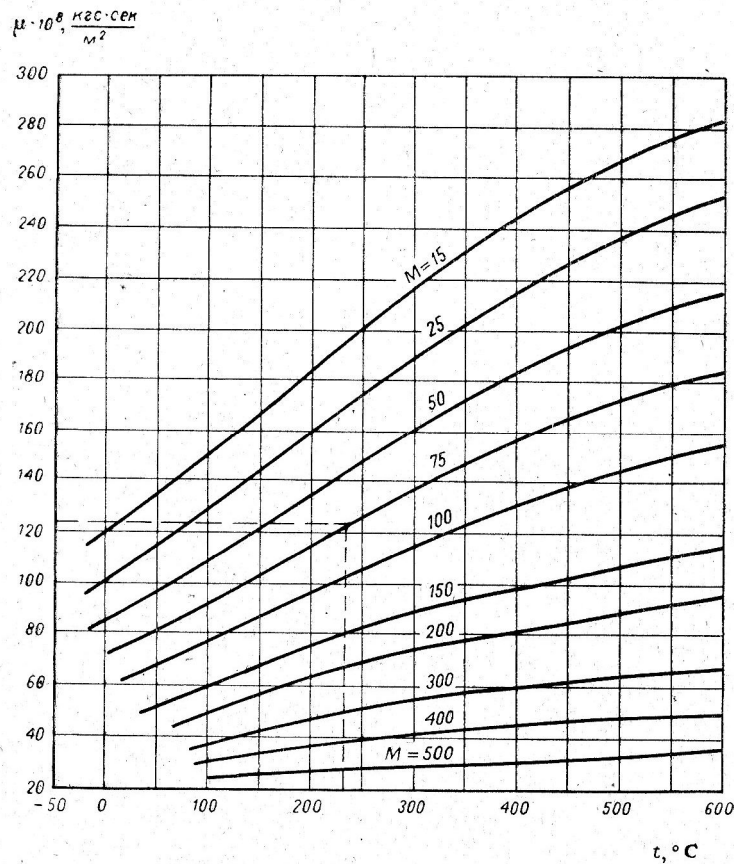


Рисунок 5.2 – Диаграмма для определения вязкости паров углеводородов при атмосферном давлении

Температурная зависимость вязкости газов и паров при атмосферном давлении в широком интервале изменения температуры чаще всего описывается уравнением Сатерленда

$$\mu_T = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,5} \quad (5.19)$$

Для приближенных расчетов вязкости величину постоянной C можно находить по формуле Фогеля

$$C = 1,47T_{крит} \quad (5.20)$$

Зависимость вязкости газов от давления наиболее просто можно определить с помощью номограммы, представленной на рисунке 5.3.

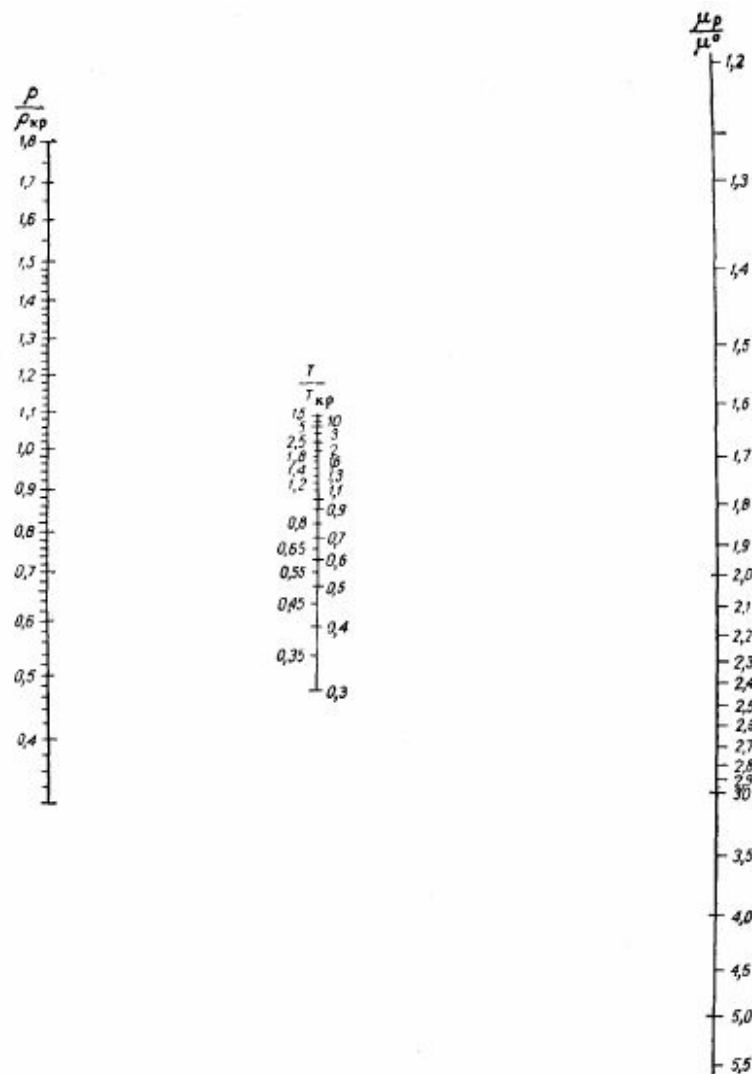


Рисунок 5.3 – Номограмма для определения μ_p/μ^0 в зависимости от T_{np} и p_{np}

Пример 5.1. Нефтяная фракция 180 – 300 °С имеет при 50 °С кинематическую вязкость 1,74 сСт и относительную плотность $d_4^{20} = 0,8283$. Определить динамическую и условную вязкость фракции.

Решение. Переход между кинематической и динамической вязкостью производится по преобразованному уравнению (5.1)

$$\mu = \nu \rho ,$$

в котором все параметры должны быть определены при одной температуре.

Значение абсолютной плотности нефтяной фракции при 50 °С (кг/м^3) определим по уравнению Мановяна (1.8):

$$\rho = 1000 \cdot 0,8283 - \frac{0,58}{0,8283} (50 - 20) - \frac{|50 - 1200(0,8283 - 0,68)|}{1000} (50 - 20) = 803,45$$

Тогда по уравнению (5.1) динамическая вязкость равна:

$$\mu = 1,74 \cdot 10^{-6} \cdot 803,45 = 1,398 \text{ мПа}\cdot\text{с}.$$

Т.к. $\nu < 120 \text{ мм}^2/\text{с}$ (сСт), то для перехода к условной вязкости воспользуемся преобразованным уравнением (5.2):

$$7,31(^{\circ}BU_t)^2 - ^{\circ}BU_t \nu_t - 6,31 = 0,$$

$$7,31(^{\circ}BU_t)^2 - 1,74^{\circ}BU_t - 6,31 = 0.$$

решая которое как квадратное, найдем значение условной вязкости при 50°C .

В результате решения имеем 2 корня: $(-0,818; 1,056)$. Корень $-0,818$ не удовлетворяет физическому смыслу задачи, поэтому условная вязкость при 50°C равна $1,056^{\circ}BU$.

Пример 5.2. Фракция $350 - 500^{\circ}\text{C}$ шурчинской нефти имеет вязкость при 50°C равную $15,2$ сСт, а при 100°C – равную $4,2$ сСт. Чему равна её вязкость при 85°C ?

Решение. Воспользуемся формулой Гросса (5.7):

$$\lg \frac{\nu_1}{\nu_2} = n \lg \frac{t_2}{t_1}.$$

Для расчетов с её использованием сначала по двум имеющимся парам значений температура-вязкость вычислим значение коэффициента n :

$$n = \frac{\lg \frac{15,2}{4,2}}{\lg \frac{100}{50}} = 1,856.$$

Далее, используя одну из имеющихся пар значений температура-вязкость и заданную температуру, определим вязкость при заданной температуре:

$$\nu_1 = \nu_2 \cdot 10^{n \lg \frac{t_2}{t_1}} = 4,2 \cdot 10^{1,856 \cdot \lg \frac{100}{85}} = 5,678 \text{ сСт}.$$

Решим эту же задачу с помощью уравнения Вальтера (5.8):

$$\lg \lg 10^6 (\nu + 0,8 \cdot 10^{-6}) = a + b \lg T.$$

Расчет коэффициентов a и b производится по уравнениям (5.9) и (5.10).

$$\lg T_1 = \lg(t_1 + 273) = \lg(50 + 273) = 2,509,$$

$$\lg T_2 = \lg(t_2 + 273) = \lg(100 + 273) = 2,572,$$

$$\lg \lg 10^6 (\nu_1 + 0,8 \cdot 10^{-6}) = \lg \lg 10^6 (15,2 \cdot 10^{-6} + 0,8 \cdot 10^{-6}) = \lg \lg 16 = 0,081,$$

$$\lg \lg 10^6 (\nu_2 + 0,8 \cdot 10^{-6}) = \lg \lg 10^6 (4,2 \cdot 10^{-6} + 0,8 \cdot 10^{-6}) = \lg \lg 5 = -0,156.$$

Коэффициент b :

$$b = \frac{0,081 - (-0,156)}{2,509 - 2,572} = -3,779.$$

Коэффициент a :

$$a = 0,081 - (-3,779) \cdot 2,509 = 9,563.$$

Таким образом, температурная зависимость вязкости нефтяной фракции имеет вид:

$$\lg \lg 10^6 (\nu + 0,8 \cdot 10^{-6}) = 9,563 - 3,779 \lg T.$$

При 85 °С правая часть уравнения равна:

$$9,563 - 3,779 \lg(85 + 273) = -0,088.$$

$$\lg 10^6 (\nu + 0,8 \cdot 10^{-6}) = 10^{-0,088} = 0,816,$$

$$\nu = 10^{0,816} - 0,8 = 5,75 \text{ сСт.}$$

Пример 5.3. Определить вязкость узкой нефтяной фракции при давлении 2,4 МПа и 20 °С, если вязкость этой фракции при атмосферном давлении и той же температуре была 19,2 сСт.

Решение. Зависимость вязкости от давления описывается уравнением Манстона (5.11). Вязкость (сСт) при повышенном давлении вычислим по преобразованному уравнению Манстона:

$$\begin{aligned} \nu &= \nu_T 10^{0,142 P(0,0239 + 0,762 \nu_T^{0,278})} = \\ &= \nu_T 10^{0,142 \cdot 2,4(0,0239 + 0,762 \cdot 19,2^{0,278})} = 76,197 \end{aligned}$$

Пример 5.4. Вычислить вязкость смеси, состоящей из 20 кг нефтепродукта вязкостью 2,58 сСт и 45 кг нефтепродукта вязкостью 12,08 сСт.

Решение. Вычислим массовые доли компонентов в смеси:

$$x_A = \frac{20}{20 + 45} = 0,308,$$

$$x_B = 1 - 0,31 = 0,692.$$

Для расчета вязкости смеси воспользуемся уравнением (5.14).

$$(1 - x_B) \lg \lg (\nu_A + 0,8) = 0,308 \lg \lg (2,58 + 0,8) = -0,085,$$

$$x_B \lg \lg (\nu_B + 0,8) = 0,692 \lg \lg (12,08 + 0,8) = 0,031$$

$$\lg \lg (\nu_{см} + 0,8) = (-0,085) - 0,031 = -0,116,$$

$$\lg (\nu_{см} + 0,8) = 10^{-0,116} = 0,765,$$

$$\nu_{см} = 10^{0,765} - 0,8 = 5,018 \text{ сСт.}$$

Пример 5.5. Определить вязкость паров бензола при 270 °С и давлении 1,5 МПа.

Решение. Вязкость паров бензола при нормальных условиях определим по уравнению (5.15):

$$\mu_0 = (1,445 - 0,42 \lg 78) \cdot 10^{-7} = 6,5 \cdot 10^{-8} \text{ Па}\cdot\text{с}.$$

Критические параметры для бензола найдем в таблице

$$t_{кр} = 288,5 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$P_{кр} = 48,6 \text{ атм} = 4,92 \text{ МПа}.$$

Вычислим приведенные параметры:

$$T_{np} = \frac{T}{T_{кр}} = \frac{270 + 273}{288,5 + 273} = 0,97,$$

$$P_{np} = \frac{P}{P_{кр}} = \frac{1,5}{4,92} = 0,3.$$

Воспользуемся номограммой, представленной на рисунке 5.3. На шкале $\frac{P}{P_{кр}}$ отмечаем точку 0,3; на шкале $\frac{T}{T_{кр}}$ - точку 0,97. Через две точки проводим прямую до пересечения со шкалой $\frac{\mu_P}{\mu_0}$ - она соответствует значению 1,2.

То есть

$$\frac{\mu_P}{\mu_0} = 1,2,$$

тогда

$$\mu_P = 1,2\mu_0 = 1,2 \cdot 6,5 \cdot 10^{-8} = 7,8 \cdot 10^{-8} \text{ Па}\cdot\text{с}.$$

Задачи для самостоятельного решения

- 241.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 20 °С равна 2,06 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,8325$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
- 242.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 50 °С равна 11,0 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,884$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
- 243.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 20 °С равна 142,3 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,900$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
- 244.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 50 °С равна 46,67 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,9048$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
- 245.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 20 °С равна 19,85 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,8752$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.

246. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 50 °С равна 92,15 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,9127$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
247. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 20 °С равна 18,41 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,876$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
248. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 50 °С равна 34,6 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,8998$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
249. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 20 °С равна 15,2 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,8725$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
250. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 50 °С равна 26,0 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,8895$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
251. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 20 °С равна 14,5 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,8625$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
252. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 50 °С равна 20,8 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,886$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
253. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 20 °С равна 119,2 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,8895$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
254. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 50 °С равна 120,9 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,9207$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
255. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 20 °С равна 73,85 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,8983$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
256. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 50 °С равна 9,65 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,8925$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
257. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 20 °С равна 35,03 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,8925$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
258. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 50 °С равна 49,0 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,9014$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.

259. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 20 °С равна 32,6 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,8706$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
260. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 50 °С равна 38,38 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,8965$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
261. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 20 °С равна 21,42 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,8665$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
262. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 50 °С равна 29,36 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,8901$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
263. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 20 °С равна 28,38 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,863$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
264. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 50 °С равна 61,35 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,8953$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
265. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 20 °С равна 20,52 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,8555$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
266. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 50 °С равна 46,71 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,892$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
267. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 20 °С равна 36,34 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,8828$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
268. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 50 °С равна 49,78 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,9122$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
269. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 20 °С равна 14,9 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,8665$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
270. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 50 °С равна 22,26 сСт, относительная плотность $d_4^{20} = 0,898$. Определить динамическую и условную вязкость при той же температуре.
271. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 20 °С равна 1,84 сСт, а при 50 °С – 1,23 сСт. Определить кинематическую вязкость этой фракции при 75 °С. Задачу решить двумя способами.
272. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 20 °С равна 6,02 сСт, а при 50 °С – 3,01 сСт. Определить кинематическую вязкость этой фракции при 35 °С. Задачу решить двумя способами.

288. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 50 °С равна 16,50 сСт, а при 100 °С – 4,20 сСт. Определить кинематическую вязкость этой фракции при 98 °С. Задачу решить двумя способами.
289. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 50 °С равна 14,00 сСт, а при 100 °С – 3,78 сСт. Определить кинематическую вязкость этой фракции при 87 °С. Задачу решить двумя способами.
290. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 50 °С равна 11,1 сСт, а при 100 °С – 3,46 сСт. Определить кинематическую вязкость этой фракции при 105 °С. Задачу решить двумя способами.
291. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 50 °С равна 23,00 сСт, а при 100 °С – 5,72 сСт. Определить кинематическую вязкость этой фракции при 104 °С. Задачу решить двумя способами.
292. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 50 °С равна 18,75 сСт, а при 100 °С – 4,82 сСт. Определить кинематическую вязкость этой фракции при 84 °С. Задачу решить двумя способами.
293. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 50 °С равна 14,11 сСт, а при 100 °С – 4,12 сСт. Определить кинематическую вязкость этой фракции при 75 °С. Задачу решить двумя способами.
294. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 50 °С равна 17,6 сСт, а при 100 °С – 5,15 сСт. Определить кинематическую вязкость этой фракции при 108 °С. Задачу решить двумя способами.
295. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 20 °С равна 15,12 сСт, а при 100 °С – 2,60 сСт. Определить кинематическую вязкость этой фракции при 94 °С. Задачу решить двумя способами.
296. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 20 °С равна 19,20 сСт, а при 100 °С – 2,60 сСт. Определить кинематическую вязкость этой фракции при 77 °С. Задачу решить двумя способами.
297. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 20 °С равна 14,20 сСт, а при 100 °С – 2,30 сСт. Определить кинематическую вязкость этой фракции при 85 °С. Задачу решить двумя способами.
298. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 20 °С равна 11,40 сСт, а при 100 °С – 2,00 сСт. Определить кинематическую вязкость этой фракции при 87 °С. Задачу решить двумя способами.
299. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 20 °С равна 8,60 сСт, а при 100 °С – 1,7 сСт. Определить кинематическую вязкость этой фракции при 95 °С. Задачу решить двумя способами.
300. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при 20 °С равна 6,80 сСт, а при 50 °С – 3,10 сСт. Определить кинематическую вязкость этой фракции при 71 °С. Задачу решить двумя способами.
301. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{50} = 10,18$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и 3,25 кгс/см².

- 302.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{50} = 56,44$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и 14000 кгс/м^2 .
- 303.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{50} = 50,3$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и 850 мм рт. ст.
- 304.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{20} = 23,7$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и $2,5 \text{ атм.}$
- 305.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{50} = 43,79$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и $17000 \text{ мм вод. ст.}$
- 306.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{50} = 21,78$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и $1,8 \text{ ат.}$
- 307.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{100} = 12,75$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и $1,5 \text{ кгс/см}^2$.
- 308.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{50} = 43,20$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и 15720 кгс/м^2 .
- 309.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{20} = 10,30$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и 900 мм рт. ст.
- 310.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{50} = 30,0$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и $1,7 \text{ атм.}$
- 311.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{50} = 20,3$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и $16550 \text{ мм вод. ст.}$
- 312.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{50} = 14,6$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и $1,95 \text{ ат.}$
- 313.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{100} = 13,45$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и $1,47 \text{ кгс/см}^2$.
- 314.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{50} = 98,19$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и 18200 кгс/м^2 .
- 315.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{20} = 286,4$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и 1400 мм рт. ст.

- 316.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{50} = 93,27$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и 1,41 атм.
- 317.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{50} = 92,15$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и 13220 мм вод. ст.
- 318.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{50} = 46,67$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и 2,08 ат.
- 319.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{20} = 96,29$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и $1,72 \text{ кгс/см}^2$.
- 320.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{50} = 81,67$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и 18700 кгс/м^2 .
- 321.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{50} = 67,68$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и 955 мм рт. ст.
- 322.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{20} = 142,3$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и 2,25 атм.
- 323.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{50} = 52,71$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и 16625 мм вод. ст.
- 324.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{20} = 63,97$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и 3,3 ат.
- 325.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{50} = 54,90$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и $2,7 \text{ кгс/см}^2$.
- 326.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{50} = 34,6$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и 17500 кгс/м^2 .
- 327.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{50} = 27,0$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и 1000 мм рт. ст.
- 328.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{20} = 18,41$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и 1,9 атм.
- 329.** Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{50} = 45,5$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и 18000 мм вод. ст.

330. Кинематическая вязкость узкой нефтяной фракции при атмосферном давлении $\nu_{50} = 26,0$ сСт. Определить вязкость фракции при той же температуре и 2,4 ат.
331. Определить вязкость смеси, состоящей из 40 % (масс.) фракции с вязкостью 15 сСт и 60 % (масс.) фракции с вязкостью 100 сСт.
332. Определить вязкость смеси, состоящей из 45 % (масс.) фракции с вязкостью 20 сСт и 55 % (масс.) фракции с вязкостью 55 сСт.
333. Определить вязкость смеси, состоящей из 25 % (масс.) фракции с вязкостью 52 сСт и 75 % (масс.) фракции с вязкостью 105 сСт.
334. Определить вязкость смеси, состоящей из 27 % (масс.) фракции с вязкостью 27 сСт и 73 % (масс.) фракции с вязкостью 104 сСт.
335. Определить вязкость смеси, состоящей из 30 % (масс.) фракции с вязкостью 40 сСт и 70 % (масс.) фракции с вязкостью 50 сСт.
336. Определить вязкость смеси, состоящей из 17 % (масс.) фракции с вязкостью 75 сСт и 83 % (масс.) фракции с вязкостью 30 сСт.
337. Определить вязкость смеси, состоящей из 44 % (масс.) фракции с вязкостью 22 сСт и 56 % (масс.) фракции с вязкостью 75 сСт.
338. Определить вязкость смеси, состоящей из 48 % (масс.) фракции с вязкостью 70 сСт и 52 % (масс.) фракции с вязкостью 150 сСт.
339. Определить вязкость смеси, состоящей из 33 % (масс.) фракции с вязкостью 150 сСт и 67 % (масс.) фракции с вязкостью 80 сСт.
340. Определить вязкость смеси, состоящей из 29 % (масс.) фракции с вязкостью 100 сСт и 71 % (масс.) фракции с вязкостью 190 сСт.
341. Определить вязкость смеси, состоящей из 20 % (масс.) фракции с вязкостью 65 сСт и 80 % (масс.) фракции с вязкостью 145 сСт.
342. Определить вязкость смеси, состоящей из 50 % (масс.) фракции с вязкостью 70 сСт и 50 % (масс.) фракции с вязкостью 180 сСт.
343. Определить вязкость смеси, состоящей из 25 % (масс.) фракции с вязкостью 45 сСт и 75 % (масс.) фракции с вязкостью 100 сСт.
344. Определить вязкость смеси, состоящей из 37 % (масс.) фракции с вязкостью 35 сСт и 63 % (масс.) фракции с вязкостью 90 сСт.
345. Определить вязкость смеси, состоящей из 41 % (масс.) фракции с вязкостью 80 сСт и 59 % (масс.) фракции с вязкостью 120 сСт.
346. Определить вязкость смеси, состоящей из 26 % (масс.) фракции с вязкостью 36 сСт и 74 % (масс.) фракции с вязкостью 98 сСт.
347. Определить вязкость смеси, состоящей из 40 % (масс.) фракции с вязкостью 43 сСт и 60 % (масс.) фракции с вязкостью 85 сСт.
348. Определить вязкость смеси, состоящей из 38 % (масс.) фракции с вязкостью 62 сСт и 62 % (масс.) фракции с вязкостью 110 сСт.
349. Определить вязкость смеси, состоящей из 47 % (масс.) фракции с вязкостью 90 сСт и 53 % (масс.) фракции с вязкостью 180 сСт.
350. Определить вязкость смеси, состоящей из 62 % (масс.) фракции с вязкостью 140 сСт и 38 % (масс.) фракции с вязкостью 57 сСт.
351. Определить вязкость смеси, состоящей из 28 % (масс.) фракции с вязкостью 100 сСт и 72 % (масс.) фракции с вязкостью 130 сСт.

352. Определить вязкость смеси, состоящей из 12 % (масс.) фракции с вязкостью 97 сСт и 88 % (масс.) фракции с вязкостью 205 сСт.
353. Определить вязкость смеси, состоящей из 47 % (масс.) фракции с вязкостью 65 сСт и 53 % (масс.) фракции с вязкостью 170 сСт.
354. Определить вязкость смеси, состоящей из 31 % (масс.) фракции с вязкостью 155 сСт и 69 % (масс.) фракции с вязкостью 50 сСт.
355. Определить вязкость смеси, состоящей из 30 % (масс.) фракции с вязкостью 140 сСт и 70 % (масс.) фракции с вязкостью 180 сСт.
356. Определить вязкость смеси, состоящей из 34 % (масс.) фракции с вязкостью 72 сСт и 66 % (масс.) фракции с вязкостью 144 сСт.
357. Определить вязкость смеси, состоящей из 60 % (масс.) фракции с вязкостью 175 сСт и 40 % (масс.) фракции с вязкостью 210 сСт.
358. Определить вязкость смеси, состоящей из 25 % (масс.) фракции с вязкостью 45 сСт и 75 % (масс.) фракции с вязкостью 200 сСт.
359. Определить вязкость смеси, состоящей из 42 % (масс.) фракции с вязкостью 37 сСт и 58 % (масс.) фракции с вязкостью 95 сСт.
360. Определить вязкость смеси, состоящей из 23 % (масс.) фракции с вязкостью 70 сСт и 87 % (масс.) фракции с вязкостью 130 сСт.
361. Определить кинематическую и динамическую вязкость этана при 270 °С и атмосферном давлении; при 270 °С и 5 атм.
362. Определить кинематическую и динамическую вязкость этилена при 350 °С и атмосферном давлении; при 350 °С и 7,2 кгс/см².
363. Определить кинематическую и динамическую вязкость пропана при 200 °С и атмосферном давлении; при 200 °С и 18000 кгс/м².
364. Определить кинематическую и динамическую вязкость метана при 170 °С и атмосферном давлении; при 170 °С и 2,8 ат.
365. Определить кинематическую и динамическую вязкость пропилена при 400 °С и атмосферном давлении; при 400 °С и 1560 мм рт. ст.
366. Определить кинематическую и динамическую вязкость бутана при 600 °С и атмосферном давлении; при 600 °С и 8,2 атм.
367. Определить кинематическую и динамическую вязкость бутилена при 450 °С и атмосферном давлении; при 400 °С и 25000 кгс/м².
368. Определить кинематическую и динамическую вязкость ацетилену при 550 °С и атмосферном давлении; при 550 °С и 6,4 ат.
369. Определить кинематическую и динамическую вязкость неопентана при 440 °С и атмосферном давлении; при 440 °С и 2100 мм рт. ст.
370. Определить кинематическую и динамическую вязкость амилена при 750 °С и атмосферном давлении; при 750 °С и 9,5 атм.
371. Определить кинематическую и динамическую вязкость этана при 120 °С и атмосферном давлении; при 120 °С и 3,6 кгс/см².
372. Определить кинематическую и динамическую вязкость этилена при 375 °С и атмосферном давлении; при 375 °С и 30000 кгс/м².
373. Определить кинематическую и динамическую вязкость пропана при 300 °С и атмосферном давлении; при 300 °С и 2,9 ат.

374. Определить кинематическую и динамическую вязкость метана при 470 °С и атмосферном давлении; при 470 °С и 2850 мм рт. ст.
375. Определить кинематическую и динамическую вязкость пропилена при 220 °С и атмосферном давлении; при 220 °С и 4,1 атм.
376. Определить кинематическую и динамическую вязкость бутана при 520 °С и атмосферном давлении; при 520 °С и 16900 кгс/м².
377. Определить кинематическую и динамическую вязкость бутилена при 355 °С и атмосферном давлении; при 355 °С и 5,17 ат.
378. Определить кинематическую и динамическую вязкость ацетилену при 750 °С и атмосферном давлении; при 750 °С и 3700 мм рт. ст.
379. Определить кинематическую и динамическую вязкость неопентана при 245 °С и атмосферном давлении; при 245 °С и 5,2 атм.
380. Определить кинематическую и динамическую вязкость амилена при 360 °С и атмосферном давлении; при 360 °С и 15 кгс/см².
381. Определить кинематическую и динамическую вязкость этана при 270 °С и атмосферном давлении; при 270 °С и 36000 кгс/м².
382. Определить кинематическую и динамическую вязкость этилена при 320 °С и атмосферном давлении; при 320 °С и 3,0 ат.
383. Определить кинематическую и динамическую вязкость пропана при 150 °С и атмосферном давлении; при 150 °С и 2200 мм рт. ст..
384. Определить кинематическую и динамическую вязкость метана при 280 °С и атмосферном давлении; при 280 °С и 7,1 атм.
385. Определить кинематическую и динамическую вязкость пропилена при 125 °С и атмосферном давлении; при 125 °С и 15600 кгс/м².
386. Определить кинематическую и динамическую вязкость бутана при 440 °С и атмосферном давлении; при 440 °С и 4,8 ат.
387. Определить кинематическую и динамическую вязкость бутилена при 660 °С и атмосферном давлении; при 660 °С и 4000 мм рт. ст.
388. Определить кинематическую и динамическую вязкость ацетилену при 450 °С и атмосферном давлении; при 450 °С и 4,8 атм.
389. Определить кинематическую и динамическую вязкость неопентана при 300 °С и атмосферном давлении; при 300 °С и 2,5 кгс/см².
390. Определить кинематическую и динамическую вязкость амилена при 260 °С и атмосферном давлении; при 260 °С и 27800 кгс/м².

6. Характеризующий фактор

Характеризующий фактор – параметр, определяющий химическую природу и степень парафинистости нефтепродукта. Обычно характеризующий фактор выражают через среднюю мольную температуру кипения

$$K = \frac{1,216\sqrt[3]{T_{cp.мол.}}}{d_{15}^{15}}, \quad (6.1)$$

Предложена формула для расчета *характеристического фактора Ватсона*

$$K_w = \frac{1,2251\sqrt[3]{T_{cp.куб.}}}{d_{15}^{15}}, \quad (6.2)$$

который может быть использован в уточненной формуле Войнова-Эйгенсона для расчета молекулярной массы.

7. Средняя температура кипения

В расчетах термодинамических свойств многокомпонентных углеводородных систем используют различные характеристические точки кипения, зависящие от метода фракционирования и способа усреднения температур перегонки и ректификации. Различают среднюю температуру кипения (СТК), среднюю объемную температуру кипения (СОТК), среднюю мольную (мольную) температуру кипения (СМТК), среднюю весовую (массовую) температуру кипения (СВТК), среднюю кубическую температуру кипения (СКТК) и среднюю усредненную температуру кипения (СУТК).

Для смесей известного состава такие температуры рассчитываются по формулам:

- СТК

$$\bar{t} = \frac{t_{HK} + t_{KK}}{2}, \quad (7.1)$$

где t_{HK} - температура начала кипения, °С;

t_{KK} - температура конца кипения, °С;

-СОТК

$$t_{cp.об.} = \frac{\sum V_i t_i}{\sum V_i} = \sum \varphi_i t_i, \quad (7.2)$$

где V_i - объем каждого компонента многокомпонентной системы, м³;

φ_i - объемная доля компонентов в смеси, об. доли;

t_i - среднеарифметические значения температур кипения компонентов, °С;

- СМТК

$$t_{cp.мол.} = \frac{\sum_i n_i t_i}{\sum_i n_i} = \sum_i \chi_i t_i, \quad (7.3)$$

где n_i - количество вещества каждого компонента, КМОЛЬ;
 χ_i - мольная доля компонентов в смеси, МОЛ. ДОЛИ;

- СВТК

$$t_{cp.вес.} = \frac{\sum_i m_i t_i}{\sum_i m_i} = \sum_i \omega_i t_i, \quad (7.4)$$

где m_i - масса каждого компонента, КГ;
 ω_i - массовая доля компонентов в смеси, МОЛ. ДОЛИ;

- СКТК

$$t_{cp.куб.} = \left[\sum_i \varphi_i (t_i + 273)^{1/3} \right]^3, \quad (7.5)$$

- СУТК

$$t_{cp.уср.} = \frac{t_{cp.мол.} + t_{cp.куб.}}{2}. \quad (7.6)$$

Переход между объемными, мольными и массовыми долями осуществляется по формулам

$$\varphi_i = \frac{\frac{\omega_i}{(d_4^{20})_i}}{\sum_i \frac{\omega_i}{(d_4^{20})_i}} = \frac{\frac{\chi_i M_i}{(d_4^{20})_i}}{\sum_i \frac{\chi_i M_i}{(d_4^{20})_i}}, \quad (7.7)$$

$$\chi_i = \frac{\frac{\omega_i}{M_i}}{\sum_i \frac{\omega_i}{M_i}} = \frac{\frac{\varphi_i (d_4^{20})_i}{M_i}}{\sum_i \frac{\varphi_i (d_4^{20})_i}{M_i}}, \quad (7.8)$$

$$\omega_i = \frac{\frac{\varphi_i (d_4^{20})_i}{M_i}}{\sum_i \frac{\varphi_i (d_4^{20})_i}{M_i}} = \frac{\frac{\chi_i M_i}{(d_4^{20})_i}}{\sum_i \frac{\chi_i M_i}{(d_4^{20})_i}}. \quad (7.9)$$

Для многокомпонентных смесей неопределенного состава СМТК может быть определена по данным разгонки по Энглеру, используя формулы:

-для нефтей

$$t_{cp.об.} = \frac{t_{30} + t_{50} + t_{70}}{3}, \quad (7.10)$$

-для фракций

$$t_{cp.об.} = \frac{t_{10} + t_{30} + t_{50} + t_{70} + t_{90}}{5}. \quad (7.11)$$

При расчетах различных физико-химических свойств применяют разные характеристические температуры кипения, поэтому часто возникает необходимость взаимного пересчета температур. Такой пересчет возможен при наличии СОТК, определенной на основе кривой разгонки по Энглеру (ГОСТ 2177-92).

Существует способ пересчета температур по однотипным формулам

$$\left. \begin{array}{l} СМТК \\ СВТК \\ СКТК \\ СУТК \end{array} \right\} \rightarrow СОТК + \Delta T, \quad (7.12)$$

где ΔT определяется по графикам, представленным на рисунке 7.1, в зависимости от среднего наклона кривой разгонки по Энглеру

$$\alpha = \frac{t_{90} - t_{10}}{80}, \quad (7.13)$$

где t_{10} и t_{90} - температуры 10 и 90%-ного отгонов по Энглеру.

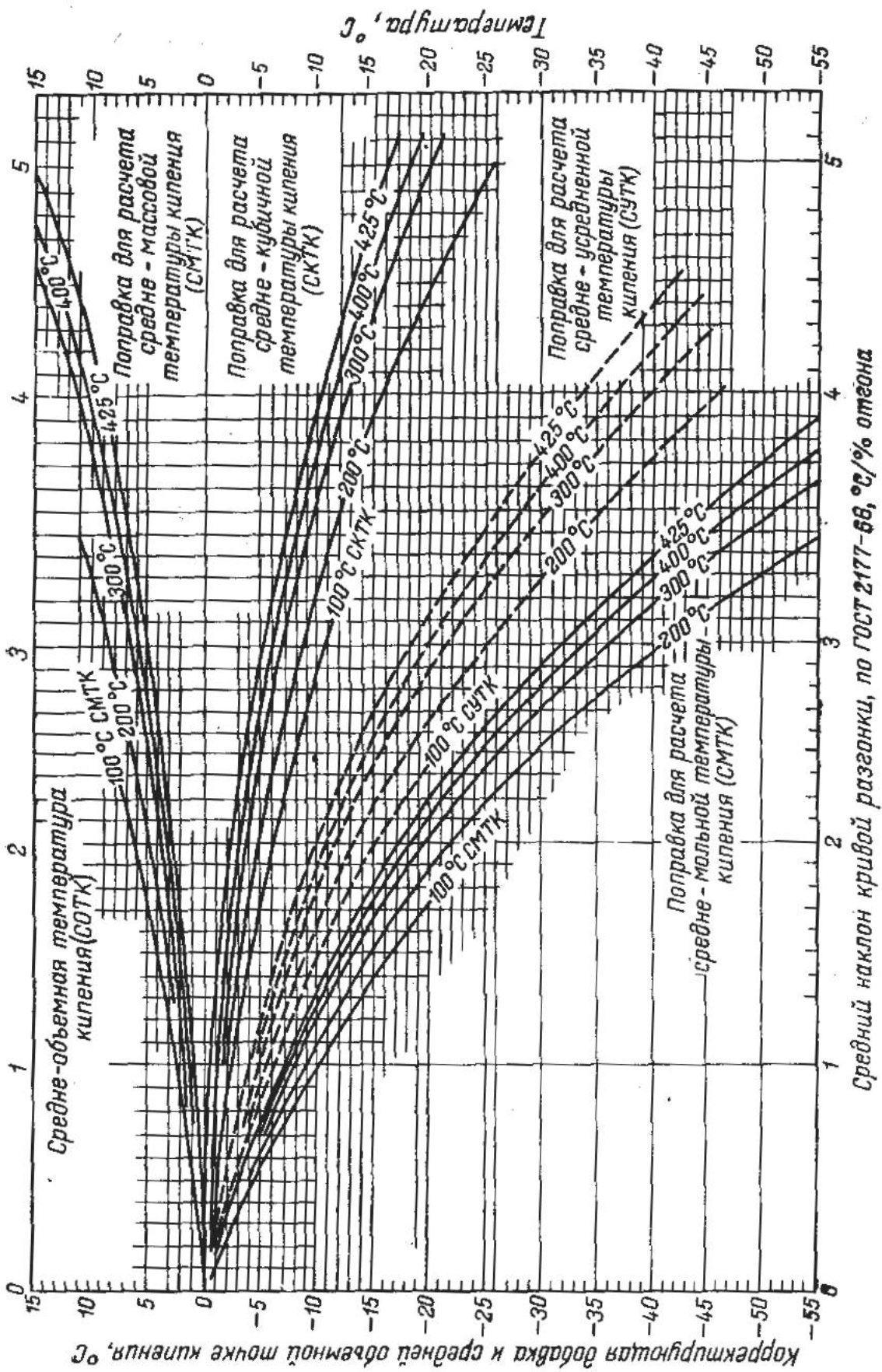


Рисунок 7.1 – Средние температуры кипения нефтяных фракций

Аналитический метод для определения величины поправки ΔT основан на аппроксимации графиков, изображенных на рисунке 7.1

$$\Delta T = \frac{5}{9} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=0}^2 a_{ij} \alpha_F^i T_F^j, \quad (7.14)$$

где $\alpha_F = 1,8\alpha$;

$$T_F = 1,8T_{ср.об.} + 32.$$

Коэффициенты a_{ij} приведены в таблице 7.1.

Коэффициенты a_{ij}

Таблица 7.1

Температура кипения	i	a_{ij}		
		$j=0$	$j=1$	$j=2$
СВТК	1	2,13548	$-4,04342 \cdot 10^{-4}$	$-0,138661 \cdot 10^{-5}$
	2	0,370134	$-1,316206 \cdot 10^{-3}$	$1,17275 \cdot 10^{-6}$
	3	0,0425424	$-0,622488 \cdot 10^{-5}$	$-3,20908 \cdot 10^{-8}$
СМТК	1	-10,02	$0,66927 \cdot 10^{-2}$	$-7,01419 \cdot 10^{-7}$
	2	-0,827035	$0,7712 \cdot 10^{-3}$	$-1,1169 \cdot 10^{-6}$
	3	0	0	0
	4	$-3,9394 \cdot 10^{-2}$	$4,8532 \cdot 10^{-5}$	$-1,137 \cdot 10^{-8}$
СУТК	1	-8,27	$1,3659 \cdot 10^{-2}$	$-0,79407 \cdot 10^{-5}$
	2	0,5258	$-0,3343 \cdot 10^{-2}$	$2,323 \cdot 10^{-6}$
	3	$-3,9394 \cdot 10^{-2}$	$3,11906 \cdot 10^{-4}$	$-1,4004 \cdot 10^{-7}$

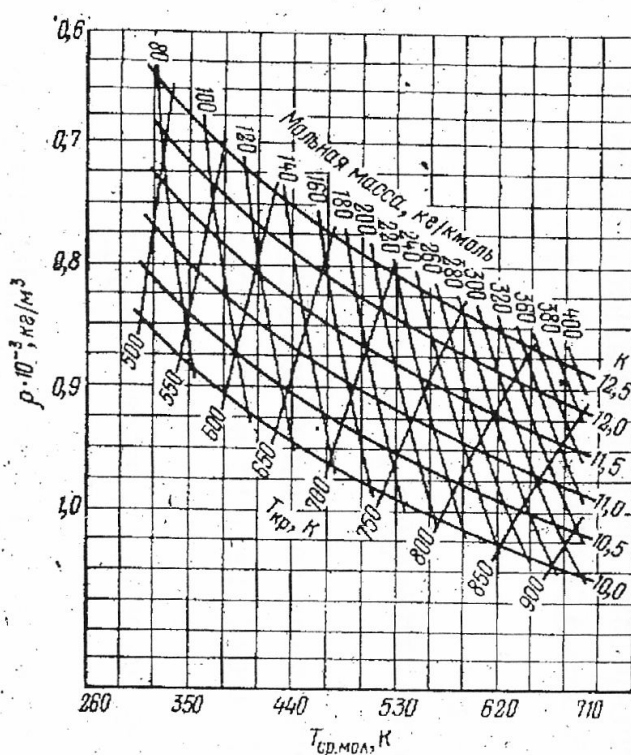


Рисунок 7.2 – Взаимозависимость мольной массы, критической температуры, плотности, средней мольной температуры кипения и характеризующего фактора нефтяных фракций

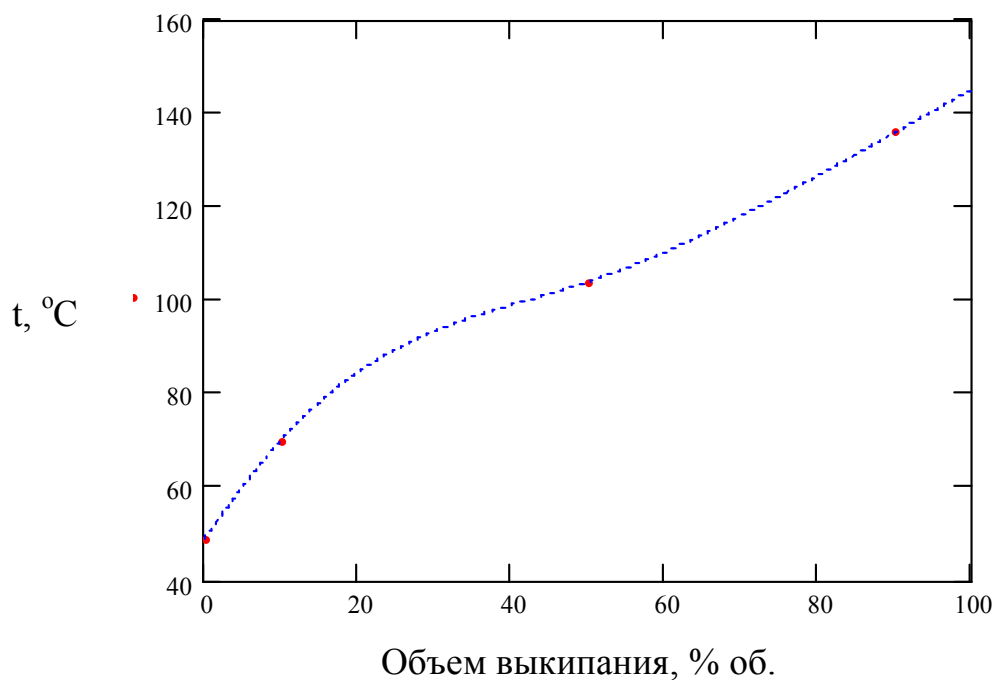
Пример 7.1. По представленной разгонке фракции 28 – 150 °С чубовской нефти по Энглеру рассчитать СОТК, СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	49	70	104	136

Решение. Среднюю объемную температуру кипения (СОТК) определим по уравнению (7.11)

$$t_{\text{ср.об.}} = \frac{t_{10} + t_{30} + t_{50} + t_{70} + t_{90}}{5},$$

для которого необходимо иметь значения температур выкипания 10, 30, 50, 70 и 90 % фракции. Для того, чтобы определить недостающие значения температур, воспользуемся графическим методом. На координатную плоскость нанесем точки, приведенные в исходных данных и соединим их плавной кривой. Далее, отмечая на оси абсцисс выходы в 30 и 70 % об., восстановим перпендикуляры до пересечения с кривой, а из точек пересечения – прямые, параллельные оси абсцисс до пересечения с осью ординат. Последние точки пересечения и будут температурами t_{30} и t_{70} .



Таким образом,

$$t_{30} = 93,4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$t_{70} = 118,1 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Средняя объемная температура кипения

$$t_{cp.об.} = \frac{70 + 93,4 + 104 + 118,1 + 136}{5} = 106,1 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Все остальные характеристические температуры определим по формулам (7.12).

Средний наклон кривой разгонки по Энглеру определим по уравнению (7.13):

$$\alpha = \frac{136 - 70}{80} = 0,825.$$

Для работы с рисунком 7.1 необходимо на оси абсцисс отметить точку, соответствующую среднему наклону кривой разгонки по Энглеру и провести из неё вертикальную прямую, пересекающую все кривые, изображенные на поле графика.

Для определения средней мольной (молярной) температуры кипения (СМТК) выделим на рисунке 7.1 нижнюю группу кривых и мысленно проведем кривую, соответствующую СМТК, между кривыми, соответствующими 100 и 200 $^\circ\text{C}$. Из точки пересечения мысленно проведенной кривой и вертикальной прямой, идущей из точки, соответствующей α , проведем горизонтальную линию до пересечения с осью ординат – эта точка соответствует поправке ΔT . В нашем случае

$$\Delta T = -7,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$t_{cp.мол.} = t_{cp.об.} - 7,5 = 106,1 - 7,5 = 98,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Для определения СВТК необходимо провести аналогичные действия с верхней группой кривых на рисунке 7.1.

$$\Delta T = 1,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$t_{cp.вес.} = t_{cp.об.} + 1,8 = 106,1 + 1,8 = 107,9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Для вычисления СКТК аналогично поступим с группой кривых, находящихся под группой кривых для СВТК.

$$\Delta T = -1,9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$t_{cp.куб.} = t_{cp.об.} - 1,9 = 106,1 - 1,9 = 104,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Аналогично для СУТК (группа кривых находится над группой для СМТК).

$$\Delta T = -4,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$t_{cp.уср.} = t_{cp.об.} - 4,5 = 106,1 - 4,5 = 101,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Другим способом решения этой задачи является использование уравнения (7.14).

$$\alpha_F = 1,8 \cdot 0,825 = 1,485.$$

$$T_F = 1,8(106,1 + 273) + 32 = 714,4 \text{ К}.$$

Расчет СВТК.

$$\Delta T = \frac{5}{9} (2,13548 \cdot 1,485 - 4,04342 \cdot 10^4 \cdot 1,485 \cdot 714,4 - 0,138661 \cdot 10^{-5} \times \\ \times 1,485 \cdot 714,4^2 + 0,370134 \cdot 1,485^2 - 1,316206 \cdot 10^{-3} \cdot 1,485^2 \cdot 714,4 + \\ + 1,17275 \cdot 10^{-6} \cdot 1,485^2 \cdot 714,4^2 + 0,0425424 \cdot 1,485^3 - 0,622488 \cdot 10^{-5} \times \\ \times 1,485^3 \cdot 714,4 - 3,20908 \cdot 10^{-8} \cdot 1,485^3 \cdot 714,4^2) = 1,03$$

$$t_{\text{ср.веч.}} = 106,1 + 1,03 = 107,13 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Расчет СМТК.

$$\Delta T = \frac{5}{9} ((-10,02) \cdot 1,485 + 0,66927 \cdot 10^{-2} \cdot 1,485 \cdot 714,4 - 7,01419 \cdot 10^{-7} \times \\ \times 1,485 \cdot 714,4^2 - 0,827035 \cdot 1,485^2 + 0,7712 \cdot 10^{-3} \cdot 1,485^2 \cdot 714,4 - 1,1169 \times \\ \times 10^{-6} \cdot 1,485^2 \cdot 714,4^2 - 3,9394 \cdot 10^{-2} \cdot 1,485^4 + 4,8532 \cdot 10^{-5} \cdot 1,485^4 \times \\ \times 714,4 - 1,137 \cdot 10^{-8} \cdot 1,485^4 \cdot 714,4^2) = -5,682$$

$$t_{\text{ср.мол.}} = 106,1 - 5,682 = 100,42 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Расчет СУТК.

$$\Delta T = \frac{5}{9} (-8,27 \cdot 1,485 + 1,3659 \cdot 10^{-2} \cdot 1,485 \cdot 714,4 - 0,79407 \cdot 10^{-5} \cdot 1,485 \times \\ \times 714,4^2 + 0,5258 \cdot 1,485^2 - 0,3343 \cdot 10^{-2} \cdot 1,485^2 \cdot 714,4 + 2,323 \cdot 10^{-6} \cdot 1,485^2 \times \\ \times 714,4^2 - 3,9394 \cdot 10^{-2} \cdot 1,485^3 + 3,11906 \cdot 10^{-4} \cdot 1,485^3 \cdot 714,4 - 1,4004 \cdot 10^{-7} \times \\ \times 1,485^3 \cdot 714,4^2) = -3,32$$

$$t_{\text{ср.уср.}} = 106,1 - 3,32 = 102,78.$$

Расчет СКТК можно провести из уравнения (7.6)

$$t_{\text{ср.куб.}} = 2t_{\text{ср.уср.}} - t_{\text{ср.мол.}} = 2 \cdot 102,78 - 100,42 = 105,14 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Задачи для самостоятельного решения

391. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С газлинской нефти дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	89	113	144	185

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

392. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С шурчинской нефти дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	82	107	144	184

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

393. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С караулбазарской нефти дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	86	106	141	182

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

394. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С шуртепинской нефти дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	108	128	153	184

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

395. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С карактайской нефти дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	75	100	145	195

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

396. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С тажигалинской нефти юрского горизонта дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	84	100	146	189

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

397. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С каратюбинской нефти нижнетриасового горизонта нефти дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	86	105	139	178

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

398. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С мартышинской нефти аптнеокомского горизонта дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	88	133	167	183

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

399. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С камышитовой нефти среднеюрского горизонта дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	63	99	158	181

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

400. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С дунгинской нефти нижнемеловой дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	62	86	129	177

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

401. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С жетыбайской нефти II горизонта дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	88	102	132	172

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

402. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С тасбулатской нефти X горизонта дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	82	110	142	178

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

403. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С восточножетыбайской нефти дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	78	107	148	181

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

404. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С узеньской нефти XV горизонта дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	59	90	138	184

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

405. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С курганбайской нефти дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	86	104	140	177

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

406. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С мортымьинской нефти Ю-II дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	67	90	130	182

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

407. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С шаимской нефти Ю-II дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	56	70	132	185

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

408. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С тевлинской нефти дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	50	76	129	185

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

409. Разгонка по Энглеру фракции 70 – 200 °С минчимкинской нефти дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	78	88	136	181

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

410. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С тепловской нефти дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	70	84	139	188

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

411. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С каркатеевской нефти дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	59	72	135	194

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

412. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С южно-балыкской нефти дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	69	89	130	180

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

413. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С салымской нефти дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	60	70	122	180

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

414. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С аганской нефти дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	48	77	128	190

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

415. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С локозовской нефти дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	56	74	130	174

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

416. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С губкинской нефти Ю-I дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	56	85	118	176

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

417. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С колендинской нефти дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	90	102	136	182

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

418. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С одоптинской нефти дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	91	108	146	195

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

419. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С некрасовской нефти дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	59	82	130	180

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

420. Разгонка по Энглеру фракции 28 – 200 °С кыдыланьинской нефти дает следующие результаты

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	83	102	141	190

Определить СМТК, СВТК, СКТК и СУТК.

8. Фракционный состав

Фракционный состав, в особенности светлых нефтепродуктов и широких фракций, зачастую определяют перегонкой по Энглеру (ГОСТ 2177-99), однако при расчетах фазовых равновесий предпочтительней иметь кривую ИТК.

Для получения кривой ИТК из кривой разгонки по Энглеру наиболее распространен метод Эдмистера, согласно которому сначала по температуре 50 % выкипания по Энглеру $t_{ГОСТ}^{50}$ вычисляется температурная разность $\Delta t_{ИТК}^{50}$. Температура 50 % выкипания по ИТК определяется по формуле

$$t_{ИТК}^{50} = t_{ГОСТ}^{50} + \Delta t_{ИТК}^{50} \quad (8.1)$$

Температурная разность $\Delta t_{ИТК}^{50}$ вычисляется по аналитической формуле

$$\Delta t_{ИТК}^{50} = -3 + 3,267 \cdot 10^{-2} (t_{ГОСТ}^{50} - 100) - 1,077 \cdot 10^{-4} (t_{ГОСТ}^{50} - 100)^2 + 0,7 \cdot 10^{-6} (t_{ГОСТ}^{50} - 100)^3 \quad (8.2)$$

Далее вычисляются разности температур разгонки по Энглеру $\Delta t_{ГОСТ}^{(x)}$ для интервалов 0-10, 10-30, 30-50, 50-70, 70-90, 90-100 % и определяют координаты кривой ИТК $\Delta t_{ИТК}^{(x)}$ по формулам

$$t_{ИТК}^{(x-1)} = t_{ИТК}^{(x)} - \Delta t_{ИТК}^{(x)} \quad (8.3)$$

$$t_{ИТК}^{(x+1)} = t_{ИТК}^{(x)} + \Delta t_{ИТК}^{(x)} \quad (8.4)$$

где $\Delta t_{ИТК}^{(x)}$ вычисляется из уравнения

$$\Delta t_{ГОСТ}^{(x)} = a \Delta t_{ИТК}^{(x)} + b (\Delta t_{ИТК}^{(x)})^2 + c (\Delta t_{ИТК}^{(x)})^3 \quad (8.5)$$

Коэффициенты для уравнения (8.5)

Таблица 8.1

Интервал, %	<i>a</i>	<i>b</i> ·10 ²	<i>c</i> ·10 ⁵
0-10	0,3119	0,9756	-6,041
10-30	0,2177	1,450	-7,661
30-50	0,3590	1,234	-6,769
50-70	0,4877	1,0459	-6,053
70-90	0,5996	0,909	-5,661
90-100	0,8177	0,640	-10,075

При разгонке нефти в аппаратах АРН-2 и ГрозНИИ образуется остаток, обуславливающий незавершенность кривой разгонки. Для экстраполяции этой кривой в зону высоких температур можно воспользоваться несложной вычислительной процедурой Педерсена, Томассена и Фриденслунда, состоящей в вычислении температур выкипания (К) 80 и 100 % (масс.) по формулам

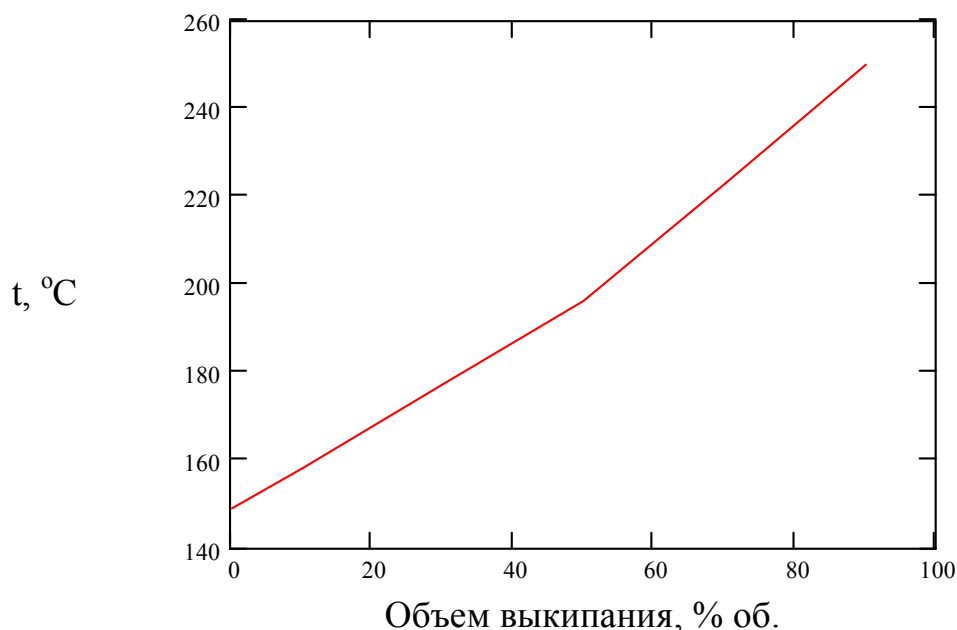
$$T_{ИТК}^{80} = 0,61277 (T_{ИТК}^{50})^{1,103} (d_{15}^{15})^{-0,6495} \quad (8.6)$$

$$T_{ИТК}^{100} = 12,106 (T_{ИТК}^{50})^{0,7097} (d_{15}^{15})^{0,6717} \quad (8.7)$$

Пример 8.1. Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки по Энглеру фракции 120 – 260 °С колендинской нефти ($d_4^{20} = 0,8435$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	149	158	196	250

Решение. Построим график разгонки по Энглеру.



Составим новую таблицу, в которую внесем точки 0, 10, 30, 50, 70, 90 % (интерполяция недостающих значений 30 и 70 % по графику) выкипания и температуры им соответствующие.

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	30	50	70	90
Температура, °С	149	158	177	196	223	250

По исходным данным определяем температуру 50 % выкипания по Энглеру

$$t_{\text{ГОСТ}}^{50} = 196 \text{ } ^\circ\text{С}.$$

Температурную разность вычисляем по формуле (8.2)

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{ИТК}}^{50} = & -3 + 3,267 \cdot 10^{-2} (196 - 100) - 1,077 \cdot 10^{-4} (196 - 100)^2 + \\ & + 0,7 \cdot 10^{-6} (196 - 100)^3 = -0,237 \end{aligned}$$

Температура 50 % выкипания по ИТК определяется по формуле (8.1)

$$t_{\text{ИТК}}^{50} = t_{\text{ГОСТ}}^{50} + \Delta t_{\text{ИТК}}^{50} = 196 - 0,237 = 195,76 \text{ } ^\circ\text{С}.$$

Вычисление величин $\Delta t_{\text{ГОСТ}}^{(x)}$ производится следующим образом. От каждой последующей температуры отнимается предыдущая. Вычисления заносятся в таблицу, напротив $t_{\text{ГОСТ}}^{50}$ ставится прочерк.

Далее для каждого значения $\Delta t_{ГОСТ}^{(x)}$ путем решения уравнения (8.5) отыскивается значение $\Delta t_{ИТК}^{(x)}$ (коэффициенты уравнения берутся из таблицы 8.1 для каждого интервала отгона). Значения $\Delta t_{ИТК}^{(x)}$ заносятся в таблицу причем, соответствующие отгону до 50 % со знаком «минус», а соответствующие отгону свыше 50 % с сохранением положительного значения. Для отгона 50 % заносится ранее определенное $\Delta t_{ИТК}^{50}$.

Рассмотрим подробно решение уравнения (8.5) для интервала 0 – 10 %. Используя коэффициенты из таблицы 8.1, получим общий вид уравнения

$$\Delta t_{ГОСТ}^{(0)} = 0,3119\Delta t_{ИТК}^{(0)} + 0,9756 \cdot 10^{-2} (\Delta t_{ИТК}^{(0)})^2 - 6,041 \cdot 10^{-5} (\Delta t_{ИТК}^{(0)})^3.$$

$$\Delta t_{ГОСТ}^{(0)} = 9,$$

$$0,3119\Delta t_{ИТК}^{(0)} + 0,9756 \cdot 10^{-2} (\Delta t_{ИТК}^{(0)})^2 - 6,041 \cdot 10^{-5} (\Delta t_{ИТК}^{(0)})^3 - 9 = 0.$$

Для упрощения вида уравнения обозначим $\Delta t_{ИТК}^{(0)} = x$

$$0,3119x + 0,9756 \cdot 10^{-2} x^2 - 6,041 \cdot 10^{-5} x^3 - 9 = 0.$$

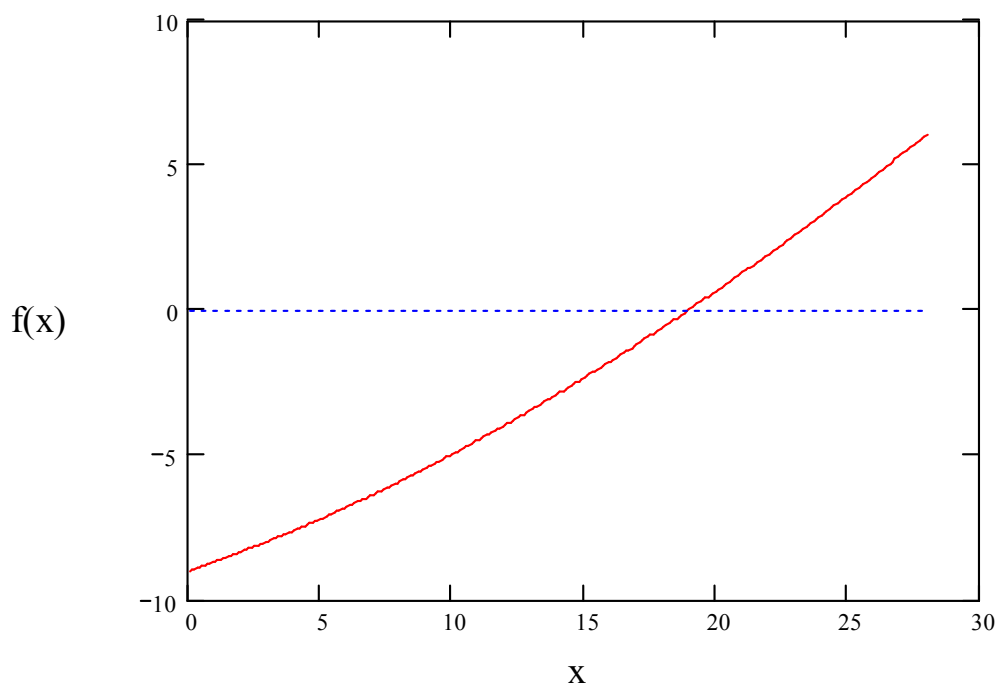
Для решения полученного уравнения применим графический метод. Составим таблицу значений функции

$$f(x) = 0,3119x + 0,9756 \cdot 10^{-2} x^2 - 6,041 \cdot 10^{-5} x^3 - 9 = 0,$$

задаваясь значениями x в интервале $[0; 3\Delta t_{ГОСТ}^{(0)}]$ целых чисел.

x	$f(x)$	x	$f(x)$	x	$f(x)$
0	-9,00	10	-4,97	19	0,03
1	-8,68	11	-4,47	20	0,66
2	-8,34	12	-3,96	21	1,29
3	-7,98	13	-3,43	22	1,94
4	-7,60	14	-2,89	23	2,60
5	-7,20	15	-2,33	24	3,27
6	-6,79	16	-1,76	25	3,95
7	-6,36	17	-1,18	26	4,64
8	-5,91	18	-0,58	27	5,34
9	-5,45				

По данным полученной таблицы строим график



и находим абсциссу точки пересечения кривой с осью абсцисс. Эта точка и есть искомый корень уравнения. В данном случае $\Delta t_{ИТК}^{(0)} = x = 18,9$ °С. В таблицу результатов заносим это значение со знаком «минус», как указано выше.

Для решения этих уравнений можно использовать численные методы (метод хорд, бисекций и др.).

Чтобы определить температуры кипения по ИТК необходимо воспользоваться уравнениями

$$t_{ИТК}^{30} = t_{ИТК}^{50} + \Delta t_{ИТК}^{(30)} = 195,8 - 28,8 = 167 \text{ °С},$$

$$t_{ИТК}^{10} = t_{ИТК}^{30} + \Delta t_{ИТК}^{(10)} = 167 - 31,7 = 135,3 \text{ °С},$$

$$t_{ИТК}^0 = t_{ИТК}^{10} + \Delta t_{ИТК}^{(0)} = 135,3 - 18,9 = 116,4 \text{ °С}.$$

$$t_{ИТК}^{70} = t_{ИТК}^{50} + \Delta t_{ИТК}^{(70)} = 195,8 + 34,7 = 230,5 \text{ °С},$$

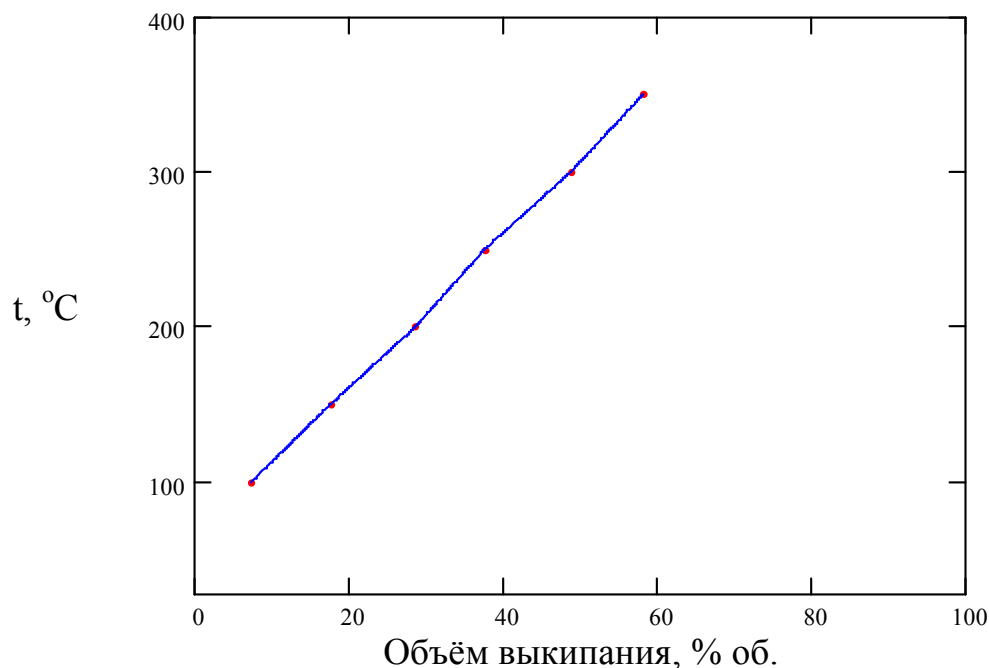
$$t_{ИТК}^{90} = t_{ИТК}^{70} + \Delta t_{ИТК}^{(90)} = 230,5 + 32,4 = 262,9 \text{ °С}.$$

Отгон x , % об.	t , °С по Энглеру	Разность $\Delta t_{ГОСТ}^{(x)}$, °С	Разность $\Delta t_{ИТК}^{(x)}$, °С	t , °С по ИТК
0	149	9	-18,9	116,4
10	158	19	-31,7	135,3
30	177	19	-28,8	167
50	196	-	-0,237	195,8
70	223	27	34,7	230,5
90	250	27	32,4	262,9

Пример 8.2. Экстраполировать кривую ИТК озексуатской нефти ($d_{15}^{15} = 0,8204$).

Интервалы выкипания, °С	Выход фракции на нефть, % масс.	Суммарный выход фракций, % масс.
н.к. – 100	7,2	7,2
100 – 150	10,3	17,5
150 – 200	11,0	28,5
200 – 250	9,0	37,5
250 – 300	11,2	48,7
300 – 350	9,4	58,1
Остаток > 350	41,9	100,0

Решение. По парам значений конец интервала выкипания – суммарный выход фракции строим кривую ИТК до 350 °С.



По графику определяем температуру, соответствующую выходу 50 %
 $T_{ИТК}^{50} = 306,9 + 273 = 579,9$ К.

Температуру, соответствующую 80 % выкипания определим по уравнению (8.6)

$$T_{ИТК}^{80} = 0,61277 \cdot 579,9^{1,103} \cdot 0,8204^{-0,6495} = 778,3 \text{ К.}$$

Температуру, соответствующую 100 % выкипания определим по уравнению (8.7)

$$T_{ИТК}^{100} = 12,106 \cdot 579,9^{0,7097} \cdot 0,8204^{0,6717} = 969,2 \text{ К.}$$

Задачи для самостоятельного решения

- 421.** Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 200 °С нефти месторождения Русский Хутор ($d_4^{20} = 0,7394$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	63	90	133	176

- 422.** Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 150 °С южносухокумской нефти ($d_4^{20} = 0,7247$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	56	81	109	135

- 423.** Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 190 °С ахловской нефти ($d_4^{20} = 0,7415$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	59	85	124	168

- 424.** Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 170 °С малгобекской верхнемеловой нефти ($d_4^{20} = 0,7428$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	64	87	120	154

- 425.** Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 180 °С алиюртской нижнемеловой нефти ($d_4^{20} = 0,7506$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	78	99	129	163

- 426.** Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 140 °С эльдаровской нефти ($d_4^{20} = 0,7150$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	51	71	94	121

427. Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 190 °С нефти месторождения Гора Орлиная ($d_4^{20} = 0,7458$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	73	98	127	163

428. Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 200 °С хаянкорской нижнемеловой нефти ($d_4^{20} = 0,7328$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	55	78	120	171

429. Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 170 °С колодезной нефти ($d_4^{20} = 0,7275$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90	к.к.
Температура, °С	61	80	114	156	169

430. Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 180 °С величаевской нефти ($d_4^{20} = 0,7350$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90	к.к.
Температура, °С	61	88	122	158	172

431. Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 160 °С поварковской нефти ($d_4^{20} = 0,7293$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90	к.к.
Температура, °С	65	87	116	142	151

432. Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 200 °С ставропольской нефти ($d_4^{20} = 0,7439$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90	к.к.
Температура, °С	68	98	132	174	188

433. Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 170 °С мектебской нефти ($d_4^{20} = 0,7410$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90	к.к.
Температура, °С	78	96	122	151	164

434. Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 190 °С новодмитриевской нефти ($d_4^{20} = 0,7339$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	53	84	117	170

435. Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 180 °С хадыженской нефти ($d_4^{20} = 0,7589$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	75	93	123	162

436. Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 160 °С баракаевской нефти ($d_4^{20} = 0,7258$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	59	81	106	139

437. Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 200 °С долинской нефти ($d_4^{20} = 0,7570$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	55	89	135	190

438. Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 180 °С битковской нефти ($d_4^{20} = 0,7700$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	60	112	132	169

439. Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 170 °С оровской нефти ($d_4^{20} = 0,7709$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	63	102	140	161

440. Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 190 °С уличянской нефти ($d_4^{20} = 0,7233$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	62	90	131	181

441. Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 160 °С леляковской нефти ($d_4^{20} = 0,7255$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	51	75	95	151

442. Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 200 °С гнединцевской нефти ($d_4^{20} = 0,7500$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	68	92	128	171

443. Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 170 °С качановской нефти ($d_4^{20} = 0,7283$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	55	83	98	151

444. Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 190 °С глиноско-розбышевской нефти ($d_4^{20} = 0,7567$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	77	104	128	170

445. Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 160 °С прилукской нефти ($d_4^{20} = 0,7229$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	48	76	110	145

446. Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 180 °С рыбальской нефти ($d_4^{20} = 0,7752$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	46	104	133	162

447. Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 200 °С новогригорьевской нефти ($d_4^{20} = 0,7725$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	95	110	140	185

448. Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 180 °С гусевской нефти ($d_4^{20} = 0,7315$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	60	79	115	161

449. Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 190 °С красноборской нефти ($d_4^{20} = 0,7235$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	58	77	126	176

450. Определить координаты кривой ИТК по известной кривой разгонки на аппарате Энглера фракции 28 – 170 °С шюпарайской нефти ($d_4^{20} = 0,7375$)

Объем выкипания, % об.	н.к.	10	50	90
Температура, °С	63	80	114	151

9. Теплоемкость

Теплоемкость – количество теплоты, которое необходимо сообщить некоторому количеству вещества, для повышения его температуры на один градус.

В зависимости от единицы количества нагреваемого вещества выделяют несколько размерностей теплоемкости.

Массовая теплоемкость - количество теплоты, которое необходимо сообщить единице массы вещества, для повышения его температуры на один градус; единица измерения $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$.

Мольная теплоемкость - количество теплоты, которое необходимо сообщить единице количества вещества, для повышения его температуры на один градус; единица измерения $\frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{K}}$.

Объемная теплоемкость - количество теплоты, которое необходимо сообщить единице объема вещества, для повышения его температуры на один градус; единица измерения $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{K}}$.

Различают также *среднюю теплоемкость* (для интервала температур) и *истинную теплоемкость* (для конкретной температуры).

Для расчета средней теплоемкости $\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}\right)$ жидких нефтепродуктов с относительной плотностью $d_{15}^{15} = 0,75 - 1,00$ до температуры 260 °С применяется уравнение Фортча и Уитмена

$$\bar{c} = 1,444 + 0,00371 \left(\frac{t_1 + t_2}{2} \right) (2,1 - d_{15}^{15}). \quad (9.1)$$

Для жидких нефтепродуктов с относительной плотностью $d_{15}^{15} = 0,75 - 0,96$ до температуры 200 °С может быть применено уравнение, предложенное Крэгом

$$c = \frac{4,187}{\sqrt{d_{15}^{15}}} (0,403 + 0,000405t). \quad (9.2)$$

Широко используется уравнения Ватсона-Нильсона

$$\bar{c} = [1,2807 - 0,7025d_{15}^{15} + T(0,00615T - 0,0023d_{15}^{15})](0,067K + 0,35), \quad (9.3)$$

$$c = (1,46538 + 0,230274K_w)[(0,6811 - 0,308d_{15}^{15}) + (0,000815 - 0,000306d_{15}^{15})(1,8t + 32)] \quad (9.4)$$

или модифицированное уравнение Ватсона-Нильсона

$$c = 2,8516 - 1,2895d_{15}^{15} + (0,00341 - 0,00128d_{15}^{15}) \times (1,8T - 459,4)(0,055K + 0,35) \quad (9.5)$$

Зависимость теплоемкости от абсолютной плотности при определенной температуре выражает формула Мустафаева

$$c = 3,3909 - 1,6747 \cdot 10^{-3} \rho_T. \quad (9.6)$$

Для определения теплоемкостей нефтей и фракций любого состава предложена следующая формула

$$c = 1,5072 + \frac{T - 223}{100} (1,7182 - 1,5072 d_4^{20}). \quad (9.7)$$

Уравнение Фаллона-Ватсона

$$c = (1,71659 + 0,20934 K_w) \left[0,198 + \frac{0,186}{0,9952 d_4^{20} + 8,12 \cdot 10^{-4}} + \left(0,314 + \frac{0,149}{0,9952 d_4^{20} + 8,12 \cdot 10^{-4}} \right) \cdot 2 \cdot 10^{-3} t \right] \quad (9.8)$$

Для определения истинной теплоемкости паров парафинистых нефтепродуктов, относительная плотность которых в жидком состоянии $d_{15}^{15} = 0,68 - 0,90$ используется формула Бальке и Кей, которая применима при малых давлениях и температуре до 350°C

$$c = \frac{4,0 - d_{15}^{15}}{1541} (1,8T + 211). \quad (9.9)$$

С учетом характеризующего фактора уравнение Бальке имеет вид

$$c = \frac{4,0 - d_{15}^{15}}{1541} (1,8T + 211)(0,146K - 0,41). \quad (9.10)$$

Если известна теплоемкость углеводородной жидкости, то теплоемкость паров, сосуществующих с жидкой фазой (температуры паров и жидкости равны) может быть определена по формуле Крэга

$$c_n = c_{ж} - \frac{0,3768}{d_{15}^{15}}. \quad (9.11)$$

Мольная теплоемкость $\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{K}} \right)$ углеводородных газов и паров в широком интервале температур ($273 - 1500 \text{ K}$) при атмосферном давлении может быть найдена по уравнению

$$c = 4,1868 \left(A + B \frac{c}{T} \right), \quad (9.12)$$

где A , B и C – константы, значения которых приведены в таблице

Константы A , B и C уравнения (9.12)

Таблица 9.1

Углеводород	A	B	C	Углеводород	A	B	C
Метан	7,62	25,69	996,07	<i>n</i> -Гексан	22,96	106,64	646,08
Этан	9,09	47,57	745,81	<i>o</i> -Ксилол	17,24	101,41	577,44
Пропан	10,95	59,39	654,65	<i>m</i> -Ксилол	18,84	104,02	563,90
<i>n</i> -Бутан	15,45	74,82	659,21	<i>n</i> -Ксилол	15,58	104,20	582,01
<i>n</i> -Пентан	19,07	90,73	648,58				

Теплоемкость смесей нефтепродуктов может быть рассчитана по правилу аддитивности

$$c_{см} = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n, \quad (9.13)$$

где c_1, c_2, \dots, c_n - теплоемкости компонентов смеси, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$ или $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$;

x_1, x_2, \dots, x_n - содержание компонентов, масс. доли, мольные доли или объемные доли соответственно.

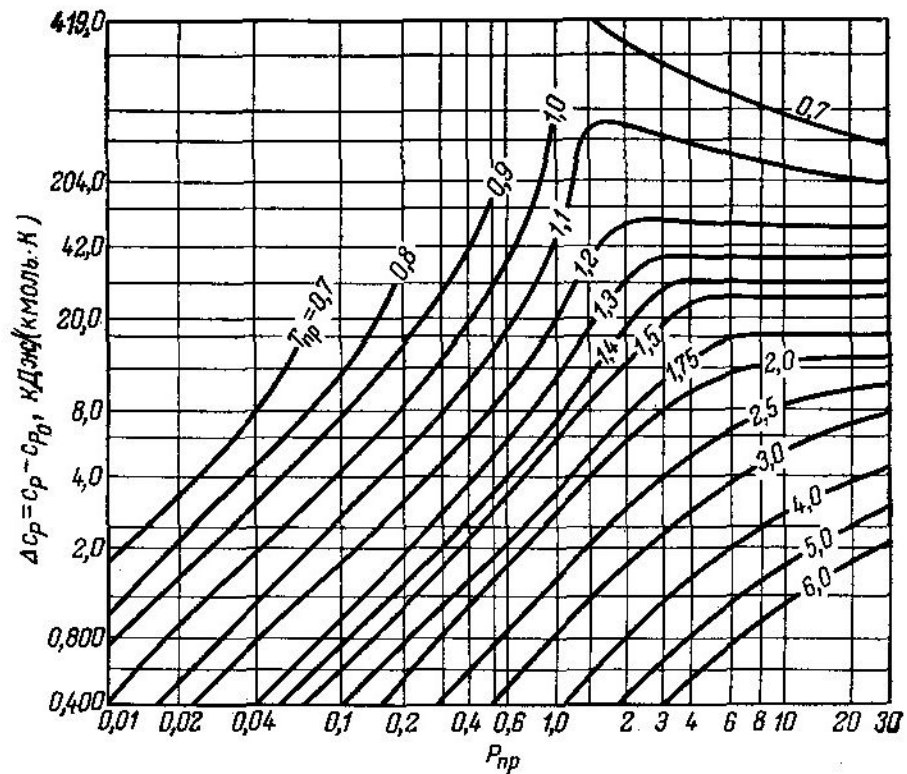


Рисунок 9.1 – График для определения изменения теплоемкости нефтяных паров с повышением давления

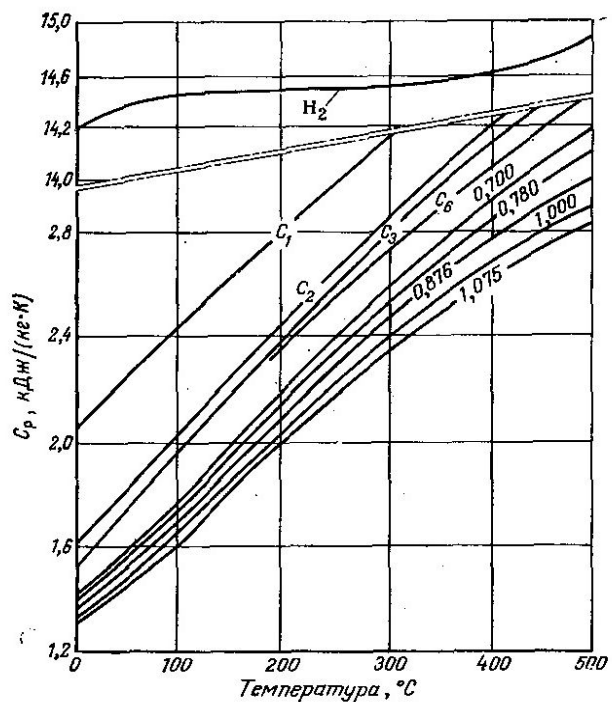


Рисунок 9.2 – График для определения теплоемкости некоторых углеводородов в зависимости от относительной плотности d_4^{20} и температуры

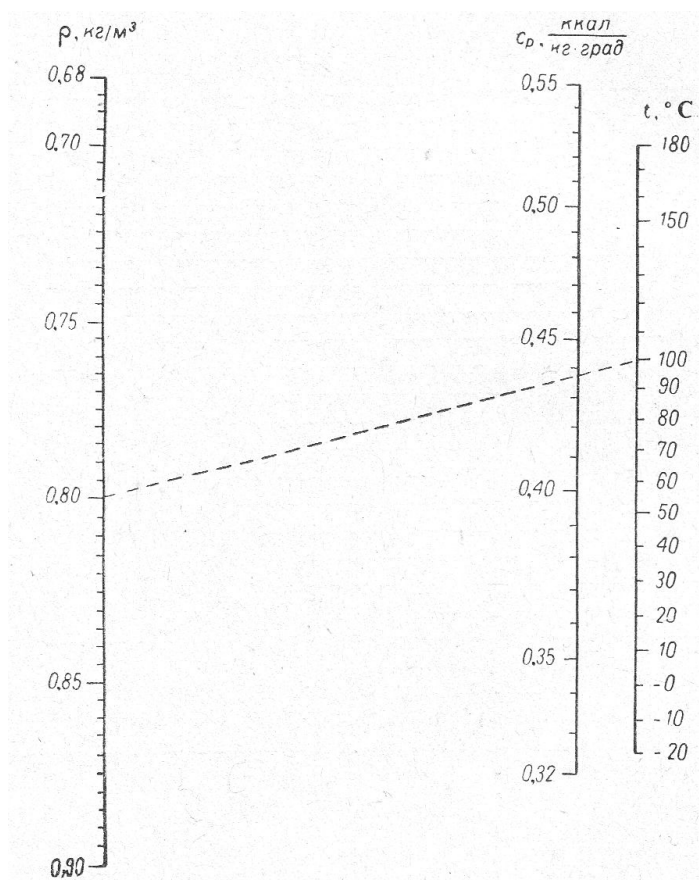


Рисунок 9.3 – Номограмма для определения удельной теплоемкости нефтяных паров

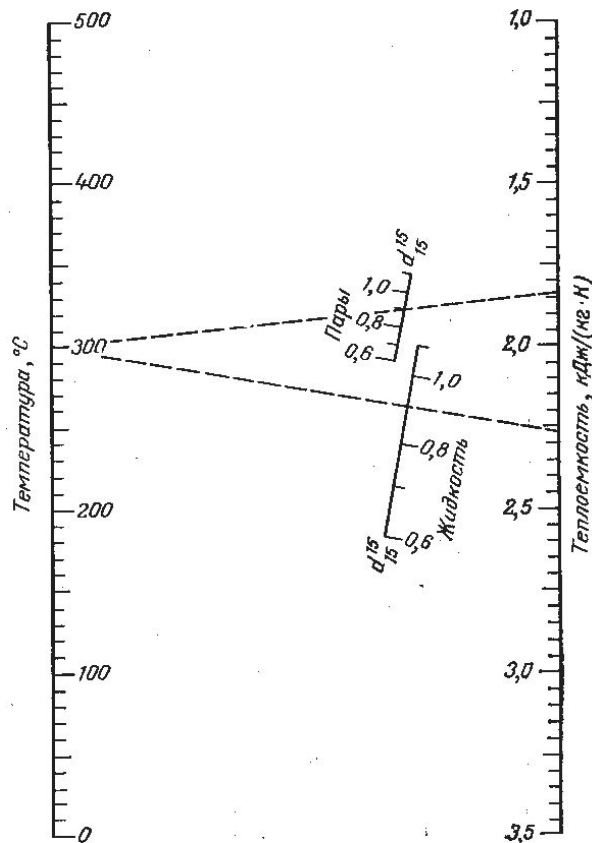


Рисунок 9.4 – Номограмма для определения теплоемкости нефтепродуктов (паров и жидкости)

Пример 9.1. Определить теплоемкость нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,74$ при $60\text{ }^\circ\text{C}$.

Решение. Перейдем к d_{15}^{15} по уравнению (1.4):

$$d_{15}^{15} = 0,0093 + 0,994 \cdot d_4^{20} = 0,0093 + 0,994 \cdot 0,74 = 0,7449.$$

По уравнению Крэга (9.2):

$$\begin{aligned} c &= \frac{4,187}{\sqrt{d_{15}^{15}}} (0,403 + 0,000405 \cdot t) = \\ &= \frac{4,187}{\sqrt{0,7449}} (0,403 + 0,000405 \cdot 60) = 2,073 \end{aligned}$$

По уравнению (9.7):

$$\begin{aligned} c &= 1,5072 + \frac{T - 223}{100} (1,7182 - 1,5072 \cdot d_4^{20}) = \\ &= 1,5072 + \frac{(60 + 273) - 223}{100} (1,7182 - 1,5072 \cdot 0,74) = 2,17 \end{aligned}$$

По номограмме, изображенной на рисунке 9.4 при $60\text{ }^\circ\text{C}$ и $d_4^{20} = 0,74$ по шкале для жидкости $c \approx 2,0$ кДж/(кг·К).

Пример 9.2. Определить теплоемкость фракции 150 – 200 °С плотностью $d_4^{20} = 0,8080$ при 120 °С.

Решение. Перейдем к плотности d_{15}^{15} по уравнению (1.3):

$$d_{15}^{15} = d_4^{20} + \frac{0,0035}{d_4^{20}} = 0,8080 + \frac{0,0035}{0,8080} = 0,812.$$

Определим среднюю температуру кипения фракции:

$$t_{cp} = \frac{150 + 200}{2} = 175 \text{ °С.}$$

Допустим, что $t_{cp.куб.} = t_{cp}$, тогда характеризующий фактор Ватсона по уравнению (6.2):

$$K_w = \frac{1,2251 \sqrt[3]{T_{cp.куб.}}}{d_{15}^{15}} = \frac{1,2251 \sqrt[3]{175 + 273}}{0,812} = 11,54$$

По уравнению Фаллона-Ватсона (9.8):

$$c = (1,71659 + 0,20934 K_w) \left[0,198 + \frac{0,186}{0,9952 d_4^{20} + 8,12 \cdot 10^{-4}} + \left(0,314 + \frac{0,149}{0,9952 d_4^{20} + 8,12 \cdot 10^{-4}} \right) \cdot 2 \cdot 10^{-3} t \right] = (1,71659 + 0,20934 \cdot 11,54) \times \left[0,198 + \frac{0,186}{0,9952 \cdot 0,8080 + 8,12 \cdot 10^{-4}} + \left(0,314 + \frac{0,149}{0,9952 \cdot 0,8080 + 8,12 \cdot 10^{-4}} \right) \times 2 \cdot 10^{-3} \cdot 120 \right] = 2,187$$

Пример 9.3. Плотность нефтяной фракции равна $d_4^{20} = 0,7390$. Найти теплоемкость паров фракции при 200 °С.

Решение. Перейдем к плотности d_{15}^{15} по уравнению (1.4):

$$d_{15}^{15} = 0,0093 + 0,994 \cdot d_4^{20} = 0,0093 + 0,994 \cdot 0,7390 = 0,7440.$$

Воспользуемся формулой Бальке и Кей (9.9):

$$c = \frac{4,0 - d_{15}^{15}}{1541} (1,8T + 211) = \frac{4,0 - 0,7440}{1541} (1,8 \cdot (200 + 273) + 211) = 2,245.$$

По номограмме, изображенной на рисунке 9.4 при $d_4^{20} = 0,7390$ по шкале паров и 200 °С

$$c \approx 1,73 \text{ кДж/(кг·К).}$$

Пример 9.4. Определить теплоемкость паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,6930$; $t_{кр} = 210$ °С; $P_{кр} = 2,74$ МПа, при 180 °С и 0,6 МПа.

Решение. Перейдем к плотности d_{15}^{15} по уравнению (1.4):

$$d_{15}^{15} = 0,0093 + 0,994 \cdot d_4^{20} = 0,0093 + 0,994 \cdot 0,6930 = 0,6980.$$

Теплоемкость паров при атмосферном давлении вычислим по уравнению Бальке и Кей (9.9):

$$c = \frac{4,0 - d_{15}^{15}}{1541} (1,8T + 211) = \frac{4,0 - 0,6980}{1541} (1,8 \cdot (180 + 273) + 211) = 2,199.$$

Вычислим приведенные температуру и давление:

$$T_{пр} = \frac{T}{T_{кр}} = \frac{180 + 273}{210 + 273} = 0,938,$$

$$P_{пр} = \frac{P}{P_{кр}} = \frac{0,6}{2,74} = 0,22.$$

По графику, изображенному на рисунке 9.1 определим поправку к теплоемкости на давление:

$$\Delta c \approx 10 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}).$$

Молярную массу фракции найдем по формуле Крэга (2.15):

$$M = \frac{44,29 d_{15}^{15}}{1,03 - d_{15}^{15}} = \frac{44,29 \cdot 0,698}{1,03 - 0,698} = 93,1 \text{ кг}/\text{кмоль}.$$

Пересчитаем поправку с мольной размерности на массовую:

$$\Delta c = \frac{10}{93,1} = 0,11 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Таким образом, теплоемкость паров под давлением равна:

$$c = c_0 + \Delta c = 2,199 + 0,11 = 2,31 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Задачи для самостоятельного решения

- 451.** Определить теплоемкость жидкого нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,852$ при температуре 95 °С. Задачу решить двумя способами.
- 452.** Определить теплоемкость жидкого нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,890$ при температуре 110 °С. Задачу решить двумя способами.
- 453.** Определить теплоемкость жидкого нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,922$ при температуре 115 °С. Задачу решить двумя способами.
- 454.** Определить теплоемкость жидкого нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,741$ при температуре 70 °С. Задачу решить двумя способами.

475. Определить теплоемкость жидкого нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,744$ при температуре $86\text{ }^\circ\text{C}$. Задачу решить двумя способами.
476. Определить теплоемкость жидкого нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,869$ при температуре $98\text{ }^\circ\text{C}$. Задачу решить двумя способами.
477. Определить теплоемкость жидкого нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,905$ при температуре $89\text{ }^\circ\text{C}$. Задачу решить двумя способами.
478. Определить теплоемкость жидкого нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,752$ при температуре $70\text{ }^\circ\text{C}$. Задачу решить двумя способами.
479. Определить теплоемкость жидкого нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,818$ при температуре $90\text{ }^\circ\text{C}$. Задачу решить двумя способами.
480. Определить теплоемкость жидкого нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,940$ при температуре $106\text{ }^\circ\text{C}$. Задачу решить двумя способами.
481. Определить теплоемкость нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 133\text{ }^\circ\text{C}$ и $d_4^{20} = 0,7823$, при $60\text{ }^\circ\text{C}$.
482. Определить теплоемкость узкой нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 160\text{ }^\circ\text{C}$ и $d_4^{20} = 0,7954$, при $100\text{ }^\circ\text{C}$.
483. Определить теплоемкость узкой нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 123\text{ }^\circ\text{C}$ и $d_4^{20} = 0,7565$, при $85\text{ }^\circ\text{C}$.
484. Определить теплоемкость нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 180\text{ }^\circ\text{C}$ и $d_4^{20} = 0,8057$, при $140\text{ }^\circ\text{C}$.
485. Определить теплоемкость нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 202\text{ }^\circ\text{C}$ и $d_4^{20} = 0,8183$, при $105\text{ }^\circ\text{C}$.
486. Определить теплоемкость нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 215\text{ }^\circ\text{C}$ и $d_4^{20} = 0,8196$, при $130\text{ }^\circ\text{C}$.
487. Определить теплоемкость нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 235\text{ }^\circ\text{C}$ и $d_4^{20} = 0,8280$, при $140\text{ }^\circ\text{C}$.
488. Определить теплоемкость нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 250\text{ }^\circ\text{C}$ и $d_4^{20} = 0,8333$, при $165\text{ }^\circ\text{C}$.
489. Определить теплоемкость нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 295\text{ }^\circ\text{C}$ и $d_4^{20} = 0,8695$, при $190\text{ }^\circ\text{C}$.
490. Определить теплоемкость узкой нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 163\text{ }^\circ\text{C}$ и $d_4^{20} = 0,7940$, при $135\text{ }^\circ\text{C}$.
491. Определить теплоемкость узкой нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 188\text{ }^\circ\text{C}$ и $d_4^{20} = 0,8042$, при $145\text{ }^\circ\text{C}$.
492. Определить теплоемкость узкой нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 110\text{ }^\circ\text{C}$ и $d_4^{20} = 0,7757$, при $80\text{ }^\circ\text{C}$.

493. Определить теплоемкость нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 150$ °С и $d_4^{20} = 0,7750$, при 110 °С.
494. Определить теплоемкость нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 103$ °С и $d_4^{20} = 0,7421$, при 70 °С.
495. Определить теплоемкость нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 185$ °С и $d_4^{20} = 0,8092$, при 115 °С.
496. Определить теплоемкость нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 205$ °С и $d_4^{20} = 0,8025$, при 100 °С.
497. Определить теплоемкость нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 220$ °С и $d_4^{20} = 0,8179$, при 120 °С.
498. Определить теплоемкость нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 215$ °С и $d_4^{20} = 0,8095$, при 135 °С.
499. Определить теплоемкость нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 240$ °С и $d_4^{20} = 0,8182$, при 125 °С.
500. Определить теплоемкость нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 275$ °С и $d_4^{20} = 0,8332$, при 175 °С.
501. Определить теплоемкость нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 280$ °С и $d_4^{20} = 0,8288$, при 160 °С.
502. Определить теплоемкость нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 285$ °С и $d_4^{20} = 0,8528$, при 150 °С.
503. Определить теплоемкость нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 260$ °С и $d_4^{20} = 0,8413$, при 140 °С.
504. Определить теплоемкость узкой нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 75$ °С и $d_4^{20} = 0,7345$, при 45 °С.
505. Определить теплоемкость нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 83$ °С и $d_4^{20} = 0,7516$, при 40 °С.
506. Определить теплоемкость нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 175$ °С и $d_4^{20} = 0,8210$, при 100 °С.
507. Определить теплоемкость нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 178$ °С и $d_4^{20} = 0,8019$, при 95 °С.
508. Определить теплоемкость нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 210$ °С и $d_4^{20} = 0,8545$, при 145 °С.
509. Определить теплоемкость нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 258$ °С и $d_4^{20} = 0,8720$, при 120 °С.

510. Определить теплоемкость нефтяной фракции, имеющей $t_{cp} = 109$ °С и $d_4^{20} = 0,7500$, при 70 °С.
511. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,699$ при 250 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
512. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,711$ при 275 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
513. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,727$ при 290 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
514. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,756$ при 300 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
515. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,775$ при 310 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
516. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,714$ при 260 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
517. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,741$ при 305 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
518. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,738$ при 295 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
519. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,768$ при 320 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
520. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,781$ при 340 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
521. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,677$ при 255 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
522. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,785$ при 325 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
523. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,712$ при 285 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.

524. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,744$ при 260 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
525. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,785$ при 300 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
526. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,724$ при 265 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
527. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,729$ при 320 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
528. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,757$ при 320 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
529. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,722$ при 265 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
530. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,755$ при 290 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
531. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,728$ при 275 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
532. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,717$ при 250 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
533. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,706$ при 240 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
534. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,750$ при 310 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
535. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,777$ при 325 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
536. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,721$ при 190 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.

537. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,740$ при 235 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
538. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,730$ при 220 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
539. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,760$ при 300 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
540. Определить теплоемкость паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,780$ при 310 °С и атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
541. Определить при 350 °С и 1 МПа теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,7066$, $t_{кр} = 248$ °С, $P_{кр} = 27$ атм и $K = 12,1$.
542. Определить при 340 °С и 12160 мм рт. ст. теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,7195$, $t_{кр} = 280$ °С, $P_{кр} = 26$ атм и $K = 12,3$.
543. Определить при 360 °С и 7,26 кгс/см² теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,7535$, $t_{кр} = 300$ °С, $P_{кр} = 24$ атм и $K = 11,9$.
544. Определить при 375 °С и 87794 кгс/м² теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,6782$, $t_{кр} = 225$ °С, $P_{кр} = 32$ атм и $K = 12,4$.
545. Определить при 320 °С и 8 ат теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,7251$, $t_{кр} = 250$ °С, $P_{кр} = 28$ атм и $K = 11,9$.
546. Определить при 350 °С и 0,65 МПа теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,7375$, $t_{кр} = 275$ °С, $P_{кр} = 26$ атм и $K = 11,9$.
547. Определить при 345 °С и 11700 мм рт. ст. теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,7023$, $t_{кр} = 250$ °С, $P_{кр} = 29$ атм и $K = 12,2$.
548. Определить при 320 °С и 103290 кгс/м² теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,6490$, $t_{кр} = 215$ °С, $P_{кр} = 33$ атм и $K = 12,8$.
549. Определить при 340 °С и 9,2 ат теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,6860$, $t_{кр} = 250$ °С, $P_{кр} = 29$ атм и $K = 12,5$.
550. Определить при 280 °С и 0,55 МПа теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,7047$, $t_{кр} = 240$ °С, $P_{кр} = 30$ атм и $K = 12,0$.
551. Определить при 360 °С и 4940 мм рт. ст. теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,7394$, $t_{кр} = 290$ °С, $P_{кр} = 26$ атм и $K = 11,9$.
552. Определить при 320 °С и 101220 кгс/м² теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,6869$, $t_{кр} = 240$ °С, $P_{кр} = 28$ атм и $K = 12,4$.
553. Определить при 310 °С и 6,82 кгс/см² теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,6681$, $t_{кр} = 235$ °С, $P_{кр} = 29$ атм и $K = 12,7$.

554. Определить при 350 °С и 5,4 ат теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,6672$, $t_{кр} = 230^\circ\text{C}$, $P_{кр} = 32$ атм и $K = 12,4$.
555. Определить при 370 °С и 12 МПа теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,7558$, $t_{кр} = 250^\circ\text{C}$, $P_{кр} = 28$ атм и $K = 11,3$.
556. Определить при 340 °С и 5700 мм рт. ст. теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,7220$, $t_{кр} = 290^\circ\text{C}$, $P_{кр} = 26$ атм и $K = 11,9$.
557. Определить при 280 °С и 4,75 кгс/см² теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,7232$, $t_{кр} = 255^\circ\text{C}$, $P_{кр} = 27$ атм и $K = 11,9$.
558. Определить при 315 °С и 68230 кгс/м² теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,7540$, $t_{кр} = 285^\circ\text{C}$, $P_{кр} = 28$ атм и $K = 11,3$.
559. Определить при 270 °С и 5,5 ат теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,6881$, $t_{кр} = 215^\circ\text{C}$, $P_{кр} = 32$ атм и $K = 12,0$.
560. Определить при 315 °С и 0,64 МПа теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,7731$, $t_{кр} = 255^\circ\text{C}$, $P_{кр} = 28$ атм и $K = 11,0$.
561. Определить при 320 °С и 6688 мм рт. ст. теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,7269$, $t_{кр} = 248^\circ\text{C}$, $P_{кр} = 29$ атм и $K = 11,7$.
562. Определить при 335 °С и 9,3 кгс/см² теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,6488$, $t_{кр} = 220^\circ\text{C}$, $P_{кр} = 32$ атм и $K = 12,8$.
563. Определить при 350 °С и 59900 кгс/м² теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,7373$, $t_{кр} = 250^\circ\text{C}$, $P_{кр} = 29$ атм и $K = 11,6$.
564. Определить при 300 °С и 6,9 ат теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,7516$, $t_{кр} = 255^\circ\text{C}$, $P_{кр} = 27$ атм и $K = 11,5$.
565. Определить при 305 °С и 0,75 МПа теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,7300$, $t_{кр} = 245^\circ\text{C}$, $P_{кр} = 28$ атм и $K = 11,7$.
566. Определить при 310 °С и 4000 мм рт. ст. теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,7442$, $t_{кр} = 255^\circ\text{C}$, $P_{кр} = 27$ атм и $K = 11,6$.
567. Определить при 325 °С и 5,35 кгс/см² теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,753$, $t_{кр} = 270^\circ\text{C}$, $P_{кр} = 26$ атм и $K = 11,6$.
568. Определить при 280 °С и 52000 кгс/м² теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,6800$, $t_{кр} = 225^\circ\text{C}$, $P_{кр} = 32$ атм и $K = 12,4$.
569. Определить при 285 °С и 7,7 ат теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,7330$, $t_{кр} = 245^\circ\text{C}$, $P_{кр} = 28$ атм и $K = 11,7$.
570. Определить при 300 °С и 0,45 МПа теплоемкость паров нефтепродукта, имеющего $d_4^{20} = 0,7078$, $t_{кр} = 230^\circ\text{C}$, $P_{кр} = 30$ атм и $K = 12,0$.
571. Определить теплоемкость смеси, состоящей из 420 кг нефтепродукта теплоемкостью 1,5 кДж/(кг·К) и 150 кг нефтепродукта теплоемкостью 1,72 кДж/(кг·К).

572. Определить теплоемкость смеси, состоящей из 55 кмоль нефтепродукта теплоемкостью 2,5 кДж/(кг·К) и молекулярной массой 59 и 72 кмоль нефтепродукта теплоемкостью 2,1 кДж/(кг·К) и молекулярную массу 91.
573. Определить теплоемкость смеси, состоящей из 2,2 м³ нефтепродукта теплоемкостью 2,7 кДж/(кг·К) и плотностью $d_4^{20} = 0,65$ и 1,3 м³ нефтепродукта теплоемкостью 2,1 кДж/(кг·К) и плотностью $d_4^{20} = 0,89$.
574. Определить теплоемкость смеси, состоящей из 50 кг нефтепродукта теплоемкостью 1,6 кДж/(кг·К) и 62 кг нефтепродукта теплоемкостью 1,9 кДж/(кг·К).
575. Определить теплоемкость смеси, состоящей из 34 кмоль нефтепродукта теплоемкостью 2,7 кДж/(кг·К) и молекулярной массой 120 и 61 кмоль нефтепродукта теплоемкостью 2,45 кДж/(кг·К) и молекулярную массу 87.
576. Определить теплоемкость смеси, состоящей из 1,7 м³ нефтепродукта теплоемкостью 2,2 кДж/(кг·К) и плотностью $d_4^{20} = 0,81$ и 0,9 м³ нефтепродукта теплоемкостью 2,4 кДж/(кг·К) и плотностью $d_4^{20} = 0,70$.
577. Определить теплоемкость смеси, состоящей из 21 кг нефтепродукта теплоемкостью 2,1 кДж/(кг·К) и 72 кг нефтепродукта теплоемкостью 2,45 кДж/(кг·К).
578. Определить теплоемкость смеси, состоящей из 100 кмоль нефтепродукта теплоемкостью 2,5 кДж/(кг·К) и молекулярной массой 60 и 55 кмоль нефтепродукта теплоемкостью 2,1 кДж/(кг·К) и молекулярную массу 155.
579. Определить теплоемкость смеси, состоящей из 2,25 м³ нефтепродукта теплоемкостью 2,25 кДж/(кг·К) и плотностью $d_4^{20} = 0,65$ и 1,4 м³ нефтепродукта теплоемкостью 2,15 кДж/(кг·К) и плотностью $d_4^{20} = 0,75$.
580. Определить теплоемкость смеси, состоящей из 107 кг нефтепродукта теплоемкостью 2,06 кДж/(кг·К) и 28 кг нефтепродукта теплоемкостью 0,583 ккал/(кг·К).
581. Определить теплоемкость смеси, состоящей из 23 кмоль нефтепродукта теплоемкостью 0,489 ккал/(кг·К) и молекулярной массой 300 и 67 кмоль нефтепродукта теплоемкостью 0,537 ккал/(кг·К) и молекулярную массу 155.
582. Определить теплоемкость смеси, состоящей из 4,05 м³ нефтепродукта теплоемкостью 0,549 ккал/(кг·К) и плотностью $d_4^{20} = 0,7$ и 1,65 м³ нефтепродукта теплоемкостью 0,621 ккал/(кг·К) и плотностью $d_4^{20} = 0,62$.
583. Определить теплоемкость смеси, состоящей из 28 кг нефтепродукта теплоемкостью 0,550 ккал/(кг·К) и 37 кг нефтепродукта теплоемкостью 0,589 ккал/(кг·К).

- 584.** Определить теплоемкость смеси, состоящей из 85 кмоль нефтепродукта теплоемкостью 0,573 ккал/(кг·К) и молекулярной массой 76 и 29 кмоль нефтепродукта теплоемкостью 2,27 кДж/(кг·К) и молекулярную массу 103.
- 585.** Определить теплоемкость смеси, состоящей из 1,72 м³ нефтепродукта теплоемкостью 0,578 ккал/(кг·К) и плотностью $d_4^{20} = 0,698$ и 2,4 м³ нефтепродукта теплоемкостью 0,53 ккал/(кг·К) и плотностью $d_4^{20} = 0,79$.
- 586.** Определить теплоемкость смеси, состоящей из 41 кг нефтепродукта теплоемкостью 0,57 ккал/(кг·К) и 25 кг нефтепродукта теплоемкостью 2,15 кДж/(кг·К).
- 587.** Определить теплоемкость смеси, состоящей из 12 кмоль нефтепродукта теплоемкостью 2,25 кДж/(кг·К) и молекулярной массой 118 и 42 кмоль нефтепродукта теплоемкостью 0,578 ккал/(кг·К) и молекулярную массу 82.
- 588.** Определить теплоемкость смеси, состоящей из 2,64 м³ нефтепродукта теплоемкостью 0,589 ккал/(кг·К) и плотностью $d_4^{20} = 0,655$ и 6,1 м³ нефтепродукта теплоемкостью 2,32 кДж/(кг·К) и плотностью $d_4^{20} = 0,720$.
- 589.** Определить теплоемкость смеси, состоящей из 25 кг нефтепродукта теплоемкостью 2,41 кДж/(кг·К) и 27 кг нефтепродукта теплоемкостью 0,537 ккал/(кг·К).
- 590.** Определить теплоемкость смеси, состоящей из 66 кмоль нефтепродукта теплоемкостью 2,14 кДж/(кг·К) и молекулярной массой 154 и 80 кмоль нефтепродукта теплоемкостью 2,30 кДж/(кг·К) и молекулярную массу 108.
- 591.** Определить теплоемкость смеси, состоящей из 3,3 м³ нефтепродукта теплоемкостью 2,38 кДж/(кг·К) и плотностью $d_4^{20} = 0,725$ и 2,7 м³ нефтепродукта теплоемкостью 2,25 кДж/(кг·К) и плотностью $d_4^{20} = 0,800$.
- 592.** Определить теплоемкость смеси, состоящей из 53 кг нефтепродукта теплоемкостью 0,502 ккал/(кг·К) и 36 кг нефтепродукта теплоемкостью 0,531 ккал/(кг·К).
- 593.** Определить теплоемкость смеси, состоящей из 8,5 кмоль нефтепродукта теплоемкостью 0,513 ккал/(кг·К) и молекулярной массой 155 и 10 кмоль нефтепродукта теплоемкостью 0,588 ккал/(кг·К) и молекулярную массу 77.
- 594.** Определить теплоемкость смеси, состоящей из 20,25 м³ нефтепродукта теплоемкостью 0,525 ккал/(кг·К) и плотностью $d_4^{20} = 0,749$ и 10,63 м³ нефтепродукта теплоемкостью 0,554 ккал/(кг·К) и плотностью $d_4^{20} = 0,700$.

- 595.** Определить теплоемкость смеси, состоящей из 23 кг нефтепродукта теплоемкостью 2,2 кДж/(кг·К) и 47 кг нефтепродукта теплоемкостью 2,05 кДж/(кг·К).
- 596.** Определить теплоемкость смеси, состоящей из 11 кмоль нефтепродукта теплоемкостью 0,597 ккал/(кг·К) и молекулярной массой 86 и 20 кмоль нефтепродукта теплоемкостью 0,568 ккал/(кг·К) и молекулярную массу 98.
- 597.** Определить теплоемкость смеси, состоящей из 16 м³ нефтепродукта теплоемкостью 2,4 кДж/(кг·К) и плотностью $d_4^{20} = 0,635$ и 22 м³ нефтепродукта теплоемкостью 2,0 кДж/(кг·К) и плотностью $d_4^{20} = 0,771$.
- 598.** Определить теплоемкость смеси, состоящей из 5,3 кг нефтепродукта теплоемкостью 0,549 ккал/(кг·К) и 6,15 кг нефтепродукта теплоемкостью 0,513 ккал/(кг·К).
- 599.** Определить теплоемкость смеси, состоящей из 35 кмоль нефтепродукта теплоемкостью 0,580 ккал/(кг·К) и молекулярной массой 84 и 42 кмоль нефтепродукта теплоемкостью 0,564 ккал/(кг·К) и молекулярную массу 124.
- 600.** Определить теплоемкость смеси, состоящей из 4,6 м³ нефтепродукта теплоемкостью 0,518 ккал/(кг·К) и плотностью $d_4^{20} = 0,740$ и 5,0 м³ нефтепродукта теплоемкостью 0,499 ккал/(кг·К) и плотностью $d_4^{20} = 0,800$.

10. Теплота испарения

Теплота испарения – теплота поглощаемая жидкостью в процессе её превращения в насыщенный пар при постоянных давлении и температуре; представляет собой разность энтальпий насыщенного пара и насыщенной жидкости при одной и той же температуре. Различают несколько видов теплот испарения:

- изобарную при полном испарении;
- изотермическую при полном испарении;
- дифференциальную при частичном испарении.

В зависимости от выбранный единиц измерения количества испаряемого вещества теплоты испарения делят на массовые, мольные и объемные.

Для индивидуальных углеводородов и моторных топлив теплота испарения уменьшается с увеличением молекулярной массы и температуры кипения.

При постоянной молекулярной массе теплота испарения понижается при переходе от алкинов и аренов к циклопентану, циклогексану и их производным. Наименьшие и приблизительно равные теплоты испарения имеют парафиновые и нафтеновые углеводороды. В любом гомологическом ряду углеводородов изомеры имеют меньшую величину теплоты испарения по сравнению с нормальными углеводородами.

Для неполярных соединений при атмосферном давлении нормальной температуре кипения для расчета мольной теплоты испарения (кДж/кмоль) используется уравнение Кистяковского

$$r = 8,314T_{кин} \ln(82,06T_{кин}) = T_{кин} (36,63 + 19,13 \lg T_{кин}). \quad (10.1)$$

Для парафинистых низкокипящих нефтепродуктов при низких давлениях можно использовать уравнение Крэга (кДж/кг)

$$r = \frac{1}{d_{15}^{15}} (354,1 - 0,3768T_{ср.мол.}). \quad (10.2)$$

Для расчета теплот испарения нефтепродуктов (кДж/кг) имеется формула Уэйра и Итона

$$r = 993,5 - 661,5d_{15}^{15} - T_{кин} (1,733 - 1,813d_{15}^{15}) - T_{кин}^2 (0,00059d_{15}^{15} - 0,00015) \quad (10.3)$$

Для расчета теплот испарения при повышенных давлениях, а также при температурах и давлениях близких к критическим можно использовать формулу Трутона

$$r = \frac{KT_{кин}}{M}, \quad (10.4)$$

где K - коэффициент пропорциональности, определяемый по графику на рисунке 10.1.

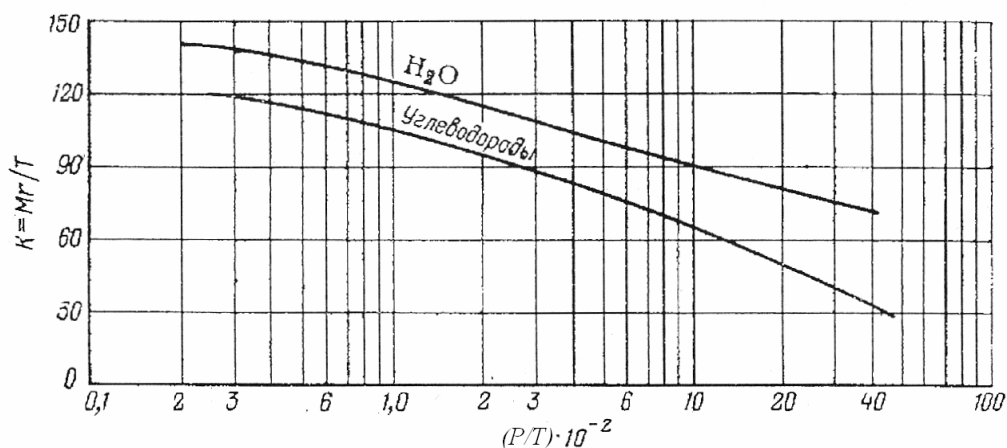


Рисунок 10.1 – График для определения коэффициента пропорциональности

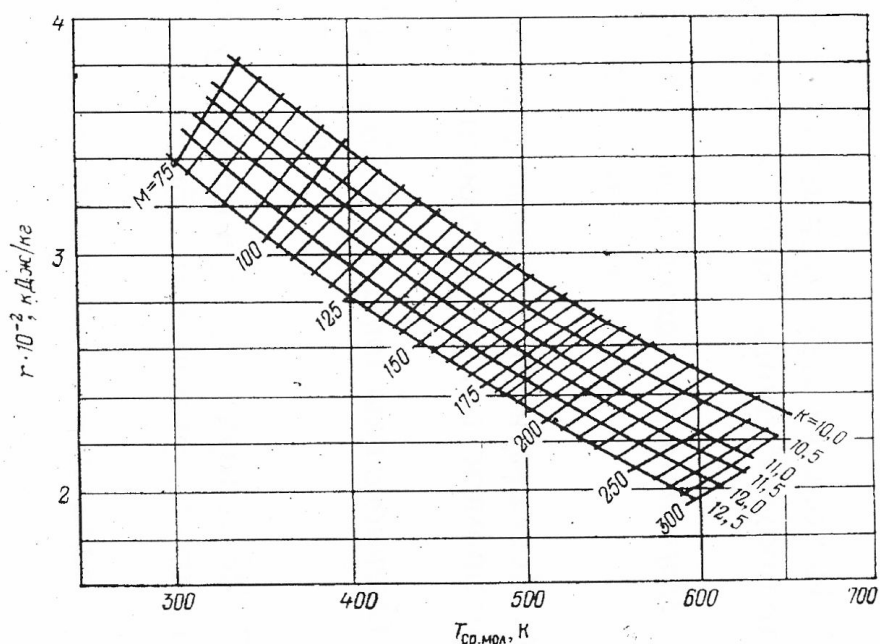


Рисунок 10.2 – Зависимость теплоты испарения от среднемольной температуры кипения, молекулярной массы и характеризующего фактора

Пример 10.1. Узкая нефтяная фракция имеет $t_{ср.мол.} = 140$ °С и относительную плотность $d_4^{20} = 0,7890$. Определить теплоту её испарения.

Решение. По уравнению Кистяковского (10.1) теплота испарения (кДж/кмоль) равна:

$$r = 8,314T_{кип} \ln(82,06T_{кип}) = 8,314 \cdot (140 + 273) \cdot \ln(82,06 \cdot (140 + 273)) = 3,58 \cdot 10^4$$

Мольную массу фракции определим по формуле Войнова (2.2):

$$M = 60 + 0,3t_{\text{ср.мол.}} + 0,001t_{\text{ср.мол.}}^2 = 60 + 0,3 \cdot 140 + 0,001 \cdot 140^2 = 121,6$$

кг/кмоль.

Тогда, вычисленная по уравнению Кистяковского теплота испарения (кДж/кг) равна:

$$r = \frac{3,58 \cdot 10^4}{121,6} = 294,5 \text{ кДж/кг.}$$

Перейдем к относительной плотности d_{15}^{15} по уравнению (1.3):

$$d_{15}^{15} = d_4^{20} + \frac{0,0035}{d_4^{20}} = 0,7890 + \frac{0,0035}{0,7890} = 0,7930.$$

Тогда по уравнению Уэйра и Итона (10.3) теплота испарения (кДж/кг) равна:

$$\begin{aligned} r &= 993,5 - 661,5d_{15}^{15} - T_{\text{кин}}(1,733 - 1,813d_{15}^{15}) - \\ &- T_{\text{кин}}^2(0,00059d_{15}^{15} - 0,00015) = 993,5 - 661,5 \cdot 0,7930 - \\ &- (140 + 273)(1,733 - 1,813 \cdot 0,7930) - (140 + 273)^2 \times \\ &\times (0,00059d_{15}^{15} - 0,00015) = 292,8 \end{aligned}$$

Характеризующий фактор вычислим по уравнению (6.1):

$$K = \frac{1,216\sqrt[3]{T_{\text{ср.мол.}}}}{d_{15}^{15}} = \frac{1,216\sqrt[3]{140 + 273}}{0,7930} = 11,4.$$

По графику, представленному на рисунке 10.2, теплота испарения равна:

$$r \approx 3,03 \text{ кДж/кг.}$$

Пример 10.2. Определить теплоту испарения амилена при 1 МПа.

Решение. По справочным данным определим, что нормальная температура кипения амилена равна 30 °С.

Вычислим значение комплекса

$$\left(\frac{P}{T}\right) \cdot 10^{-2} = \left(\frac{10^6}{30 + 273}\right) \cdot 10^{-2} \approx 33.$$

Используя график, изображены на рисунке 10.1, по кривой для углеводородов определим

$$K = \frac{Mr}{T} \approx 74,$$

откуда

$$r = \frac{74T}{M} = \frac{74 \cdot (30 + 273)}{70} = 320,3 \text{ кДж/кг.}$$

Задачи для самостоятельного решения

- 601.** Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 57 \text{ }^\circ\text{C}$ и $d_4^{20} = 0,7078$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
- 602.** Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 44 \text{ }^\circ\text{C}$ и $d_4^{20} = 0,6570$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
- 603.** Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 79 \text{ }^\circ\text{C}$ и $d_4^{20} = 0,7085$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
- 604.** Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 108 \text{ }^\circ\text{C}$ и $d_4^{20} = 0,7380$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
- 605.** Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 135 \text{ }^\circ\text{C}$ и $d_4^{20} = 0,7524$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
- 606.** Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ и $d_4^{20} = 0,6663$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
- 607.** Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 83 \text{ }^\circ\text{C}$ и $d_4^{20} = 0,7251$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
- 608.** Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 135 \text{ }^\circ\text{C}$ и $d_4^{20} = 0,7616$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
- 609.** Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 164 \text{ }^\circ\text{C}$ и $d_4^{20} = 0,7250$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
- 610.** Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 175 \text{ }^\circ\text{C}$ и $d_4^{20} = 0,7905$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
- 611.** Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 109 \text{ }^\circ\text{C}$ и $d_4^{20} = 0,7152$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.

612. Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 136$ °С и $d_4^{20} = 0,7390$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
613. Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 57$ °С и $d_4^{20} = 0,6680$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
614. Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 79$ °С и $d_4^{20} = 0,6951$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
615. Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 74$ °С и $d_4^{20} = 0,7220$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
616. Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 84$ °С и $d_4^{20} = 0,7232$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
617. Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 133$ °С и $d_4^{20} = 0,7790$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
618. Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 103$ °С и $d_4^{20} = 0,7350$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
619. Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 123$ °С и $d_4^{20} = 0,7485$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
620. Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 130$ °С и $d_4^{20} = 0,7540$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
621. Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 109$ °С и $d_4^{20} = 0,7469$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
622. Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 78$ °С и $d_4^{20} = 0,7203$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
623. Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 105$ °С и $d_4^{20} = 0,7458$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
624. Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 135$ °С и $d_4^{20} = 0,7727$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.

625. Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 74$ °С и $d_4^{20} = 0,7140$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
626. Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 150$ °С и $d_4^{20} = 0,7750$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
627. Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 160$ °С и $d_4^{20} = 0,7790$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
628. Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 103$ °С и $d_4^{20} = 0,7393$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
629. Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 83$ °С и $d_4^{20} = 0,7296$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
630. Определить теплоту испарения нефтяной фракции, имеющей $t_{\text{ср.мол}} = 113$ °С и $d_4^{20} = 0,7291$ при атмосферном давлении. Задачу решить двумя способами.
631. Определить теплоту испарения н-пентана при 0,25 МПа.
632. Определить теплоту испарения н-гексана при 3,09 кгс/см².
633. Определить теплоту испарения н-гептана при 20650 кгс/м².
634. Определить теплоту испарения н-октана при 950 мм рт. ст.
635. Определить теплоту испарения н-нонана при 0,3 МПа.
636. Определить теплоту испарения н-декана при 2,5 кгс/см².
637. Определить теплоту испарения бензола при 19850 кгс/м².
638. Определить теплоту испарения толуола при 840 мм рт. ст.
639. Определить теплоту испарения циклопентана при 1,9 атм.
640. Определить теплоту испарения циклогексана при 0,31 МПа.
641. Определить теплоту испарения н-пентана при 1,65 кгс/см².
642. Определить теплоту испарения н-гексана при 22200 кгс/м².
643. Определить теплоту испарения н-гептана при 1000 мм рт. ст.
644. Определить теплоту испарения н-октана при 1,75 атм.
645. Определить теплоту испарения н-нонана при 0,63 МПа.
646. Определить теплоту испарения н-декана при 1,7 кгс/см².
647. Определить теплоту испарения бензола при 18300 кгс/м².
648. Определить теплоту испарения толуола при 980 мм рт. ст.
649. Определить теплоту испарения циклопентана при 2,4 атм.
650. Определить теплоту испарения циклогексана при 4,0 кгс/см².
651. Определить теплоту испарения н-пентана при 23000 кгс/м².
652. Определить теплоту испарения н-гексана при 865 мм рт. ст.
653. Определить теплоту испарения н-гептана при 2,2 атм.
654. Определить теплоту испарения н-октана при 0,7 МПа.
655. Определить теплоту испарения н-нонана при 5,5 кгс/см².

656. Определить теплоту испарения н-декана при 19800 кгс/м².
657. Определить теплоту испарения бензола при 1100 мм рт. ст.
658. Определить теплоту испарения толуола при 1,68 атм.
659. Определить теплоту испарения циклопентана при 0,8 МПа.
660. Определить теплоту испарения циклогексана при 2,9 кгс/см².

11. Энтальпия

Энтальпия относится к термодинамическим функциям, изменение которых не зависит от направления протекания процесса, а определяется начальным и конечным состояниями системы.

При термодинамических расчетах важны не абсолютные значения энтальпий, а их изменения (разности), поэтому начальная температура для расчета энтальпий может быть принята любой, но постоянной для всех компонентов системы.

Энтальпия жидких нефтепродуктов при заданной температуре численно равна количеству теплоты, необходимому для нагрева единицы количества продукта от исходной температуры до заданной температуры.

Энтальпия газов или паров при заданной температуре равна количеству теплоты, необходимому для нагрева единицы количества продукта от исходной температуры до заданной температуры с учётом теплоты испарения при той же температуре и перегрева газов или паров.

Энтальпия может вычисляться для разного количества вещества и соответственно иметь разную размерность – кДж/кг, кДж/кмоль, кДж/м³.

Известно несколько уравнений для расчета энтальпии жидких потоков (кДж/кг) при атмосферном давлении (энтальпия жидкости при 0 °С условно принимается равной 0):

- уравнение Фортча и Уитмена

$$I_T^{\text{жс}} = (0,001855T^2 + 0,4317T - 256,11)(2,1 - d_{15}^{15}). \quad (11.1)$$

- уравнение Крэга

$$I_T^{\text{жс}} = \frac{1}{\sqrt{d_{15}^{15}}} (0,0017T^2 + 0,762T - 334,25). \quad (11.2)$$

- уравнение Уэйра и Итона

$$I_T^{\text{жс}} = 0,00218T^2 + (2,2864 - 1,9469d_{15}^{15})T + 531,51d_{15}^{15} - 785,57. \quad (11.3)$$

Для определения энтальпии жидких нефтепродуктов при атмосферном давлении (ккал/кг) можно использовать формулу

$$I_t^{\text{жс}} = (0,403t + 0,000405t^2) \frac{1}{\sqrt{0,9952d_4^{20} + 0,00806}}. \quad (11.4)$$

Для расчета энтальпии углеводородных газов и паров при атмосферном давлении (кДж/кг) предложено несколько уравнений (при температурах до 540 °С) :

$$I_T^n = 165,67 - 86d_{15}^{15} + (0,5409 - 0,134d_{15}^{15})T + (0,00234 - 0,00059d_{15}^{15})T^2, \quad (11.5)$$

$$I_T^n = (129,58 + 0,134T + 0,00059T^2)(4 - d_{15}^{15}) - 308,99. \quad (11.6)$$

Для вычисления энтальпии газов и паров при атмосферном давлении (ккал/кг) можно использовать формулу

$$I_t'' = (50,2 + 0,109t + 0,00014t^2) (3,992 - 0,9952d_4^{20}) - 73,8. \quad (11.7)$$

С повышением давления энтальпия нефтяных паров уменьшается, так как уменьшается теплота испарения. Для определения поправки к энтальпии на давление рекомендуется пользоваться графиком, изображенным на рисунках 11.1 и 11.2 или формулой

$$\frac{\Delta IM}{T} = -4,4 \frac{P_{np}}{T_{np}^3}. \quad (11.8)$$

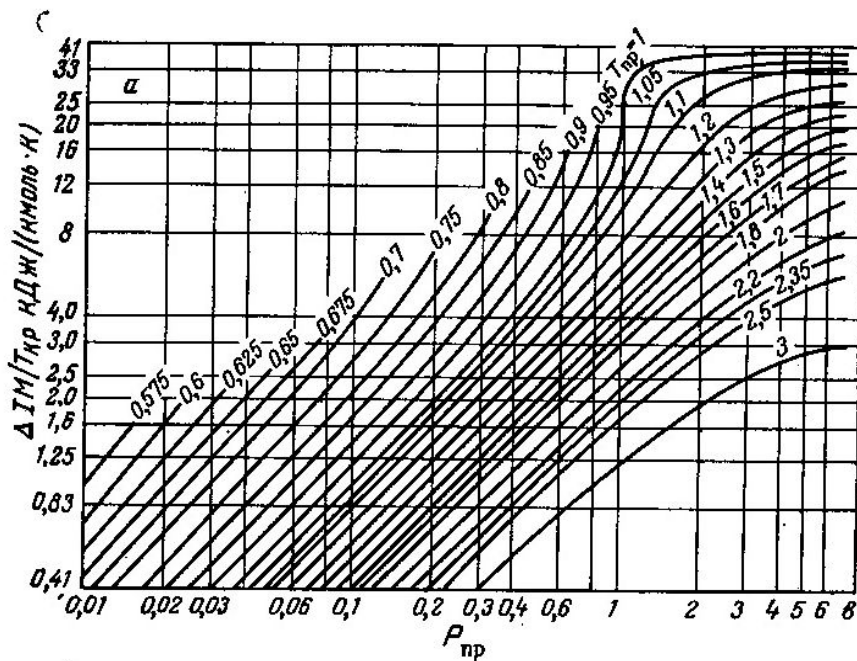


Рисунок 11.1 – График зависимости энтальпии нефтяных паров от приведенных температуры и давления в узком интервале изменения параметров

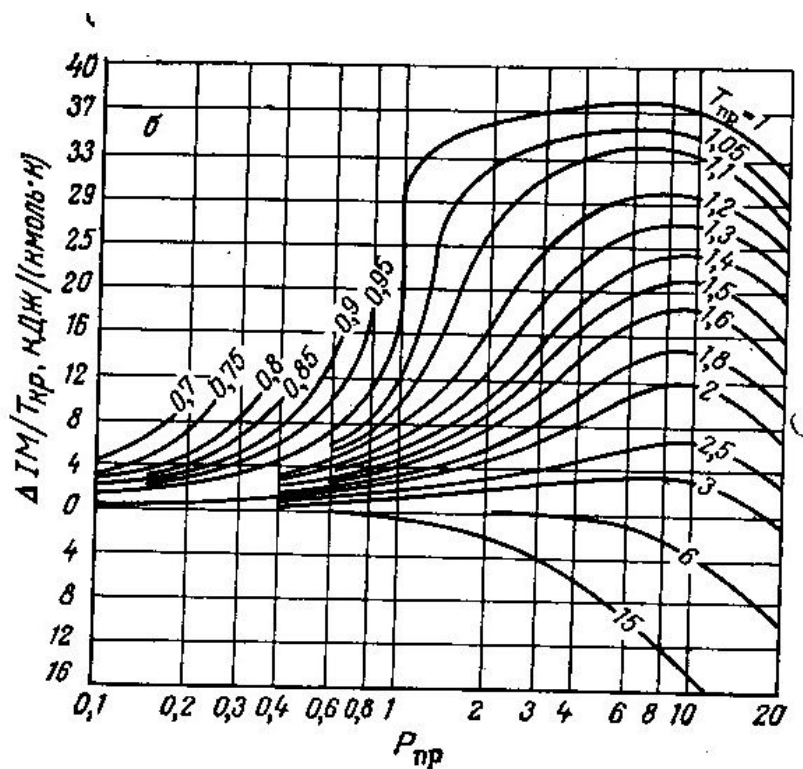


Рисунок 11.2 – График зависимости энтальпии нефтяных паров от приведенных температуры и давления в широком интервале изменения параметров

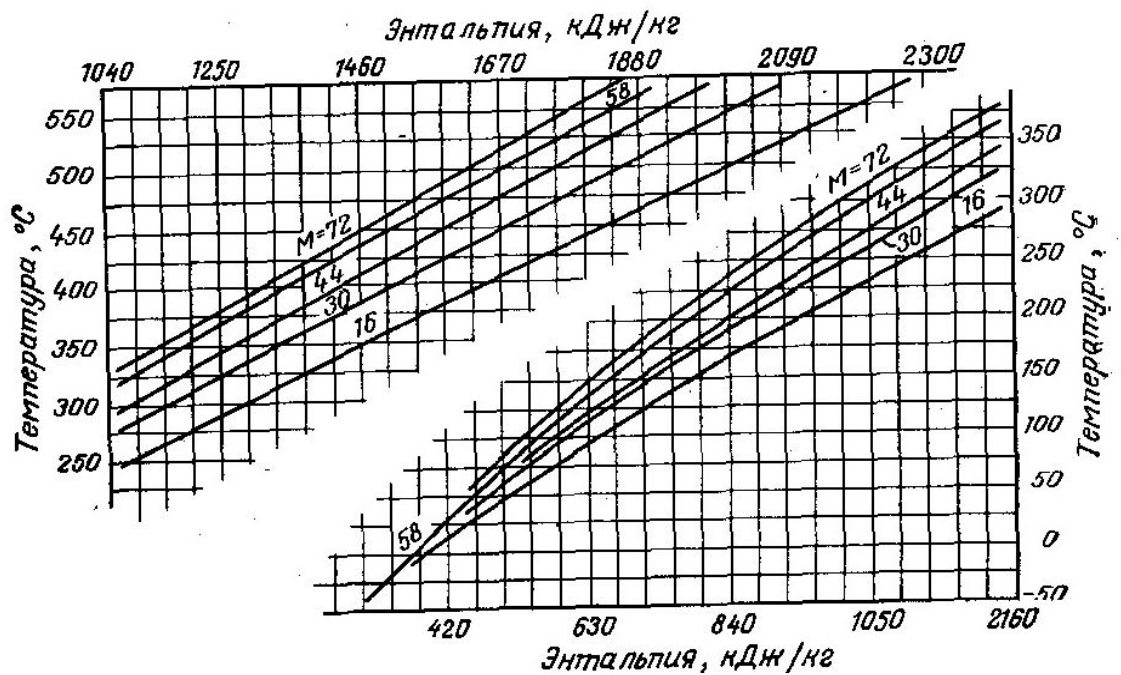


Рисунок 11.3 – Зависимость энтальпии паров нефтепродуктов от температуры при атмосферном давлении

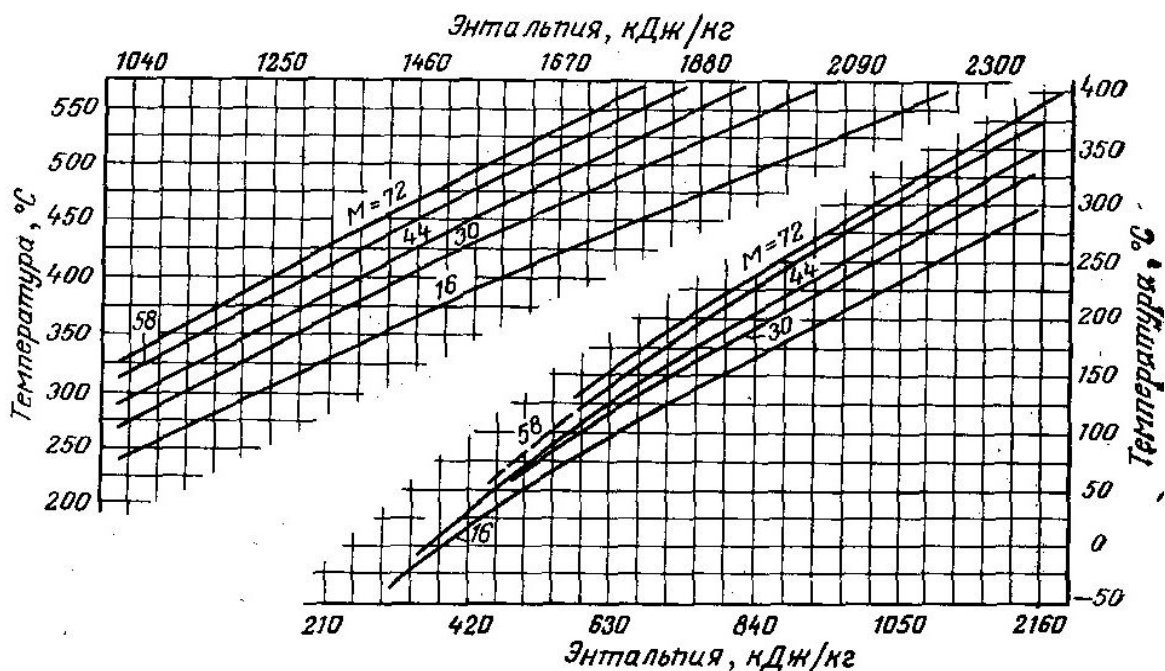


Рисунок 11.4 – Зависимость энтальпии паров нефтепродуктов от температуры при давлении 0,685 МПа

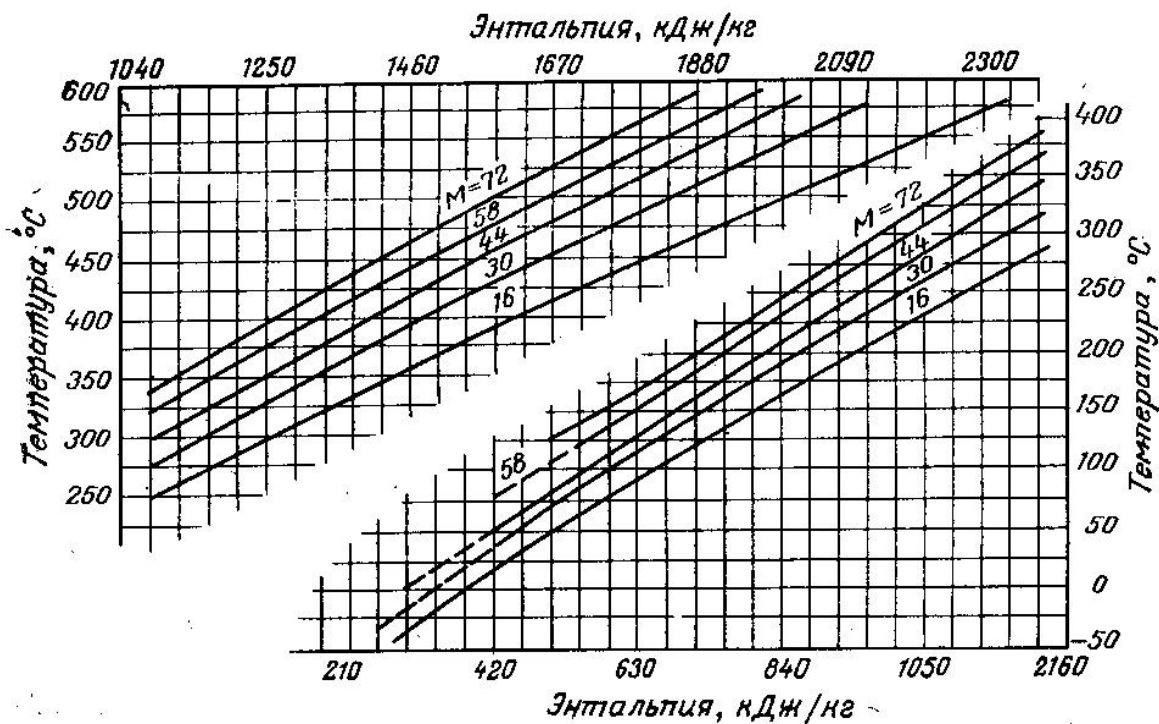
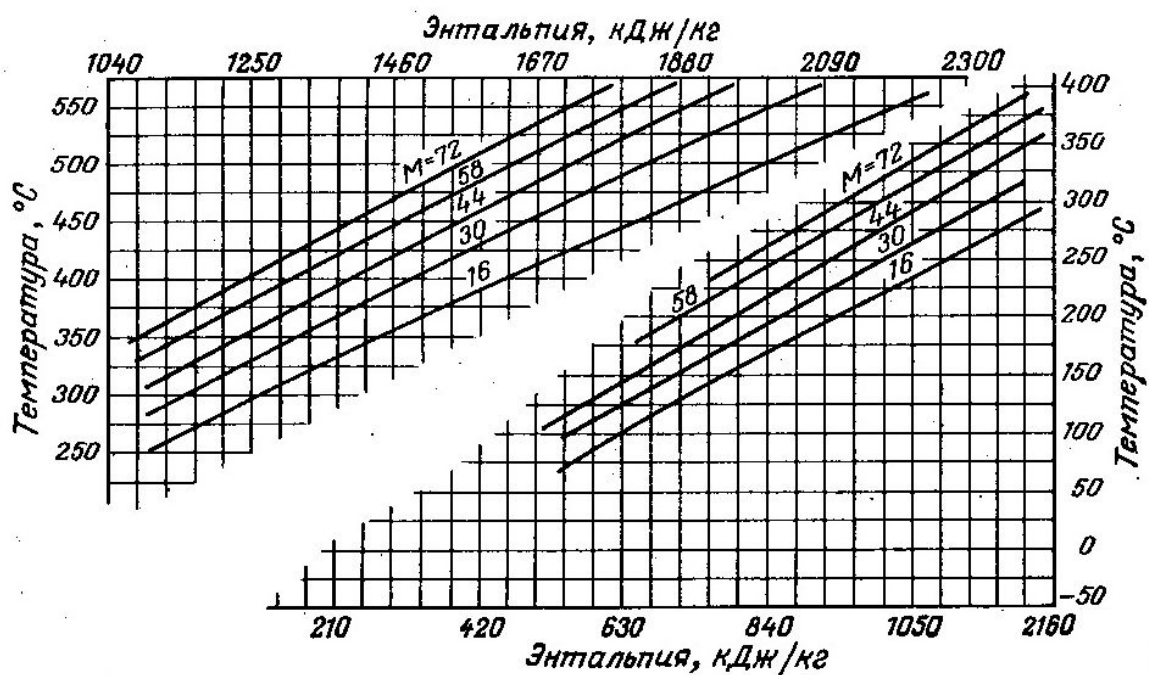


Рисунок 11.5 – Зависимость энтальпии паров нефтепродуктов от температуры при давлении 1,858 МПа



ЗАВИСИМОСТЬ ЭНТАЛЬПИИ ПАРОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ДАВЛЕНИИ 3,43 МПа.

Рисунок 11.6 – Зависимость энтальпии паров нефтепродуктов от температуры при давлении 3,43 МПа

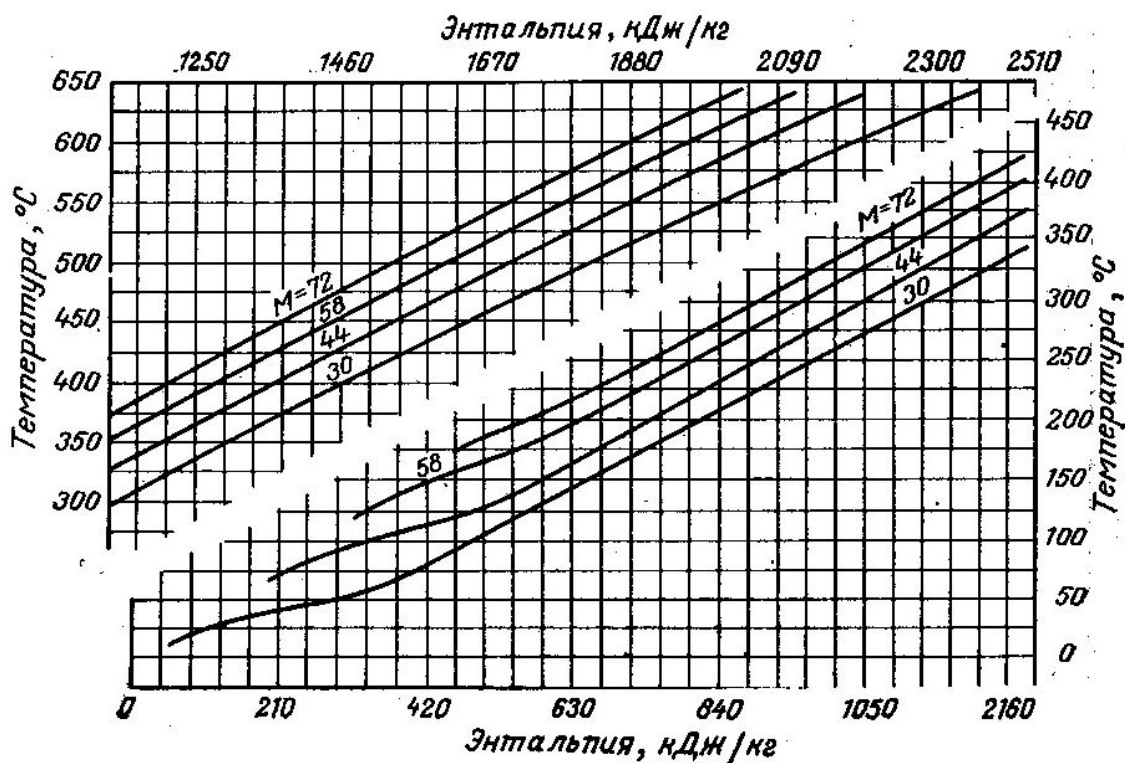


Рисунок 11.7 – Зависимость энтальпии паров нефтепродуктов от температуры при давлении 8,88 МПа

Энтальпию смесей вычисляют по формуле

$$I_{см} = x_1 I_1 + x_2 I_2 + \dots + x_n I_n, \quad (11.9)$$

где x_i - доля компонента в смеси, размерность которой зависит от размерности энтальпии: если энтальпия выражена в кДж/кг, то доли должны быть массовыми; если в кДж/кмоль – то мольными; если в кДж/м³ – то объемными.

Пример 11.1. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции при 100 °С ($d_4^{20} = 0,8044$).

Решение. Перейдем к относительной плотности d_{15}^{15} по уравнению (1.3):

$$d_{15}^{15} = d_4^{20} + \frac{0,0035}{d_4^{20}} = 0,8044 + \frac{0,0035}{0,8044} = 0,809.$$

По уравнению Фортча и Уитмена (11.1):

$$\begin{aligned} I_T^{жс} &= (0,001855T^2 + 0,4317T - 256,11)(2,1 - d_{15}^{15}) = \\ &= (0,001855 \cdot (100 + 273)^2 + 0,4317 \cdot (100 + 273) - 256,11) \times \\ &\times (2,1 - 0,809) = 210,5 \end{aligned}$$

По уравнению Крэга (11.2):

$$\begin{aligned} I_T^{жс} &= \frac{1}{\sqrt{d_{15}^{15}}} (0,0017T^2 + 0,762T - 334,25) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{0,809}} (0,0017 \cdot (100 + 273)^2 + 0,762 \cdot (100 + 273) - 334,25) = \\ &= 207,4 \end{aligned}$$

По уравнению Уэйра и Итона (11.3):

$$\begin{aligned} I_T^{жс} &= 0,00218T^2 + (2,2864 - 1,9469d_{15}^{15})T + 531,51d_{15}^{15} - 785,57 = \\ &= 0,00218 \cdot (100 + 273)^2 + (2,2864 - 1,9469 \cdot 0,809) \cdot (100 + 273) + \\ &+ 531,51 \cdot 0,809 - 785,57 = 213,1 \end{aligned}$$

Пример 11.2. Определить энтальпию паров узкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7350$, при 100 °С и атмосферном давлении.

Решение. Переедем к плотности d_{15}^{15} по уравнению (11.3):

$$d_{15}^{15} = d_4^{20} + \frac{0,0035}{d_4^{20}} = 0,7350 + \frac{0,0035}{0,7350} = 0,7400.$$

По уравнению (11.5):

$$\begin{aligned}
I_T^n &= 165,67 - 86d_{15}^{15} + (0,5409 - 0,134d_{15}^{15})T + \\
&+ (0,00234 - 0,00059d_{15}^{15})T^2 = 165,67 - 86 \cdot 0,7400 + \\
&+ (0,5409 - 0,134 \cdot 0,7400) \cdot (100 + 273) + \\
&+ (0,00234 - 0,00059 \cdot 0,7400) \cdot (100 + 273)^2 = 531,7
\end{aligned}$$

По уравнению (11.6):

$$\begin{aligned}
I_T^n &= (129,58 + 0,134T + 0,00059T^2)(4 - d_{15}^{15}) - 308,99 = \\
&= (129,58 + 0,134 \cdot (100 + 273) + 0,00059 \cdot (100 + 273)^2) \times \\
&\times (4 - 0,7400) - 308,99 = 544
\end{aligned}$$

Пример 11.3. Определить теплоемкость паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,6930$; $t_{кр} = 210$ °С; $P_{кр} = 2,74$ МПа, при 180 °С и 0,6 МПа.

Решение. Перейдем к относительной плотности d_{15}^{15} по уравнению (1.3):

$$d_{15}^{15} = d_4^{20} + \frac{0,0035}{d_4^{20}} = 0,6930 + \frac{0,0035}{0,6930} = 0,6980.$$

Энтальпию паров при атмосферном давлении найдем по уравнению (11.5):

$$\begin{aligned}
(I_T^n)_0 &= 165,67 - 86d_{15}^{15} + (0,5409 - 0,134d_{15}^{15})T + \\
&+ (0,00234 - 0,00059d_{15}^{15})T^2 = 165,67 - 86 \cdot 0,6980 + \\
&+ (0,5409 - 0,134 \cdot 0,6980) \cdot (180 + 273) + \\
&+ (0,00234 - 0,00059 \cdot 0,6980) \cdot (180 + 273)^2 = 703,9
\end{aligned}$$

Вычислим приведенные параметры:

$$\begin{aligned}
T_{np} &= \frac{T}{T_{кр}} = \frac{180 + 273}{210 + 273} = 0,94, \\
P_{np} &= \frac{P}{P_{кр}} = \frac{0,6}{2,74} = 0,22.
\end{aligned}$$

Поправку к энтальпии на давление вычислим по уравнению (11.8):

$$\frac{\Delta IM}{T} = -4,4 \frac{P_{np}}{T_{np}^3} = -4,4 \cdot \frac{0,22}{0,94^3} = -1,168.$$

Молекулярную массу фракции вычислим по формуле Бриджимана (2.9):

$$M = \frac{39d_4^{20}}{1 - d_4^{20}} = \frac{39 \cdot 0,6930}{1 - 0,6930} = 88.$$

Таким образом, из уравнения (11.8):

$$\Delta I = \frac{-1,168T}{M} = \frac{-1,168 \cdot (180 + 273)}{88} = -6,01 \text{ кДж/кг.}$$

Тогда энтальпия паров при повышенном давлении равна:

$$I = I_0 - \Delta I = 703,9 - 6,01 = 697,9 \text{ кДж/кг.}$$

Задачи для самостоятельного решения

661. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7061$, при 80 °С.
662. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7153$, при 55 °С.
663. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7403$, при 87 °С.
664. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7546$, при 110 °С.
665. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7734$, при 140 °С.
666. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7158$, при 50 °С.
667. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7375$, при 90 °С.
668. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7543$, при 100 °С.
669. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7715$, при 130 °С.
670. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7251$, при 65 °С.
671. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7338$, при 85 °С.
672. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7530$, при 115 °С.
673. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7725$, при 125 °С.
674. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7351$, при 70 °С.
675. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7745$, при 145 °С.
676. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7404$, при 75 °С.

677. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7616$, при 115 °С.
678. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7905$, при 120 °С.
679. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7478$, при 65 °С.
680. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7695$, при 100 °С.
681. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7230$, при 55 °С.
682. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7410$, при 85 °С.
683. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7660$, при 110 °С.
684. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7905$, при 145 °С.
685. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7425$, при 70 °С.
686. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7653$, при 120 °С.
687. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7870$, при 130 °С.
688. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7684$, при 100 °С.
689. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7256$, при 80 °С.
690. Определить энтальпию жидкой нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7152$, при 85 °С.
691. Определить энтальпию паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,6300$ при 90 °С и атмосферном давлении.
692. Определить энтальпию паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,6903$ при 140 °С и атмосферном давлении.
693. Определить энтальпию паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,7585$ при 120 °С и атмосферном давлении.
694. Определить энтальпию паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,7685$ при 160 °С и атмосферном давлении.
695. Определить энтальпию паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,7897$ при 175 °С и атмосферном давлении.
696. Определить энтальпию паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,7000$ при 75 °С и атмосферном давлении.

717. Определить энтальпию паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,6900$ при 150 °С и атмосферном давлении.
718. Определить энтальпию паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,7040$ при 170 °С и атмосферном давлении.
719. Определить энтальпию паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,7200$ при 200 °С и атмосферном давлении.
720. Определить энтальпию паров нефтепродукта плотностью $d_4^{20} = 0,7310$ при 240 °С и атмосферном давлении.
721. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7192$, $t_{cp} = 84$ °С, $t_{кр} = 255$ °С, $P_{кр} = 28$ атм, при 200 °С и 1 МПа.
722. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7330$, $t_{cp} = 101$ °С, $t_{кр} = 275$ °С, $P_{кр} = 26$ атм, при 270 °С и 3,5 кгс/см².
723. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7437$, $t_{cp} = 120$ °С, $t_{кр} = 300$ °С, $P_{кр} = 25$ атм, при 270 °С и 25800 кгс/м².
724. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7502$, $t_{cp} = 132$ °С, $t_{кр} = 320$ °С, $P_{кр} = 24,7$ атм, при 260 °С и 900 мм рт. ст.
725. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7382$, $t_{cp} = 112$ °С, $t_{кр} = 285$ °С, $P_{кр} = 26$ атм, при 200 °С и 0,45 МПа.
726. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,6900$, $t_{cp} = 74$ °С, $t_{кр} = 210$ °С, $P_{кр} = 33$ атм, при 150 °С и 4,26 кгс/см².
727. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,714$, $t_{cp} = 73$ °С, $t_{кр} = 205$ °С, $P_{кр} = 34$ атм, при 250 °С и 51600 кгс/м².
728. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7410$, $t_{cp} = 103$ °С, $t_{кр} = 280$ °С, $P_{кр} = 26$ атм, при 300 °С и 1200 мм рт. ст.
729. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7170$, $t_{cp} = 84$ °С, $t_{кр} = 260$ °С, $P_{кр} = 28$ атм, при 240 °С и 0,6 МПа.
730. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7437$, $t_{cp} = 120$ °С, $t_{кр} = 300$ °С, $P_{кр} = 25$ атм, при 270 °С и 25800 кгс/м².
731. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7322$, $t_{cp} = 101$ °С, $t_{кр} = 275$ °С, $P_{кр} = 27$ атм, при 210 °С и 6,23 кгс/см².

732. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7449$, $t_{cp} = 113$ °C, $t_{кр} = 290$ °C, $P_{кр} = 25,5$ атм, при 240 °C и 67100 кгс/м².
733. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,6707$, $t_{cp} = 57$ °C, $t_{кр} = 230$ °C, $P_{кр} = 30,5$ атм, при 140 °C и 1000 мм рт. ст.
734. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,6919$, $t_{cp} = 64$ °C, $t_{кр} = 242$ °C, $P_{кр} = 29,5$ атм, при 220 °C и 0,7 МПа.
735. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7118$, $t_{cp} = 78$ °C, $t_{кр} = 250$ °C, $P_{кр} = 28,5$ атм, при 180 °C и 3,2 кгс/см².
736. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7363$, $t_{cp} = 109$ °C, $t_{кр} = 290$ °C, $P_{кр} = 27$ атм, при 150 °C и 24800 кгс/м².
737. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,749$, $t_{cp} = 136$ °C, $t_{кр} = 320$ °C, $P_{кр} = 24,1$ атм, при 250 °C и 1050 мм рт. ст.
738. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,6858$, $t_{cp} = 78$ °C, $t_{кр} = 310$ °C, $P_{кр} = 28$ атм, при 180 °C и 0,8 МПа.
739. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,761$, $t_{cp} = 109$ °C, $t_{кр} = 295$ °C, $P_{кр} = 25,5$ атм, при 190 °C и 4,1 кгс/см².
740. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,6500$, $t_{cp} = 44$ °C, $t_{кр} = 220$ °C, $P_{кр} = 33$ атм, при 140 °C и 31000 кгс/м².
741. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,6870$, $t_{cp} = 74$ °C, $t_{кр} = 250$ °C, $P_{кр} = 28$ атм, при 170 °C и 950 мм рт. ст.
742. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7025$, $t_{cp} = 84$ °C, $t_{кр} = 270$ °C, $P_{кр} = 27,5$ атм, при 200 °C и 0,6 МПа.
743. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7252$, $t_{cp} = 101$ °C, $t_{кр} = 280$ °C, $P_{кр} = 27$ атм, при 210 °C и 5,2 кгс/см².
744. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7000$, $t_{cp} = 75$ °C, $t_{кр} = 295$ °C, $P_{кр} = 29$ атм, при 160 °C и 41000 кгс/м².

745. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7366$, $t_{cp} = 120$ °С, $t_{кр} = 300$ °С, $P_{кр} = 24,9$ атм, при 220 °С и 810 мм рт. ст.
746. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7460$, $t_{cp} = 132$ °С, $t_{кр} = 340$ °С, $P_{кр} = 25,1$ атм, при 260 °С и 0,32 МПа.
747. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7350$, $t_{cp} = 84$ °С, $t_{кр} = 250$ °С, $P_{кр} = 29$ атм, при 190 °С и 2,2 кгс/см².
748. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7562$, $t_{cp} = 100$ °С, $t_{кр} = 270$ °С, $P_{кр} = 27$ атм, при 185 °С и 25800 кгс/м².
749. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7765$, $t_{cp} = 123$ °С, $t_{кр} = 300$ °С, $P_{кр} = 25$ атм, при 225 °С и 920 мм рт. ст.
750. Определить энтальпию паров нефтяной фракции, имеющей $d_4^{20} = 0,7844$, $t_{cp} = 130$ °С, $t_{кр} = 300$ °С, $P_{кр} = 25,1$ атм, при 250 °С и 0,8 МПа.

12. Теплопроводность

Теплопроводность – процесс распространения тепла в телах, происходящий без перемещения вещества этих тел, без конвекции и лучистого теплообмена.

Коэффициент теплопроводности λ выражает количество тепла, которое переходит в единицу времени через единицу поверхности при изменении температуры на один градус на каждую единицу длины.

Как правило, теплопроводность жидкостей уменьшается при повышении температуры. В среднем при повышении температуры на 10 градусов коэффициент теплопроводности уменьшается на 1 %.

При определении теплопроводности жидких углеводородов (Вт/(м·К)) относительной плотности $d_{15}^{15} = 0,78 - 0,95$ в интервале температур от 0 до 200 °С применима формула Крэга

$$\lambda_T = \frac{0,1175}{d_{15}^{15}} (1,1472 - 0,00054T). \quad (12.1)$$

Формула Расторгуева дает хорошие результаты расчета коэффициента теплопроводности (Вт/(м·К)) для прямоугольных нефтепродуктов

$$\lambda_{30} = [0,105 + 0,97 \cdot 10^{-4} (T_{\text{кин}} - 323,15)] \cdot \Pi^{-2}, \quad (12.2)$$

где $\Pi = d_4^{20} + \frac{100}{t_{\text{кин}}}$.

Формула Абросимова

$$\lambda_t = 101 \cdot 10^{-6} t_{\text{кин}} + \frac{0,10081 t_{\text{кин}} + 27,535}{T_{\text{кин}} d_4^{20} + 100} + 0,00294 (d_4^{20})^{-2,381} + 0,00147 (d_4^{20})^{-3,381} - [97 \cdot 10^{-6} (d_4^{20})^{-2,381} + 24,8 \cdot 10^{-6}] \cdot t \quad (12.3)$$

Формула Вебера

$$\lambda_T = 0,359 \cdot 10^{-4} c_p M^{-1/3} \rho^{4/3}, \quad (12.4)$$

где c_p - теплоемкость нефтепродукта при постоянном давлении.

Для расчета коэффициента теплопроводности жидких углеводородов под давлением не выше 3,5 МПа и при $t_{np} = 0,4 - 0,9$ рекомендуется уравнение

$$\lambda = 0,24 \cdot 10^{-6} c_p \frac{\rho^{4/3}}{M^{1/3} t_{np}}. \quad (12.5)$$

Формула Смита используется для вычисления коэффициента теплопроводности в $\frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}}$

$$\lambda \cdot 10^6 = 11 + 6450(c_p - 0,45)^3 + 1250\left(\frac{\rho}{M}\right)^{1/3} + 100\left(\frac{\mu}{\rho}\right)^{0,111}, \quad (12.6)$$

c_p - изобарная теплоемкость, кал/(г·град);

ρ - абсолютная плотность, г/см³;

μ - динамическая вязкость, спз.

Для определения теплопроводности газообразных углеводородов можно использовать зависимость Мизика и Тодоса

$$\frac{\lambda_0 \Lambda}{c_p} = (14,52T_{np} - 5,14)^{2/3} \cdot 10^{-6}, \quad (12.7)$$

где $\Lambda = M^{1/2} \frac{T_{кр}^{1/6}}{P_{кр}^{2/3}}$.

Зависимость теплопроводности от температуры наиболее просто можно представить уравнением Сатерленда

$$\lambda_T = \lambda_{273} \left(\frac{273 + C}{T + C} \right) \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2}, \quad (12.8)$$

где приближенно можно принять, что $C \approx 1,47T_{кин}$.

Теплопроводность газа при повышенном давлении можно определить, зная его теплопроводность при умеренном давлении и той же температуре, используя зависимость Комингса и Натана

$$\left(\frac{\lambda_p}{\lambda_0} \right)_T = f(T_{np}, P_{np}), \quad (12.9)$$

где λ_p - теплопроводность при повышенном давлении;

λ_0 - теплопроводность при умеренном давлении;

T_{np} - приведенная температура;

P_{np} - приведенное давление.

Для использования этой зависимости имеются графики, изображенные на рисунках 12.1 и 12.2.

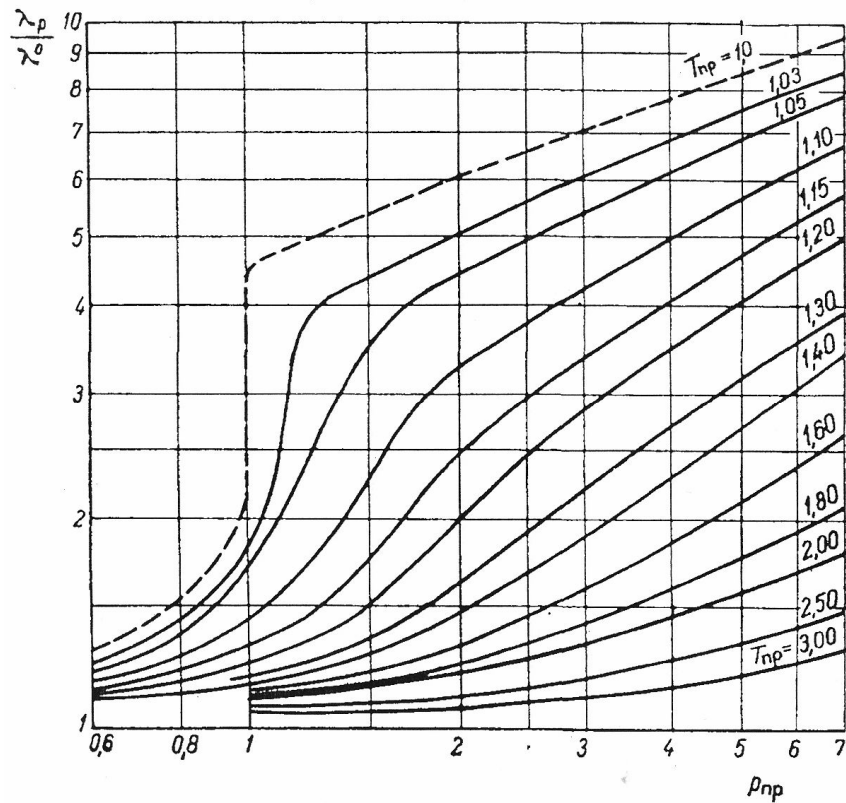


Рисунок 12.1 – Обобщенная зависимость величины λ_p/λ_0 при температуре T от T_{np} и P_{np} в области высоких давлений

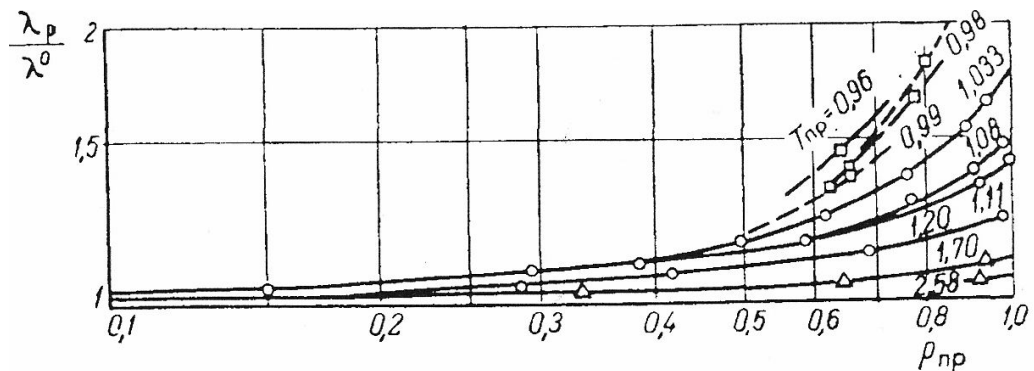


Рисунок 12.2 – Обобщенная зависимость величины λ_p/λ_0 при температуре T от T_{np} и P_{np} в области давлений P_{np} от 0,1 до 1,0

Пример 12.1. Определить теплопроводность узкой фракции, имеющей $t_{cp} = 105$ °С и $d_4^{20} = 0,7639$, при 75 °С.

Решение. Перейдем к плотности d_{15}^{15} по уравнению (1.3):

$$d_{15}^{15} = d_4^{20} + \frac{0,0035}{d_4^{20}} = 0,7639 + \frac{0,0035}{0,7639} = 0,768.$$

По формуле Абросимова (12.3):

$$\begin{aligned} \lambda_t &= 101 \cdot 10^{-6} t_{\text{кун}} + \frac{0,10081 t_{\text{кун}} + 27,535}{T_{\text{кун}} d_4^{20} + 100} + 0,00294 (d_4^{20})^{-2,381} + \\ &+ 0,00147 (d_4^{20})^{-3,381} - \left[97 \cdot 10^{-6} (d_4^{20})^{-2,381} + 24,8 \cdot 10^{-6} \right] \cdot t = \\ &= 101 \cdot 10^{-6} \cdot 105 + \frac{0,10081 \cdot 105 + 27,535}{(105 + 273) \cdot 0,7639 + 100} + 0,00294 \cdot 0,7639^{-2,381} + \\ &+ 0,00147 \cdot 0,7639^{-3,381} - \left[97 \cdot 10^{-6} \cdot 0,7639^{-2,381} + 24,8 \cdot 10^{-6} \right] \cdot 105 = 0,102 \\ &\text{Вт/(м·К)}. \end{aligned}$$

Пример 12.2. Определить теплопроводность амилена при 200 °С и 2 МПа.

Решение. Критические параметры амилена найдем в таблице 15.1:

$$\begin{aligned} t_{\text{кр}} &= 201,3 \text{ °С}, \\ P_{\text{кр}} &= 4,09 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

Теплопроводность при атмосферном давлении найдем по формуле Мизика и Тодоса (12.7):

$$\begin{aligned} \Lambda &= M^{1/2} \frac{T_{\text{кр}}^{1/6}}{P_{\text{кр}}^{2/3}} = 70^{1/2} \frac{(201,3 + 273)^{1/6}}{(4,09 \cdot 10^6)^{2/3}} = 9,14 \cdot 10^{-4}, \\ \lambda_0 &= \frac{c_p}{\Lambda} (14,52 T_{\text{np}} - 5,14)^{2/3} \cdot 10^{-6} = \\ &= \frac{2,64}{9,14 \cdot 10^{-4}} \left(14,52 \cdot \left(\frac{200 + 273}{201,3 + 273} \right) - 5,14 \right)^{2/3} \cdot 10^{-6} = \\ &= 0,013 \end{aligned}$$

где теплоемкость амилена определена по справочной литературе.

Для вычисления теплопроводности амилена при повышенном давлении используем зависимость Комингса и Натана, представленную в графической форме на рисунках 12.1 и 12.2.

Приведенные параметры:

$$\begin{aligned} T_{\text{np}} &= \frac{T}{T_{\text{кр}}} = \frac{200 + 273}{201,3 + 273} = 0,99, \\ P_{\text{np}} &= \frac{P}{P_{\text{кр}}} = \frac{2}{4,09} = 0,49. \end{aligned}$$

По графику, изображенному на рисунке 12.2:

$$\frac{\lambda_p}{\lambda_0} = 1,17.$$

Тогда искомая величина

$$\lambda_p = 1,17\lambda_0 = 1,17 \cdot 0,013 = 0,015 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Задачи для самостоятельного решения

751. Определить теплопроводность фракции 95 – 120 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,7607$ при температуре 80 °С.
752. Определить теплопроводность фракции 120 – 150 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,7665$ при температуре 100 °С.
753. Определить теплопроводность фракции 62 – 95 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,7270$ при температуре 55 °С.
754. Определить теплопроводность фракции 95 – 122 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,7395$ при температуре 70 °С.
755. Определить теплопроводность фракции 122 – 150 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,7535$ при температуре 95 °С.
756. Определить теплопроводность фракции 150 – 200 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,7767$ при температуре 125 °С.
757. Определить теплопроводность фракции 60 – 95 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,6860$ при температуре 45 °С.
758. Определить теплопроводность фракции 95 – 122 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,7152$ при температуре 75 °С.
759. Определить теплопроводность фракции 150 – 200 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,7680$ при температуре 135 °С.
760. Определить теплопроводность фракции 60 – 95 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,7250$ при температуре 35 °С.
761. Определить теплопроводность фракции 62 – 105 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,7401$ при температуре 50 °С.
762. Определить теплопроводность фракции 85 – 120 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,7592$ при температуре 60 °С.
763. Определить теплопроводность фракции 85 – 180 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,7850$ при температуре 75 °С.
764. Определить теплопроводность фракции 105 – 120 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,7660$ при температуре 95 °С.
765. Определить теплопроводность фракции 120 – 140 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,7828$ при температуре 110 °С.
766. Определить теплопроводность фракции 95 – 122 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,7500$ при температуре 70 °С.

767. Определить теплопроводность фракции 150 – 200 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,7724$ при температуре 100 °С.
768. Определить теплопроводность фракции 145 – 200 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,8302$ при температуре 120 °С.
769. Определить теплопроводность фракции 165 – 200 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,8285$ при температуре 150 °С.
770. Определить теплопроводность фракции 173 – 200 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,8165$ при температуре 140 °С.
771. Определить теплопроводность фракции 95 – 122 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,7373$ при температуре 75 °С.
772. Определить теплопроводность фракции 105 – 120 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,7600$ при температуре 95 °С.
773. Определить теплопроводность фракции 105 – 140 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,7431$ при температуре 80 °С.
774. Определить теплопроводность фракции 120 – 140 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,7565$ при температуре 105 °С.
775. Определить теплопроводность фракции 140 – 180 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,7790$ при температуре 120 °С.
776. Определить теплопроводность фракции 120 – 150 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,7649$ при температуре 100 °С.
777. Определить теплопроводность фракции 150 – 200 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,8108$ при температуре 130 °С.
778. Определить теплопроводность фракции 95 – 120 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,7388$ при температуре 70 °С.
779. Определить теплопроводность фракции 105 – 140 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,7671$ при температуре 95 °С.
780. Определить теплопроводность фракции 140 – 180 °С, имеющей $d_4^{20} = 0,7895$ при температуре 80 °С.
781. Определить теплопроводность метана при 100 °С и 2,5 МПа.
782. Определить теплопроводность этана при 120 °С и 1,55 кгс/см².
783. Определить теплопроводность пропана при 200 °С и 31000 кгс/м².
784. Определить теплопроводность бутана при 300 °С и 1,75 МПа.
785. Определить теплопроводность этилена при 140 °С и 3,15 кгс/см².
786. Определить теплопроводность пропена при 220 °С и 27500 кгс/м².
787. Определить теплопроводность бутилена при 250 °С и 1,45 МПа.
788. Определить теплопроводность ацетилену при 170 °С и 3,6 кгс/см².
789. Определить теплопроводность метана при 150 °С и 33000 кгс/м².
790. Определить теплопроводность этана при 200 °С и 4,0 МПа.
791. Определить теплопроводность пропана при 140 °С и 2,2 кгс/см².
792. Определить теплопроводность бутана при 190 °С и 17500 кгс/м².
793. Определить теплопроводность этилена при 250 °С и 4,25 МПа.

794. Определить теплопроводность пропена при 110 °С и 2,12 кгс/см².
795. Определить теплопроводность бутилена при 280 °С и 20700 кгс/м².
796. Определить теплопроводность ацетилена при 200 °С и 3,8 МПа.
797. Определить теплопроводность метана при 90 °С и 1,75 кгс/см².
798. Определить теплопроводность этана при 80 °С и 13200 кгс/м².
799. Определить теплопроводность пропана при 100 °С и 1,4 МПа.
800. Определить теплопроводность бутана при 260 °С и 2,05 кгс/см².
801. Определить теплопроводность этилена при 200 °С и 32100 кгс/м².
802. Определить теплопроводность пропена при 170 °С и 3,2 МПа.
803. Определить теплопроводность бутилена при 230 °С и 1,9 кгс/см².
804. Определить теплопроводность ацетилена при 140 °С и 40000 кгс/м².
805. Определить теплопроводность метана при 180 °С и 4,5 МПа.
806. Определить теплопроводность этана при 150 °С и 2,15 кгс/см².
807. Определить теплопроводность пропана при 175 °С и 25200 кгс/м².
808. Определить теплопроводность бутана при 320 °С и 3,55 МПа.
809. Определить теплопроводность этилена при 100 °С и 2,6 кгс/см².
810. Определить теплопроводность пропена при 180 °С и 22565 кгс/м².

13. Давление насыщенных паров

Давление насыщенных паров – это давление, при котором паровая фаза вещества находится в состоянии равновесия с его жидкой фазой при определенной температуре.

Зависимость давления насыщенных паров от температуры совпадает с зависимостью внешнего давления от температуры кипения вещества.

Одним из самых известных уравнений для вычисления давления насыщенных паров является уравнение Антуана

$$\lg P = A - \frac{B}{C + T}, \quad (13.1)$$

или

$$\lg P = A - \frac{B}{C + t}, \quad (13.2)$$

где A , B и C - константы, зависящие от природы вещества и температуры. Значения констант приведены в литературе [1].

Давление насыщенных паров (Па) нормальных парафиновых углеводородов при температуре T рассчитывается по формуле Вильсона

$$\lg P_T = 5,006 + AB, \quad (13.3)$$

где

$$A = \frac{T_{\text{кип}} - 43}{0,3091 - 0,00021(T_{\text{кип}} - 43)}, \quad (13.4)$$

$$B = \frac{1}{T_{\text{кип}} - 43} - \frac{1}{T - 43}. \quad (13.5)$$

Давление насыщенных паров (Па) *n*-алканов и узких нефтяных фракций определяется по уравнению Ашворта

$$\lg(P - 3158) = 7,6715 - \frac{2,68f(T)}{f(T_0)}, \quad (13.6)$$

в которой

$$f(T) = \frac{1250}{\sqrt{T^2 + 108000} - 307,6} - 1, \quad (13.7)$$

$$f(T_0) = \frac{1250}{\sqrt{T_0^2 + 108000} - 307,6} - 1, \quad (13.8)$$

где T - температура кипения при давлении P , К;
 T_0 - нормальная температура кипения, К.

Одной из новых разработок является уравнение, полученное на основе информационно-энтропийного моделирования

$$P_T = P_0 \tau_{\text{кип}}^f, \quad (13.9)$$

в котором

$$f = \alpha_0 + \frac{\alpha_1}{\tau_{\text{кип}}} + \alpha_2 \tau_{\text{кип}} + \alpha_3 d_4^{20} + \alpha_4 (d_4^{20})^2 + \frac{\alpha_5 T_{\text{кип}}^0}{273,15}, \quad (13.10)$$

$$\alpha_0 = -2,8718,$$

$$\alpha_1 = 10,4113,$$

$$\alpha_2 = 2,5858,$$

$$\alpha_3 = -2,8981,$$

$$\alpha_4 = -2,081,$$

$$\alpha_5 = 1,2406,$$

$$\tau_{\text{кип}} = \frac{T}{T_{\text{кип}}^0},$$

где T - температура кипения при давлении P_T , К;

$T_{\text{кип}}^0$ - нормальная температура кипения, К;

P_0 - давление насыщенных паров при температуре кипения (стандартное давление).

Пересчет истинных температур кипения нефтяных фракций на повышенные давления можно производить по диаграмме, приведенной на рисунке 13.1, или по уточненному графику Кокса, приведенному на рисунке 13.2.

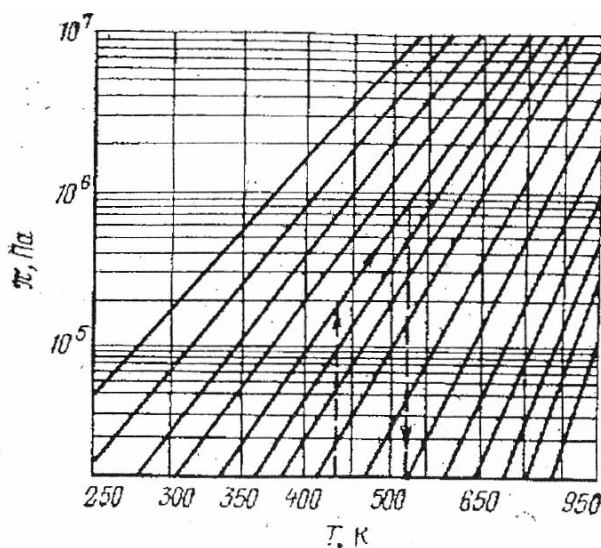
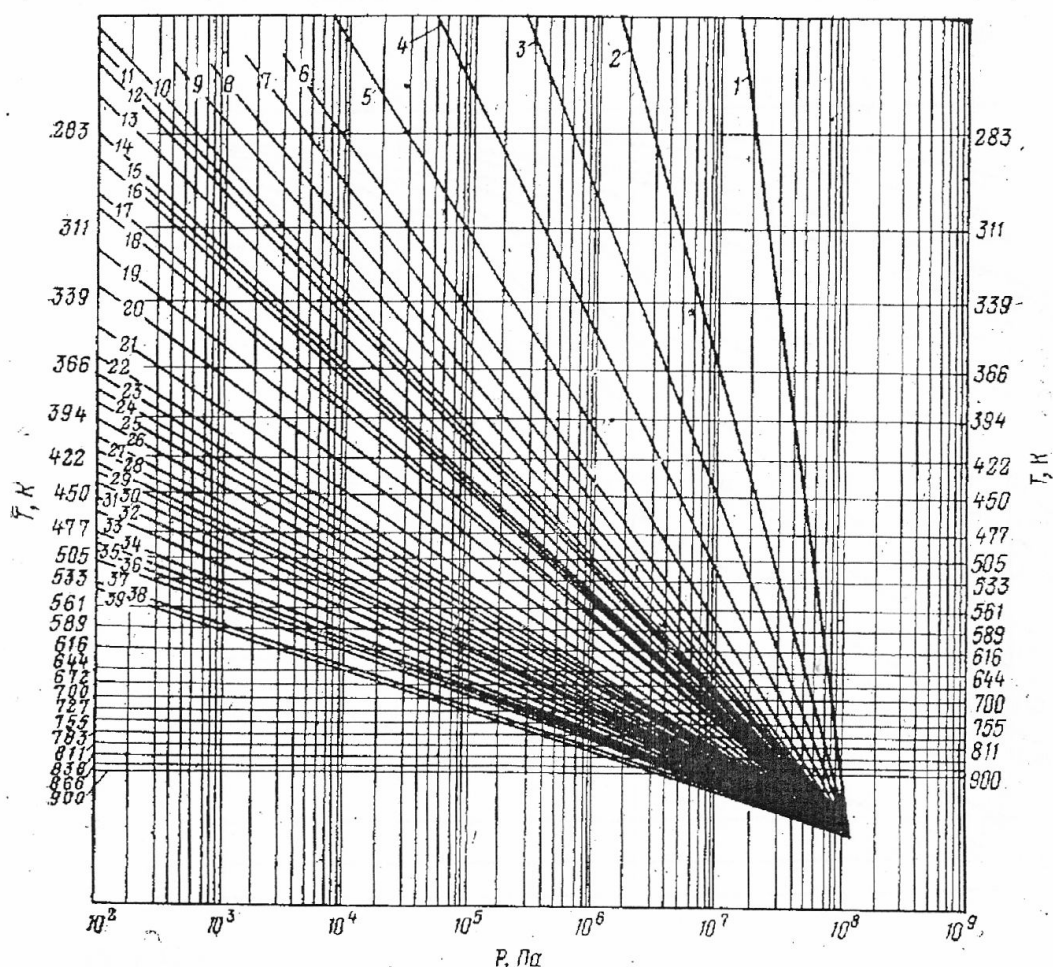


Рисунок 13.1 – Номограмма для пересчета температур ИТК на повышенное давление



1- метан; 2 – этан; 3 – пропан; 4 – бутан; 5 – пентан; 6 – гексан; 7 - бензол; 8 – гептан; 9 – толуол; 10 – октан; 11 – этилбензол; 12 – параксиллол; 13 – нонан; 14 – мезитилен; 15 – децилен; 16 – декан; 17 – трициклодекан; 18 - ундекан; 19 – додекан; 20 – тридекан; 21 – тетрадекан; 22 – пентадекан; 23 – гексадекан; 24 – гептадекан; 25 – октадекан; 26 – нонадекан; 27 – эйкозан; 28 – генойкозан; 29 – докозан; 30 – трикозан; 31 – тетракозан; 32 – пентакозан; 33 – гексакозан; 34 – гептакозан; 35 – октакозан; 36 – гептатриаконтан; 37 – дотриаконтан; 38 – тетратриаконтан; 39 - пентатриаконтан

Рисунок 13.2 – Уточненный график Кокса

Графически определять давление насыщенных паров можно также и по первоначальному графику Кокса, приведенному на рисунке 13.3.

По экспериментальным данным построены номограммы, изображенные на рисунках 13.4 и 13.5.

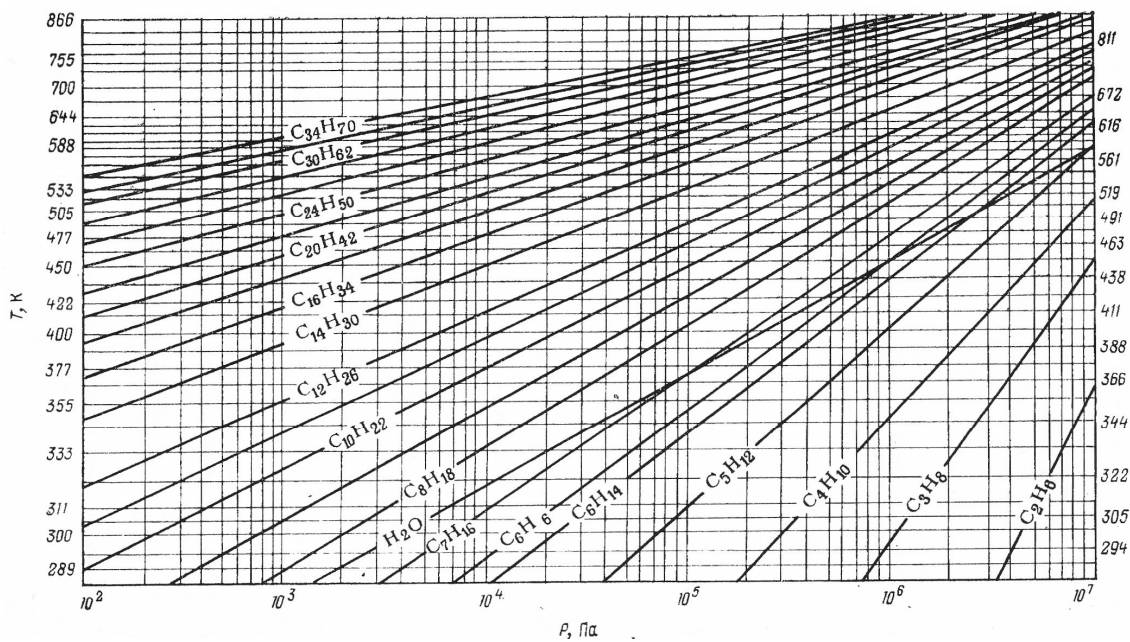


Рисунок 13.3 – Первоначальный график Кокса

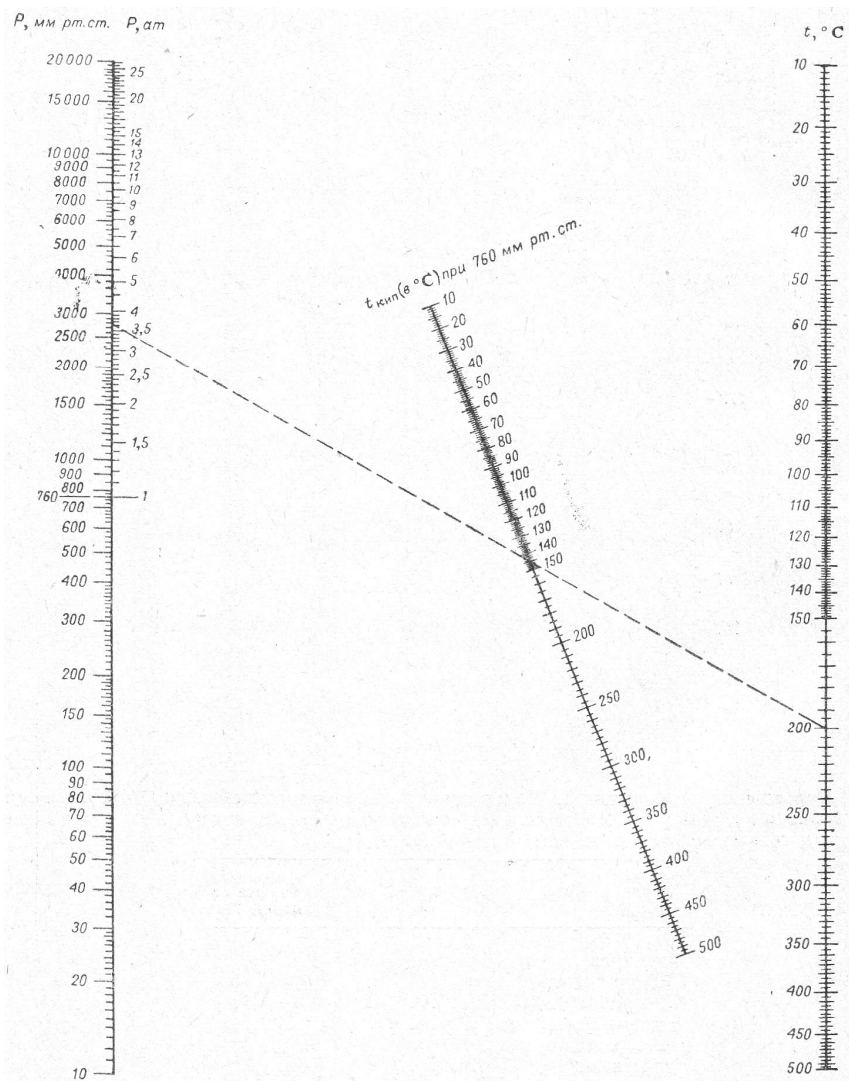


Рисунок 13.4 – Номограмма для определения давления паров нормальных парафиновых углеводородов

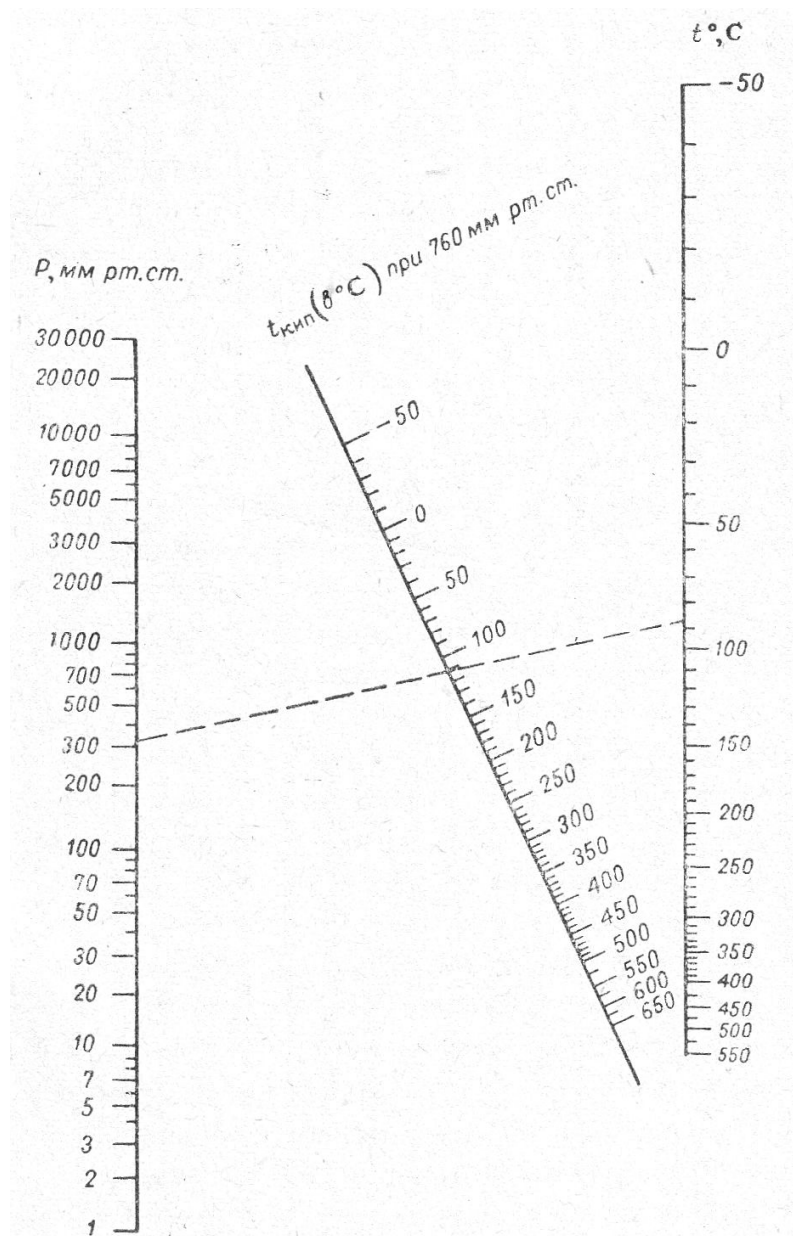


Рисунок 13.5 – Номограмма для определения давления паров парафиновых углеводородов и нефтяных фракций

Пример 13.1. Определить давление насыщенных паров при 105 °С узкой фракции, имеющей $t_{cp} = 100$ °С и $d_4^{20} = 0,7710$.

Решение. Вычислим ДНП по формуле Вильсона (13.3), рассчитав предварительно коэффициенты A и B по уравнениям (13.4) и (13.5) соответственно.

$$A = \frac{T_{кип} - 43}{0,3091 - 0,00021(T_{кип} - 43)} = \frac{(100 + 273) - 43}{0,3091 - 0,00021((100 + 273) - 43)} = 1376,15$$

$$B = \frac{1}{T_{кин} - 43} - \frac{1}{T - 43} =$$

$$= \frac{1}{(100 + 273) - 43} - \frac{1}{(105 + 273) - 43} = 4,523 \cdot 10^{-5}$$

$$P_T = 10^{5,006+AB} = 10^{5,006+1376,15 \cdot 4,523 \cdot 10^{-5}} = 1,17 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Вычислим ДНП фракции по уравнению Ашворта (13.6), предварительно определив значения вспомогательных величин по уравнениям (13.7) и (13.8).

$$f(T) = \frac{1250}{\sqrt{T^2 + 108000} - 307,6} - 1 =$$

$$= \frac{1250}{\sqrt{T^2 + 108000} - 307,6} - 1 = 5,467$$

$$f(T_0) = \frac{1250}{\sqrt{T_0^2 + 108000} - 307,6} - 1 =$$

$$= \frac{1250}{\sqrt{(100 + 273)^2 + 108000} - 307,6} - 1 = 5,596$$

$$P = 10^{7,6715 - \frac{2,68 \cdot f(T)}{f(T_0)}} + 3158 = 10^{7,6715 - \frac{2,68 \cdot 5,467}{5,596}} + 3158 = 1,161 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Для определения ДНП по уравнению (13.9) вычислим вспомогательные величины:

$$\tau_{кин} = \frac{T}{T_{кин}^0} = \frac{105 + 273}{100 + 273} = 1,013,$$

$$f = \alpha_0 + \frac{\alpha_1}{\tau_{кин}} + \alpha_2 \tau_{кин} + \alpha_3 d_4^{20} + \alpha_4 (d_4^{20})^2 + \frac{\alpha_5 T_{кин}^0}{273,15} =$$

$$= (2,8718) + \frac{10,4113}{1,013} + 2,5858 \cdot 1,013 - 2,8981 \cdot 0,7710 -$$

$$- 2,081 \cdot 0,7710^2 + \frac{1,2406 \cdot (100 + 273)}{273,15} = 8,245$$

$$P_T = P_0 \tau_{кин}^f = 101325 \cdot 1,013^{8,245} = 1,131 \cdot 10^5.$$

По номограмме, представленной на рисунке 13.5:

$$P \approx 1,1 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Пример 13.2. При атмосферном давлении нефтяная фракция имеет среднюю температуру кипения 110 °С. Какова будет средняя температура её кипения при 0,35 МПа?

Решение. Кипение жидкости наступает тогда, когда давление её насыщенных паров сравнивается с внешним давлением.

По уравнению (13.8) вычислим вспомогательную величину:

$$f(T_0) = \frac{1250}{\sqrt{T_0^2 + 108000} - 307,6} - 1 =$$

$$= \frac{1250}{\sqrt{(110 + 273)^2 + 108000} - 307,6} - 1 = 5,343$$

Вспользуемся преобразованным уравнением Ашворта (13.6)

$$f(T) = [7,6715 - \lg(P - 3158)] \cdot \frac{f(T_0)}{2,68} =$$

$$= [7,6715 - \lg(0,35 \cdot 10^6 - 3158)] \cdot \frac{5,343}{2,68} = 4,249$$

Температуру кипения (°С) при повышенном давлении найдем из преобразованного уравнения (13.7):

$$t = \sqrt{\left[\frac{1250}{f(T) + 1} + 307,6 \right]^2 - 108000} - 273 =$$

$$= \sqrt{\left[\frac{1250}{4,249 + 1} + 307,6 \right]^2 - 108000} - 273 = 162,7$$

Пользуясь номограммой, представленной на рисунке 13.5, получим, что

$$t \approx 158 \text{ °С.}$$

Задачи для самостоятельного решения

- 811.** Определить давление насыщенных паров фракции 82 – 99 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7419$ при 90 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.
- 812.** Определить давление насыщенных паров фракции 99 – 108 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7580$ при 100 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.
- 813.** Определить давление насыщенных паров фракции 108 – 119 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7613$ при 110 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.

814. Определить давление насыщенных паров фракции 119 – 128 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7710$ при 125 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.
815. Определить давление насыщенных паров фракции 128 – 138 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7780$ при 132 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.
816. Определить давление насыщенных паров фракции 138 – 147 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7844$ при 140 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.
817. Определить давление насыщенных паров фракции 147 – 158 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7920$ при 150 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.
818. Определить давление насыщенных паров фракции 60 – 90 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7371$ при 70 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.
819. Определить давление насыщенных паров фракции 90 – 110 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7642$ при 95 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.
820. Определить давление насыщенных паров фракции 110 – 124 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7745$ при 118 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.
821. Определить давление насыщенных паров фракции 124 – 140 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7839$ при 130 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.
822. Определить давление насыщенных паров фракции 140 – 155 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7903$ при 148 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.
823. Определить давление насыщенных паров фракции 155 – 172 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7978$ при 165 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.
824. Определить давление насыщенных паров фракции 92 – 106 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7534$ при 100 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.
825. Определить давление насыщенных паров фракции 106 – 120 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7656$ при 114 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.
826. Определить давление насыщенных паров фракции 120 – 132 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7772$ при 125 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.

827. Определить давление насыщенных паров фракции 132 – 148 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7890$ при 140 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.
828. Определить давление насыщенных паров фракции 148 – 160 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,8000$ при 155 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.
829. Определить давление насыщенных паров фракции 160 – 172 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,8115$ при 170 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.
830. Определить давление насыщенных паров фракции 80 – 90 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7405$ при 88 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.
831. Определить давление насыщенных паров фракции 90 – 107 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7515$ при 105 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.
832. Определить давление насыщенных паров фракции 107 – 122 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7601$ при 115 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.
833. Определить давление насыщенных паров фракции 122 – 134 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7705$ при 130 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.
834. Определить давление насыщенных паров фракции 134 – 146 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7784$ при 145 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.
835. Определить давление насыщенных паров фракции 146 – 157 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7859$ при 152 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.
836. Определить давление насыщенных паров фракции 90 – 104 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7443$ при 100 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.
837. Определить давление насыщенных паров фракции 104 – 116 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7521$ при 110 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.
838. Определить давление насыщенных паров фракции 116 – 127 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7571$ при 120 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.
839. Определить давление насыщенных паров фракции 127 – 137 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7644$ при 135 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.

- 840.** Определить давление насыщенных паров фракции 137 – 148 °С, имеющей относительную плотность $d_4^{20} = 0,7794$ при 145 °С. Задачу решить всеми возможными способами и сравнить результаты.
- 841.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения 55 °С. Какова температура кипения этой фракции при давлении 2,7 кгс/см². При каком давлении температура кипения фракции будет равна 22 °С? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 842.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения 78 °С. Какова температура кипения этой фракции при давлении 37200 кгс/м². При каком давлении температура кипения фракции будет равна 50 °С? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 843.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения 109 °С. Какова температура кипения этой фракции при давлении 1000 мм рт. ст. При каком давлении температура кипения фракции будет равна 47 °С? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 844.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения 61 °С. Какова температура кипения этой фракции при давлении 3,5 ат. При каком давлении температура кипения фракции будет равна 30 °С? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 845.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения 66 °С. Какова температура кипения этой фракции при давлении 4,1 кгс/см². При каком давлении температура кипения фракции будет равна 41 °С? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 846.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения 112 °С. Какова температура кипения этой фракции при давлении 28000 кгс/м². При каком давлении температура кипения фракции будет равна 80 °С? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 847.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения 123 °С. Какова температура кипения этой фракции при давлении 1550 мм рт. ст. При каком давлении температура кипения фракции будет равна 75 °С? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 848.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения 136 °С. Какова температура кипения этой фракции при давлении 2,25 ат. При каком давлении температура кипения фракции будет равна 60 °С? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 849.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения 150 °С. Какова температура кипения этой фракции при

- давлении $1,7 \text{ кгс/см}^2$. При каком давлении температура кипения фракции будет равна $90 \text{ }^\circ\text{C}$? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 850.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения $164 \text{ }^\circ\text{C}$. Какова температура кипения этой фракции при давлении 19000 кгс/м^2 . При каком давлении температура кипения фракции будет равна $78 \text{ }^\circ\text{C}$? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 851.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения $179 \text{ }^\circ\text{C}$. Какова температура кипения этой фракции при давлении 1700 мм рт. ст. . При каком давлении температура кипения фракции будет равна $125 \text{ }^\circ\text{C}$? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 852.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения $198 \text{ }^\circ\text{C}$. Какова температура кипения этой фракции при давлении $3,1 \text{ ат.}$ При каком давлении температура кипения фракции будет равна $150 \text{ }^\circ\text{C}$? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 853.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения $219 \text{ }^\circ\text{C}$. Какова температура кипения этой фракции при давлении $2,8 \text{ кгс/см}^2$. При каком давлении температура кипения фракции будет равна $160 \text{ }^\circ\text{C}$? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 854.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения $85 \text{ }^\circ\text{C}$. Какова температура кипения этой фракции при давлении 34000 кгс/м^2 . При каком давлении температура кипения фракции будет равна $25 \text{ }^\circ\text{C}$? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 855.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения $93 \text{ }^\circ\text{C}$. Какова температура кипения этой фракции при давлении 1750 мм рт. ст. При каком давлении температура кипения фракции будет равна $45 \text{ }^\circ\text{C}$? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 856.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения $103 \text{ }^\circ\text{C}$. Какова температура кипения этой фракции при давлении $2,9 \text{ ат.}$ При каком давлении температура кипения фракции будет равна $65 \text{ }^\circ\text{C}$? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 857.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения $113 \text{ }^\circ\text{C}$. Какова температура кипения этой фракции при давлении $2,9 \text{ кгс/см}^2$. При каком давлении температура кипения фракции будет равна $70 \text{ }^\circ\text{C}$? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 858.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения $122 \text{ }^\circ\text{C}$. Какова температура кипения этой фракции при

- давлении 24000 кгс/м^2 . При каком давлении температура кипения фракции будет равна $100 \text{ }^\circ\text{C}$? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 859.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения $130 \text{ }^\circ\text{C}$. Какова температура кипения этой фракции при давлении 1150 мм рт. ст. При каком давлении температура кипения фракции будет равна $115 \text{ }^\circ\text{C}$? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 860.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения $141 \text{ }^\circ\text{C}$. Какова температура кипения этой фракции при давлении $3,0 \text{ ат.}$ При каком давлении температура кипения фракции будет равна $100 \text{ }^\circ\text{C}$? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 861.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения $149 \text{ }^\circ\text{C}$. Какова температура кипения этой фракции при давлении $4,1 \text{ кгс/см}^2$. При каком давлении температура кипения фракции будет равна $90 \text{ }^\circ\text{C}$? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 862.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения $158 \text{ }^\circ\text{C}$. Какова температура кипения этой фракции при давлении 29700 кгс/м^2 . При каком давлении температура кипения фракции будет равна $115 \text{ }^\circ\text{C}$? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 863.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения $169 \text{ }^\circ\text{C}$. Какова температура кипения этой фракции при давлении 1200 мм рт. ст. При каком давлении температура кипения фракции будет равна $120 \text{ }^\circ\text{C}$? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 864.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения $180 \text{ }^\circ\text{C}$. Какова температура кипения этой фракции при давлении $2,9 \text{ ат.}$ При каком давлении температура кипения фракции будет равна $130 \text{ }^\circ\text{C}$? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 865.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения $195 \text{ }^\circ\text{C}$. Какова температура кипения этой фракции при давлении $2,65 \text{ кгс/см}^2$. При каком давлении температура кипения фракции будет равна $125 \text{ }^\circ\text{C}$? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 866.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения $214 \text{ }^\circ\text{C}$. Какова температура кипения этой фракции при давлении 19000 кгс/м^2 . При каком давлении температура кипения фракции будет равна $140 \text{ }^\circ\text{C}$? Решить задачу графическим и аналитическим способами.

- 867.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения $236\text{ }^{\circ}\text{C}$. Какова температура кипения этой фракции при давлении 950 мм рт. ст. При каком давлении температура кипения фракции будет равна $140\text{ }^{\circ}\text{C}$? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 868.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения $260\text{ }^{\circ}\text{C}$. Какова температура кипения этой фракции при давлении $3,1\text{ ат.}$ При каком давлении температура кипения фракции будет равна $180\text{ }^{\circ}\text{C}$? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 869.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения $236\text{ }^{\circ}\text{C}$. Какова температура кипения этой фракции при давлении $2,3\text{ кгс/см}^2$. При каком давлении температура кипения фракции будет равна $165\text{ }^{\circ}\text{C}$? Решить задачу графическим и аналитическим способами.
- 870.** Узкая нефтяная фракция при атмосферном давлении имеет температуру кипения $128\text{ }^{\circ}\text{C}$. Какова температура кипения этой фракции при давлении 30000 кгс/м^2 . При каком давлении температура кипения фракции будет равна $90\text{ }^{\circ}\text{C}$? Решить задачу графическим и аналитическим способами.

14. Коэффициент активности и фугитивность

Фугитивность (летучесть) – это давление реального газа, свойства которого выражены уравнением состояния идеального газа; размерная величина и измеряется подобно давлению в паскалях.

Коэффициент активности – характеризует степень отклонения системы от идеального состояния и представляет собой отношение фугитивности к давлению

$$\gamma = \frac{f}{P}. \quad (14.1)$$

Известно, что коэффициент активности есть функция приведенных температуры и давления. Такая зависимость приведена на рисунке 14.1.

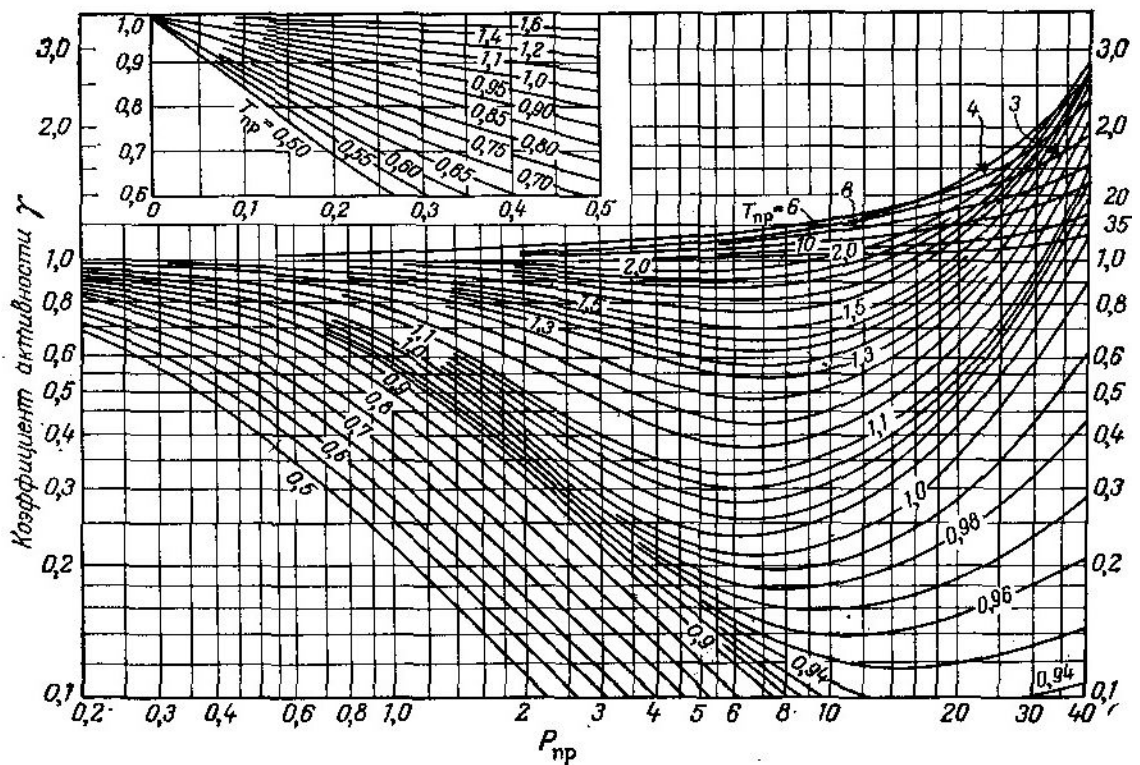


Рисунок 14.1 - График для определения коэффициента активности γ при известных приведенной температуре и давлении

Пример 14.1. Определить фугитивность жидкой нефтяной фракции и её паров при 140 °С и 0,4 МПа, если $t_{cp} = 112$ °С; $t_{кр} = 308$ °С; $P_{кр} = 3,34$ МПа, давление насыщенных паров $P_{II} = 0,183$ МПа.

Решение. Вычислим приведенные параметры для пара:

$$T_{пр} = \frac{T}{T_{кр}} = \frac{140 + 273}{308 + 273} = 0,71,$$

$$P_{пр} = \frac{P}{P_{кр}} = \frac{0,4}{3,34} = 0,12.$$

По графику, изображенному на рисунке 14.1 находим, что при $T_{np} = 0,71$ и $P_{np} = 0,12$:

$$\gamma = 0,88.$$

Тогда фугитивность пара по уравнению (14.1):

$$f^{\text{П}} = \gamma P = 0,88 \cdot 0,4 = 0,352 \text{ МПа.}$$

Приведенное давление для жидкости:

$$P_{np} = \frac{P_{\text{П}}}{P_{кр}} = \frac{0,183}{3,34} = 0,055.$$

По рисунку 14.1 при $T_{np} = 0,71$ и $P_{np} = 0,055$:

$$\gamma = 0,95.$$

Фугитивность жидкости по уравнению (14.1):

$$f^{\text{Ж}} = \gamma P_{\text{П}} = 0,95 \cdot 0,183 = 0,174 \text{ МПа.}$$

Задачи для самостоятельного решения

- 871.** Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 95 – 120 °С и её паров при 115 °С и 2,5 ат, если $t_{кр} = 280$ °С, $P_{кр} = 26$ атм.
- 872.** Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 68 – 102 °С и её паров при 100 °С и 1,75 кгс/см², если $t_{кр} = 260$ °С, $P_{кр} = 29$ атм.
- 873.** Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 102 – 132 °С и её паров при 125 °С и 1000 мм рт. ст., если $t_{кр} = 295$ °С, $P_{кр} = 25,5$ атм.
- 874.** Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 95 – 120 °С и её паров при 117 °С и 2,5 ат, если $t_{кр} = 280$ °С, $P_{кр} = 26$ атм.
- 875.** Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 70 – 90 °С и её паров при 88 °С и 3 ат, если $t_{кр} = 250$ °С, $P_{кр} = 28$ атм.
- 876.** Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 90 – 117 °С и её паров при 115 °С и 2,42 кгс/см², если $t_{кр} = 278$ °С, $P_{кр} = 26,5$ атм.
- 877.** Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 117 – 124 °С и её паров при 120 °С и 925 мм рт. ст., если $t_{кр} = 295$ °С, $P_{кр} = 24,9$ атм.
- 878.** Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 85 – 105 °С и её паров при 103 °С и 1,9 ат, если $t_{кр} = 270$ °С, $P_{кр} = 27$ атм.
- 879.** Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 105 – 120 °С и её паров при 116 °С и 3,05 кгс/см², если $t_{кр} = 287$ °С, $P_{кр} = 25,5$ атм.
- 880.** Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 105 – 140 °С и её паров при 150 °С и 1200 мм рт. ст., если $t_{кр} = 300$ °С, $P_{кр} = 25$ атм.
- 881.** Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 60 – 95 °С и её паров при 100 °С и 2,65 ат, если $t_{кр} = 247$ °С, $P_{кр} = 29$ атм.

882. Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 95 – 122 °С и её паров при 120 °С и 1,8 кгс/см², если $t_{кр} = 280$ °С, $P_{кр} = 25,5$ атм.
883. Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 108 – 140 °С и её паров при 140 °С и 1050 мм рт. ст., если $t_{кр} = 300$ °С, $P_{кр} = 24,9$ атм.
884. Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 79 – 90 °С и её паров при 95 °С и 3,0 ат, если $t_{кр} = 260$ °С, $P_{кр} = 28,5$ атм.
885. Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 90 – 104 °С и её паров при 100 °С и 2,2 кгс/см², если $t_{кр} = 292$ °С, $P_{кр} = 29$ атм.
886. Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 104 – 117 °С и её паров при 115 °С и 950 мм рт. ст., если $t_{кр} = 280$ °С, $P_{кр} = 26$ атм.
887. Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 117 – 129 °С и её паров при 130 °С и 2,95 ат, если $t_{кр} = 300$ °С, $P_{кр} = 24,8$ атм.
888. Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 70 – 88 °С и её паров при 90 °С и 2,4 кгс/см², если $t_{кр} = 250$ °С, $P_{кр} = 29$ атм.
889. Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 88 – 106 °С и её паров при 100 °С и 1000 мм рт. ст., если $t_{кр} = 275$ °С, $P_{кр} = 26,5$ атм.
890. Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 106 – 122 °С и её паров при 120 °С и 2,6 ат, если $t_{кр} = 290$ °С, $P_{кр} = 25,5$ атм.
891. Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 79 – 97 °С и её паров при 90 °С и 1,43 кгс/см², если $t_{кр} = 260$ °С, $P_{кр} = 27$ атм.
892. Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 97 – 115 °С и её паров при 100 °С и 900 мм рт. ст., если $t_{кр} = 278$ °С, $P_{кр} = 26,5$ атм.
893. Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 115 – 130 °С и её паров при 130 °С и 1,9 ат, если $t_{кр} = 300$ °С, $P_{кр} = 25$ атм.
894. Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 79 – 105 °С и её паров при 110 °С и 2,75 кгс/см², если $t_{кр} = 270$ °С, $P_{кр} = 27,5$ атм.
895. Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 105 – 125 °С и её паров при 120 °С и 860 мм рт. ст., если $t_{кр} = 280$ °С, $P_{кр} = 26$ атм.
896. Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 95 – 120 °С и её паров при 120 °С и 2,0 ат, если $t_{кр} = 280$ °С, $P_{кр} = 26$ атм.
897. Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 85 – 120 °С и её паров при 110 °С и 1,66 кгс/см², если $t_{кр} = 275$ °С, $P_{кр} = 27$ атм.
898. Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 62 – 140 °С и её паров при 150 °С и 1450 мм рт. ст., если $t_{кр} = 275$ °С, $P_{кр} = 27$ атм.
899. Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 60 – 105 °С и её паров при 100 °С и 1,87 ат, если $t_{кр} = 250$ °С, $P_{кр} = 28,5$ атм.
900. Определить фугитивности жидкой нефтяной фракции 85 – 105 °С и её паров при 100 °С и 2,0 кгс/см², если $t_{кр} = 273$ °С, $P_{кр} = 27$ атм.

15. Критические параметры

Критическое состояние – состояние вещества, при котором исчезает различие между его жидкой и газообразной фазами. Значения температуры, давления и объема при таком состоянии называются *критическими*.

Критические параметры связаны соотношением

$$\frac{P_{кр} V_{кр}}{T_{кр}} = z_{кр} \cdot \quad (15.1)$$

Критические параметры некоторых веществ указаны в таблице

Критические параметры некоторых веществ

Таблица 15.1

Вещество	$t_{кр}$, °C	$P_{кр}$, атм	$V_{кр}$, мл/моль
Метан CH_4	-82,1	45,8	99,0
Ацетилен C_2H_2	36,0	61,6	113
Этилен C_2H_4	97,0	50,8	124
Этан C_2H_6	32,3	48,2	148
Пропилен C_3H_6	91,8	45,6	181
Пропан C_3H_8	96,8	42,0	200
Бутен-1 C_4H_8	146,4	39,7	240
Бутен-2 C_4H_8	157,0	41,0	236
н-Бутан C_4H_{10}	152,0	36,0	255
Изобутан C_4H_{10}	134,9	36,0	263
Амилен C_5H_{10}	201,3	40,4	-
Циклопентан C_5H_{10}	238,6	44,6	260
н-Пентан C_5H_{12}	198,0	33,3	311
Изопентан C_5H_{12}	187,8	32,9	308
Неопентан C_5H_{12}	160,6	31,57	303
Бензол C_6H_6	288,5	48,6	260
Циклогексан C_6H_{12}	280,0	40,0	308
н-Гексан C_6H_{14}	234,7	29,9	368
Толуол C_7H_8	320,8	41,6	320
н-Гептан C_7H_{16}	267,0	27,0	426
н-Октан C_8H_{18}	296,7	24,6	490
Вода H_2O	374,2	218,5	56

15.1. Критическая температура

Критическая температура чистого вещества – максимальная температура, при которой жидкая и паровая фаза могут существовать в равновесии.

Для нормальных алканов с числом атомов углерода не более 5 критическая температура определяется по уравнению Гульдберга-Гюи

$$T_{кр} = 1,667T_{кин} \quad (15.2)$$

где $T_{кип}$ - нормальная температура кипения.

Для соединений, нормальная температура кипения которых не превышает $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$, имеется уравнение

$$T_{кр} = 1,7T_{кип} - 2. \quad (15.3)$$

Для углеводородов, нормальная температура кипения которых лежит в диапазоне от -38 до $327\text{ }^{\circ}\text{C}$, можно использовать уравнения:

- для алканов и алкенов

$$T_{кр} = 1,027T_{кип} + 159, \quad (15.4)$$

- для аренов и циклоалканов

$$T_{кр} = 1,41T_{кип} + 66 - b(0,383T_{кип} - 93), \quad (15.5)$$

где b - отношение числа атомов углерода, находящихся вне кольца, к общему числу атомов углерода.

Критическую температуру всех углеводородов за исключением ароматических можно найти по уравнению Паркера и Макки

$$T_{кр} = 1,05T_{кип} + 146. \quad (15.6)$$

Для ароматических углеводородов предложено уравнение

$$T_{кр} = T_{кип} + 208. \quad (15.7)$$

Критическую температуру углеводородов и нефтяных фракций вычисляют также по уравнению Итона и Портера

$$T_{кр} = 355 + 0,97a - 0,00049a^2, \quad (15.8)$$

где

$$a = (1,8t_{ср.мол.} + 132)d_{15}^{15}. \quad (15.9)$$

Предложено также уравнение Максвелла

$$\lg(T_{кр} + 150) = 0,634\lg T_{кип} + 1,214. \quad (15.10)$$

Для углеводородов справедливо уравнение Гетеса и Тодоса

$$T_{кр} = 1,47T_{кип}^{1,03}. \quad (15.11)$$

Критическая температура нормальных парафиновых углеводородов определяется по уравнению

$$T_{кр} = 101,83(\lg M)^2 + 101,34\lg M - 343. \quad (15.12)$$

Связь между критической температурой и поверхностным натяжением имеет вид

$$21,2(T_{кр} - 6 - T) = \sigma_T \left(\frac{M}{\rho_T} \right)^{2/3}, \quad (15.13)$$

где σ_T и ρ_T - поверхностное натяжение и плотность при температуре T .

Критическая температура смеси углеводородов определяется по уравнению Страуса

$$T_{кр} = \sum_{i=1}^n x_i T_{кр i} \quad (15.14)$$

Приближенно критические температуры нефтяных фракций и газов можно найти по графикам, представленным на рисунках 15.1 и 15.2.

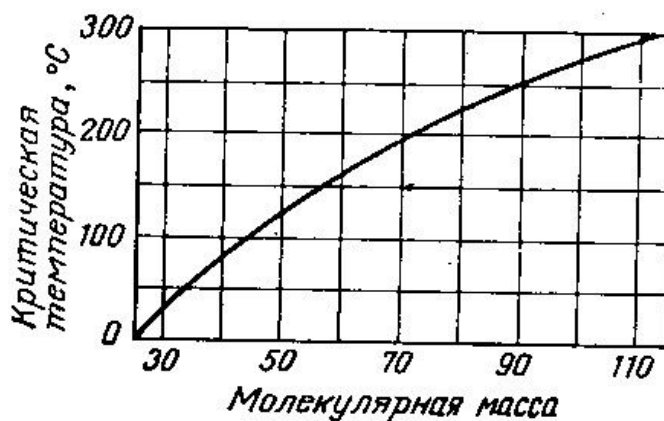


Рисунок 15.1 – График для определения критической температуры газов

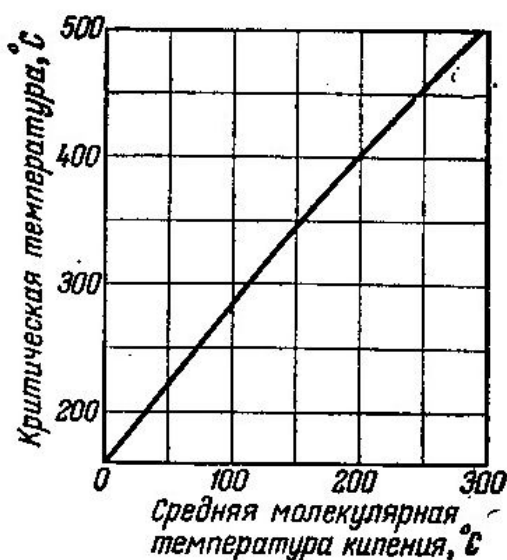


Рисунок 15.2 – График для определения критической температуры нефтяных фракций

15.2. Критическое давление

Критическое давление – давление, при котором вещество ещё может находиться в жидкой фазе при критической температуре; давление насыщенного пара при критической температуре.

Критическое давление (P_a) рассчитывается по уравнению Льюиса

$$P_{кр} = K \frac{10^5 T_{кр}}{M}, \quad (15.15)$$

где K - коэффициент, принимаемый по таблице 15.2, а для нефтяных фракций – вычисляемый по формуле

$$K = 5,53 + 0,855 \frac{t_{70} - t_{10}}{60}, \quad (15.16)$$

где t_{70} , t_{10} - температуры 70 и 10 % отгона по кривой ИТК, °С.

Значение константы K в уравнении Льюиса

Таблица 15.2

Углеводород или нефтепродукт	K	Углеводород или нефтепродукт	K
н-Алканы (C_4 и тяжелее)	5,06	Арены	6,5 – 7,0
изо-Алканы	5,1 – 5,3	Арены без боковых цепей	6,22
Циклоалканы	6,0	Нефтепродукты прямой перегонки	6,3 – 6,4

Критическое давление нормальных алканов можно найти по уравнению Теличеева и Татевского

$$P_{кр} = 10^6 (7,022 - 0,008 T_{кр}). \quad (15.17)$$

Критическое давление углеводородов $C_2 - C_5$ достаточно точно рассчитывается по уравнению Фроста

$$P_{кр} = 10^5 [49,2 - (T_{кр} - 300) \cdot 0,095]. \quad (15.18)$$

Графическая зависимость между молекулярной массой газа и его критическим давлением приведено на рисунке 15.3.

Критическую температуру и давление нефтяных фракций можно определить по графику, изображенному на рисунке 15.4.

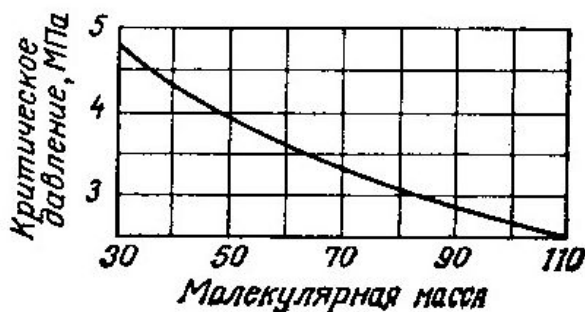


Рисунок 15.3 – График для определения критического давления газов

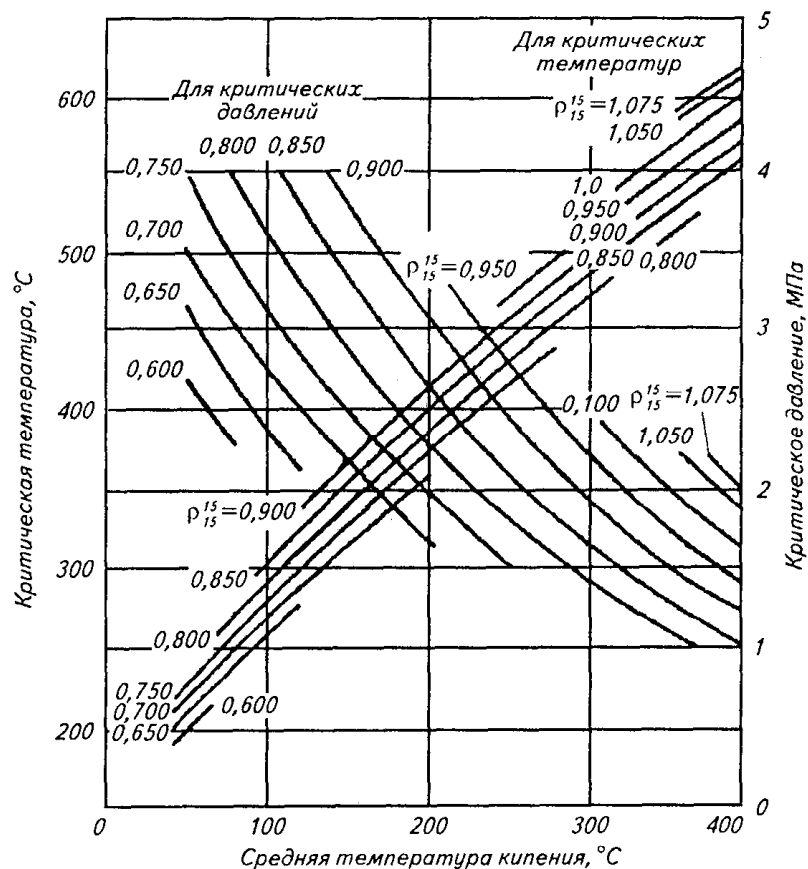


Рисунок 15.4 – График для определения критических температур и давлений нефтепродуктов разной плотности

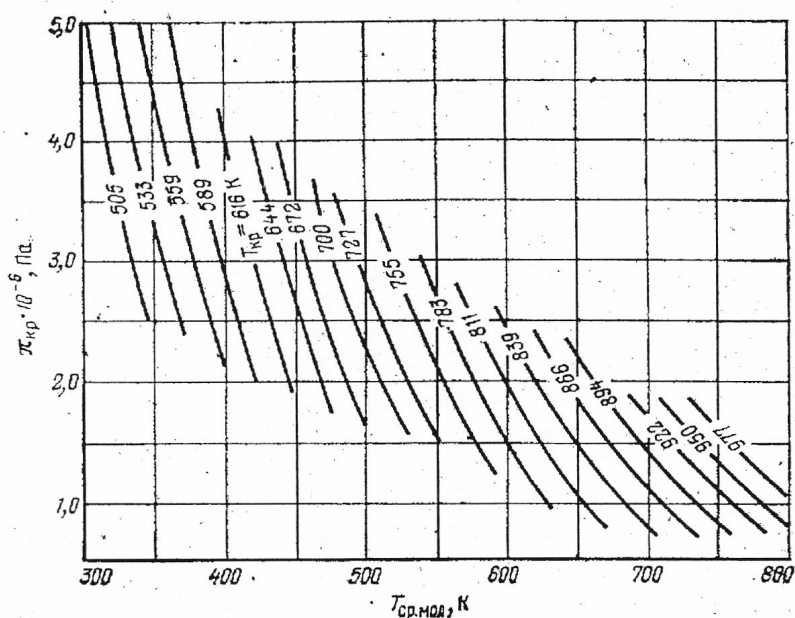


Рисунок 15.5 – Зависимость критического давления нефтяных фракций от средней молярной температуры кипения и критической температуры

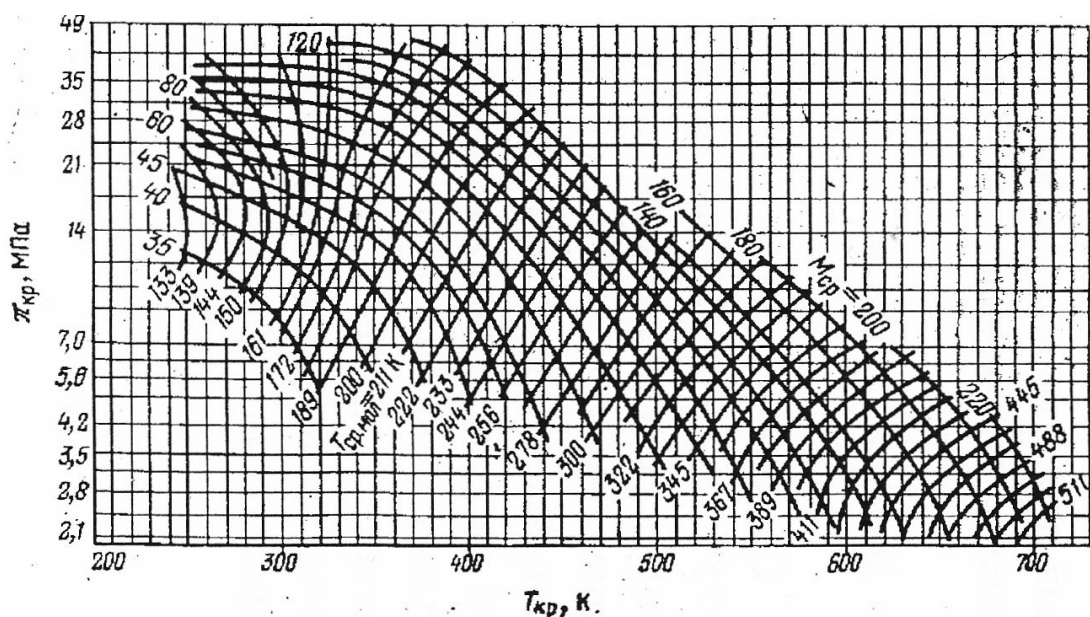


Рисунок 15.6 – Зависимость критических констант от средней мольной температуры кипения и средней молекулярной массы нефтяной фракции

15.3. Критический объем

Критический объем – объем, который занимает вещество при критических давлении и температуре.

Критический объем вещества ($\text{м}^3/\text{кмоль}$) зависит от его критической температуры и давления

$$V_{кр} = 10^{-3} \left(\frac{208T_{кр}}{P_{кр}} + 8 \right). \quad (15.19)$$

Для нормальных парафиновых углеводородов существует зависимость критического объема от молекулярной массы

$$V_{кр} = 0,0043M.$$

15.4. Псевдокритические параметры

Понятие о псевдокритических параметрах (температуре, давлении, объеме) введено для того, чтобы получить возможность применять для смесей данные о сжимаемости индивидуальных углеводородов.

Псевдокритические параметры предложены для определения приведенных величин смесей с тем, чтобы соответствующие значения приведенных величин чистых компонентов могли быть использованы для определения свойств смесей.

Псевдокритическая температура смеси есть функция средней мольной температуры кипения, а истинная критическая температура смеси – функция средней массовой температуры кипения.

Псевдокритическая температура нефтяной фракции может быть принята равной критической температуре углеводорода, температура кипения которого равна средней мольной температуре кипения фракции.

Псевдокритическая температура и давление газовых смесей, средняя мольная масса которых от 16 до 26, рассчитываются по формулам

$$T_{пс.кр.} = 5,4M + 105,5, \quad (15.20)$$

$$P_{пс.кр.} = 10^5 (50 - 0,145M). \quad (15.21)$$

Псевдокритическое давление природных газовых смесей определяется по уравнению

$$P_{пс.кр.} = 6895 \cdot 10^5 (710 - 2,07M). \quad (15.22)$$

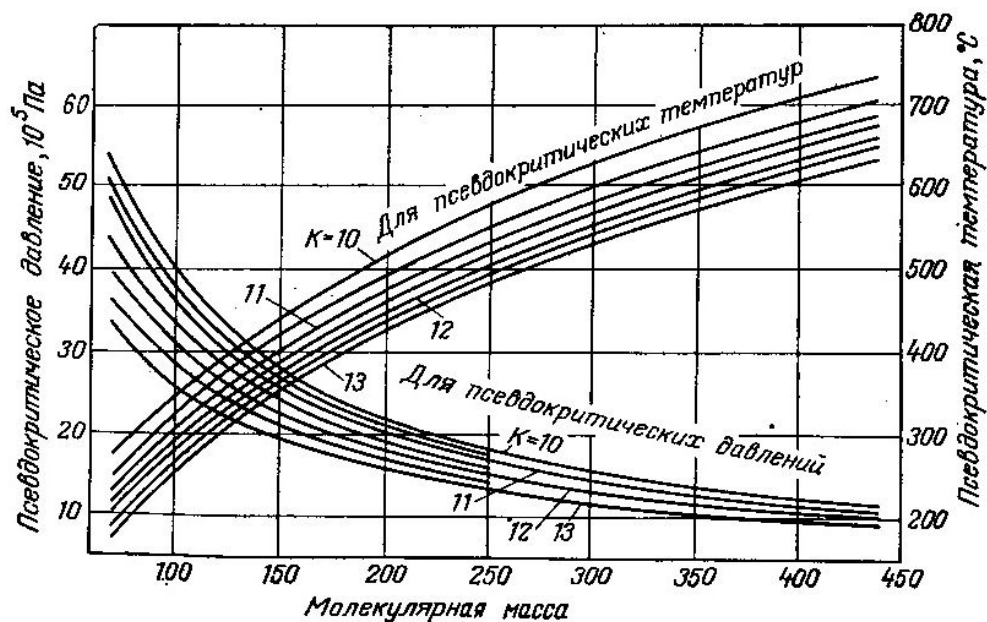


Рисунок 15.7 – График для определения псевдокритических параметров нефтяных фракций с различным характеризующим фактором

15.5. Приведенные параметры

Приведенные параметры вычисляются по формулам

$$T_{пр} = \frac{T}{T_{кр}}, \quad (15.23)$$

$$P_{пр} = \frac{P}{P_{кр}}. \quad (15.24)$$

Пример 15.1. Определить критическую температуру узкой нефтяной фракции, имеющей $t_{ср.мол.} = 138$ °C и $d_{15}^{15} = 0,8000$.

Решение. Для расчета критической температуры по уравнению Итона и Портера (15.8) вычислим вспомогательную величину по уравнению (15.9):

$$a = (1,8t_{\text{ср.мол.}} + 132)d_{15}^{15} = (1,8 \cdot 138 + 132) \cdot 0,8000 = 304,32.$$

Тогда критическая температура (К):

$$\begin{aligned} T_{\text{кр}} &= 355 + 0,97a - 0,00049a^2 = 355 + 0,97 \cdot 304,32 - 0,00049 \cdot 304,32^2 = \\ &= 604,8 \end{aligned}$$

По уравнению Максвелла (15.10):

$$T_{\text{кр}} = 10^{0,634 \lg T_{\text{кин}} + 1,214} - 150 = 10^{0,634 \lg(138+273) + 1,214} = 593,3 \text{ К.}$$

По графику, представленному на рисунке 15.2:

$$t_{\text{кр}} \approx 331 \text{ }^\circ\text{C.}$$

По графику, представленному на рисунке 15.4:

$$t_{\text{кр}} \approx 325 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Пример 15.2. Для условий Примера 15.1 определить критическое давление.

Решение. Вычислим молекулярную массу фракции по формуле Войнова (2.2):

$$\begin{aligned} M &= 60 + 0,3t_{\text{ср.мол.}} + 0,001t_{\text{ср.мол.}}^2 = \\ &= 60 + 0,3 \cdot 138 + 0,001 \cdot 138^2 = 120 \end{aligned}$$

По уравнению Льюиса (15.15), принимая коэффициент $K = 6,3$ по таблице 15.2:

$$P_{\text{кр}} = K \frac{10^5 T_{\text{кр}}}{M} = 6,3 \cdot \frac{10^5 \cdot 604}{120} = 3,17 \text{ МПа.}$$

Воспользуемся графиком, представленным на рисунке 15.4:

$$P_{\text{кр}} = 3,1 \text{ МПа.}$$

Задачи для самостоятельного решения

- 901.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С мортымьинской нефти Ю-II (см. условие задачи 406), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7473$. Задачу решить всеми возможными способами.
- 902.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С тасбулатской нефти X горизонта (см. условие задачи 402), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7636$. Задачу решить всеми возможными способами.

- 903.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С каратюбинской нефти нижнетриасового горизонта (см. условие задачи 397), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7858$. Задачу решить всеми возможными способами.
- 904.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С тевлинской нефти (см. условие задачи 408), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7552$. Задачу решить всеми возможными способами.
- 905.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С каркатеевской нефти (см. условие задачи 411), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7522$. Задачу решить всеми возможными способами.
- 906.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С газлинской нефти (см. условие задачи 391), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7804$. Задачу решить всеми возможными способами.
- 907.** Определить критические температуру и давление для фракции 70 – 200 °С минчимкинской нефти (см. условие задачи 409), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7418$. Задачу решить всеми возможными способами.
- 908.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С караулбазарской нефти (см. условие задачи 393), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7594$. Задачу решить всеми возможными способами.
- 909.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С кыдыланьинской нефти (см. условие задачи 420), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7967$. Задачу решить всеми возможными способами.
- 910.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С локосовской нефти (см. условие задачи 415), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7396$. Задачу решить всеми возможными способами.
- 911.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С шаимской нефти Ю-II (см. условие задачи 407), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7321$. Задачу решить всеми возможными способами.
- 912.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С шурчинской нефти (см. условие задачи 392), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7735$. Задачу решить всеми возможными способами.
- 913.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С аганской нефти (см. условие задачи 414), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7445$. Задачу решить всеми возможными способами.
- 914.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С карактайской нефти (см. условие задачи 395), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7630$. Задачу решить всеми возможными способами.

- 915.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С одоптинской нефти (см. условие задачи 418), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7793$. Задачу решить всеми возможными способами.
- 916.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С шуртепинской нефти (см. условие задачи 394), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7748$. Задачу решить всеми возможными способами.
- 917.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С некрасовской нефти (см. условие задачи 419), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7657$. Задачу решить всеми возможными способами.
- 918.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С тажигалинской нефти юрского горизонта (см. условие задачи 396), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7810$. Задачу решить всеми возможными способами.
- 919.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С колендинской нефти (см. условие задачи 417), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7960$. Задачу решить всеми возможными способами.
- 920.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С губкинской нефти (см. условие задачи 416), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7395$. Задачу решить всеми возможными способами.
- 921.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С салымской нефти (см. условие задачи 413), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7448$. Задачу решить всеми возможными способами.
- 922.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С тепловской нефти (см. условие задачи 410), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7462$. Задачу решить всеми возможными способами.
- 923.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С южно-балыкской нефти (см. условие задачи 412), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7325$. Задачу решить всеми возможными способами.
- 924.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С жетыбайской нефти II горизонта (см. условие задачи 401), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7337$. Задачу решить всеми возможными способами.
- 925.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С мартышинской нефти апт-неокомского горизонта (см. условие задачи 398), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7934$. Задачу решить всеми возможными способами.
- 926.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С курганбайской нефти (см. условие задачи 405), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7547$. Задачу решить всеми возможными способами.

- 927.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С дунгинской нижнемеловой нефти (см. условие задачи 400), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7349$. Задачу решить всеми возможными способами.
- 928.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С узеньской нефти XV горизонта (см. условие задачи 404), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7405$. Задачу решить всеми возможными способами.
- 929.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С камышитовой нефти среднеюрского горизонта (см. условие задачи 399), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7623$. Задачу решить всеми возможными способами.
- 930.** Определить критические температуру и давление для фракции 28 – 200 °С восточножетыбайской нефти (см. условие задачи 403), имеющей плотность $d_4^{20} = 0,7487$. Задачу решить всеми возможными способами.

16. Коэффициент сжимаемости

Коэффициент (фактор) сжимаемости учитывает отклонение реального газа от уравнения состояния идеального газа и является функцией температуры и давления, или приведенных температуры и давления, а для смесей – функцию псевдоприведенных температуры и давления.

Коэффициент сжимаемости индивидуальных углеводородов, обладающих относительно высокими значениями молярных масс, при приведенной температуре не более $T_{np} = 1,5$ и малых значениях P_{np} рассчитывается по уравнению

$$z = 1 - (0,73T_{np} - 0,18)P_{np}, \quad (16.1)$$

а при относительно больших значениях P_{np}

$$z = 1 - (0,24 - 0,14T_{np})(8 - P_{np}). \quad (16.2)$$

При точных расчетах величину фактора сжимаемости определяют по формуле

$$z = 1 + \frac{P_{np}}{T_{np}} \left(0,144 + 0,073\omega - \frac{0,33 - 0,46\omega}{T_{np}} - \frac{0,138 + 0,5\omega}{T_{np}^2} - \frac{0,012 + 0,097\omega}{T_{np}^3} - \frac{0,0073\omega}{T_{np}^8} \right) \quad (16.3)$$

где ω - ацентрический фактор, вычисляемый по уравнениям

$$\omega = \frac{3}{7} \left(\frac{\lg P_{кр} - 5}{\frac{T_{кр}}{T_{кин}} - 1} \right) - 1, \quad (16.4)$$

$$\omega = 0,1745 - 0,0838T_{np}. \quad (16.5)$$

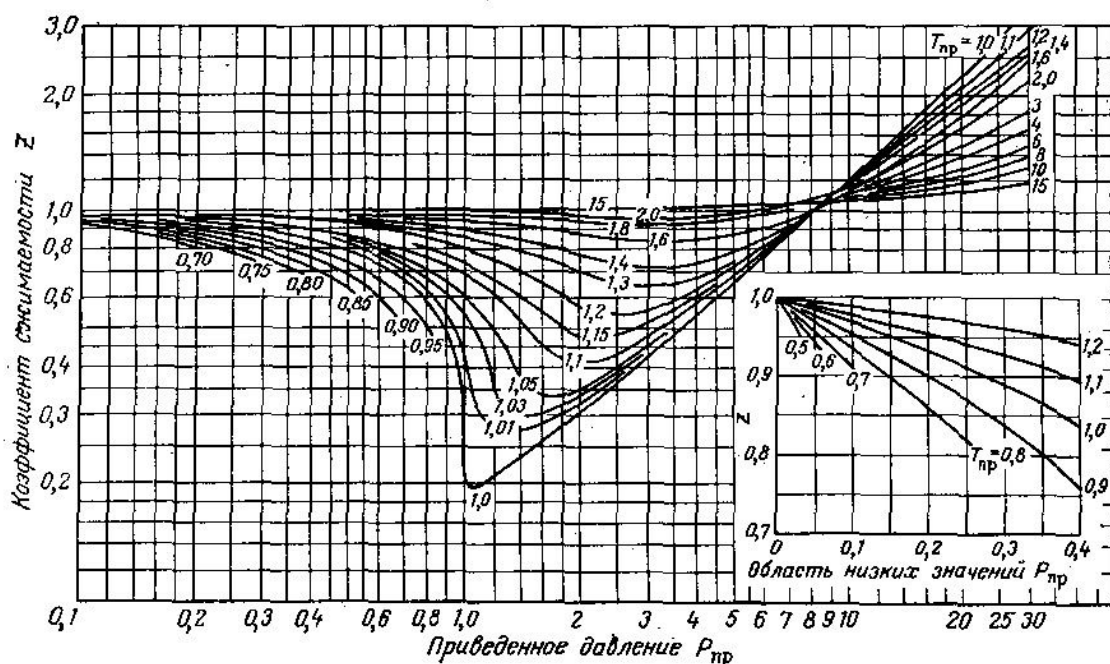


Рисунок 16.1 – График для определения коэффициента сжимаемости z

17. Константы фазового равновесия

Для расчета процессов нефте- и газопереработки необходимы сведения о состоянии равновесия между сосуществующими паровой (газовой) и жидкой фазами.

Равновесное состояние – такое сосуществование равновесных паровой и жидкой фаз, при котором не происходит никаких видимых изменений качественного или количественного характера.

В равновесной системе жидкость – пар комбинированное уравнение Дальтона-Рауля имеет вид

$$k_i = \frac{y'_i}{x'_i} = \frac{p_i}{P}, \quad (17.1)$$

где k_i - константа фазового равновесия;

y'_i и x'_i - мольные доли компонента в паровой и жидкой фазах;

p_i - давление насыщенных паров компонента, Па;

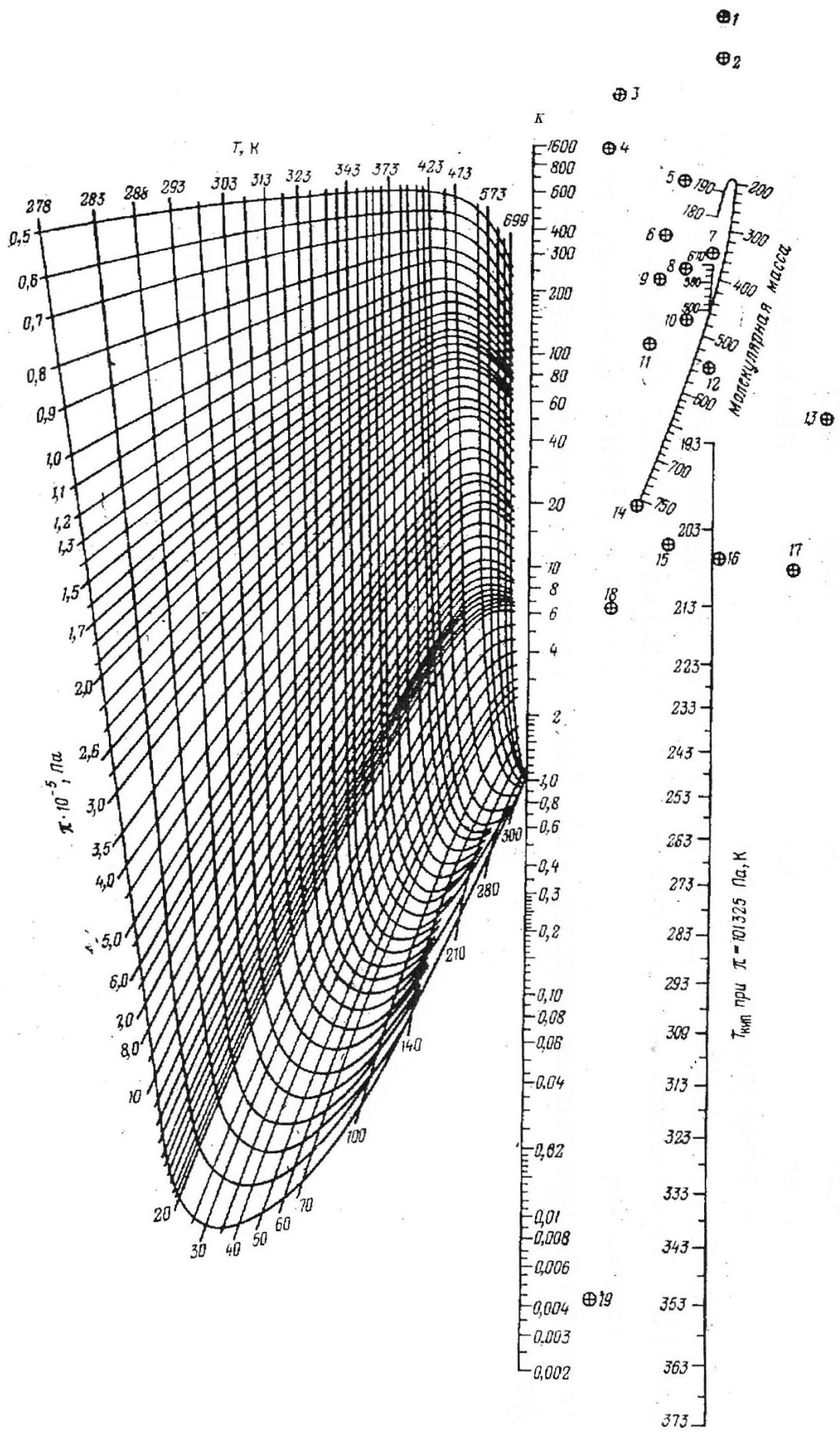
P - общее давление в системе, Па.

Уравнение адекватно для идеальных систем, но также может быть в приближении использовано и для расчета реальных систем близкокипящих гомологов при давлении до 0,3 МПа.

Более точные результаты дает уравнение Льюиса и Ренделла, но применимо оно для систем с давлением до 2 МПа

$$k_i = \frac{f_i^{\text{ж}}}{f_i^{\text{п}}}, \quad (17.2)$$

где $f_i^{\text{ж}}$ и $f_i^{\text{п}}$ - фугитивности жидкости и пара; Па.



1 – водород в лигроине; 2 – азот; 3 – водород в бензоле; 4 – водород в толуоле; 5 – окись углерода в декане; 6 – метан в бензоле; 7 – метан в углеводородах $C_7 - C_{12}$; 8 – метан в риформате; 9 – метан в толуоле; 10 – метан в легких углеводородах (отложена плотность в $кг/м^3$ при 293 K); 11 – метан в циклогексане; 12 – углекислый газ в природном газе и конденсате; 13 - водяной пар в бензине и керосине; 14 – метан в нефти; 15 – сероводород в бензине; 16 – сероводород в природном газе; 17 – пропан в бензоле; 18 - сероводород в газойле; 19 – толуол в метане

Рисунок 17.1 – Номограмма Уинна для определения констант фазового равновесия при повышенных температурах в зависимости от давления и нормальной температуры кипения соединения

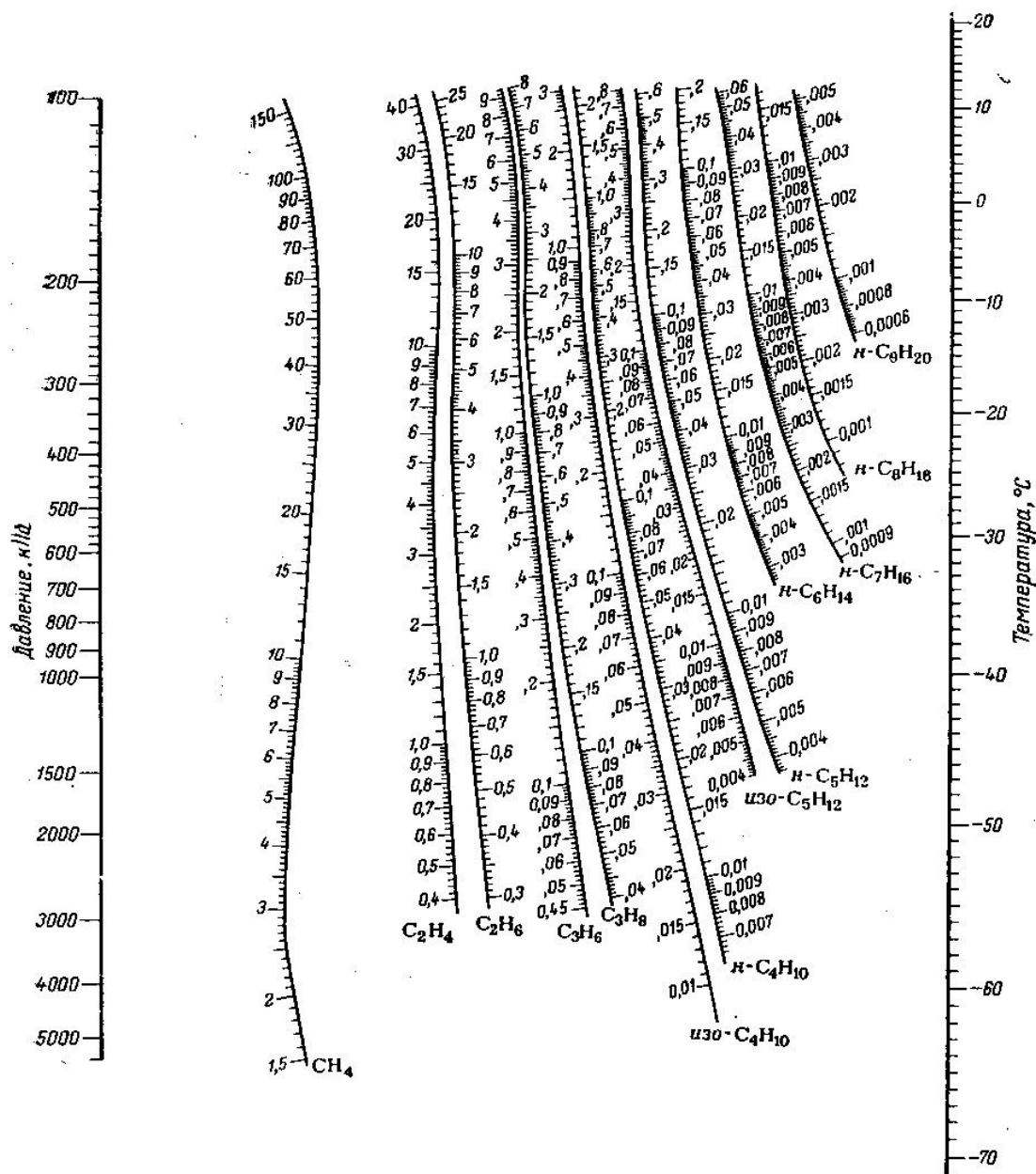


Рисунок 17.2 – Номограмма для определения констант фазового равновесия углеводородов при низких температурах

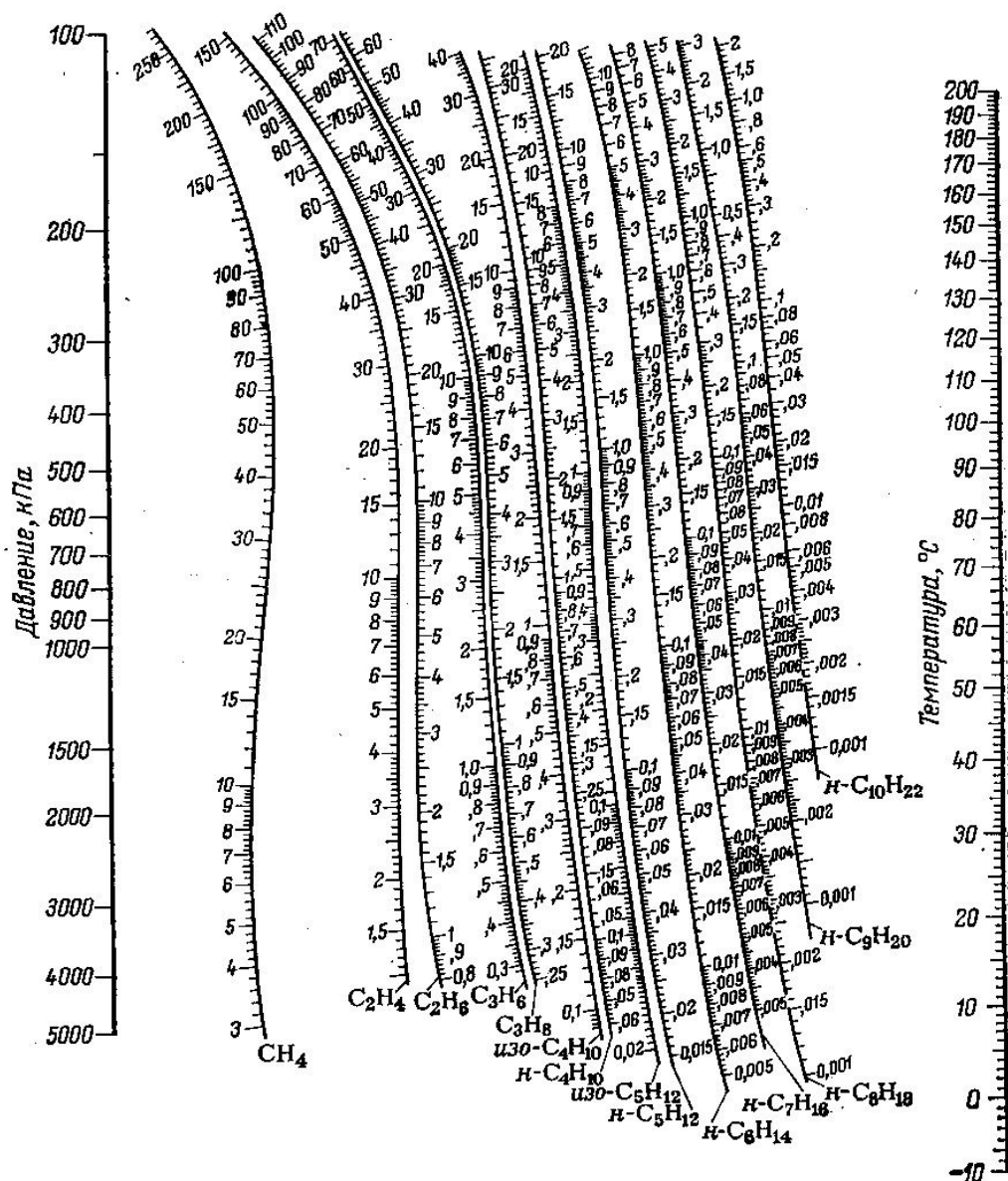


Рисунок 17.3 – Номограмма для определения констант фазового равновесия углеводородов при высоких температурах

Пример 17.1. Определить константу фазового равновесия для Примера 14.1 по уравнениям для идеальной и реальной систем.

Решение. Константа фазового равновесия для идеальной системы вычисляется по уравнению (17.1), используя давление насыщенных паров и общее давление в системе:

$$k = \frac{P_n}{P} = \frac{0,183}{0,4} = 0,46.$$

Константа фазового равновесия для реальной системы рассчитывается по уравнению Льюиса и Ренделла (17.2):

$$k = \frac{f^{\text{ж}}}{f^{\text{л}}} = \frac{0,174}{0,352} = 0,49.$$

Задачи для самостоятельного решения

931. Определить константу фазового равновесия метана при 180 °С и 1,0 МПа.
932. Определить константу фазового равновесия этилена при 50 °С и 4,0 кгс/см².
933. Определить константу фазового равновесия этана при 120 °С и 61900 кгс/м².
934. Определить константу фазового равновесия пропилена при 100 °С и 3800 мм рт. ст.
935. Определить константу фазового равновесия пропана при 90 °С и 7,0 атм.
936. Определить константу фазового равновесия изобутана при -20 °С и 0,2 МПа.
937. Определить константу фазового равновесия н-бутана при 50 °С и 9,3 кгс/см².
938. Определить константу фазового равновесия изопентана при 110 °С и 31000 кгс/м².
939. Определить константу фазового равновесия н-пентана при 130 °С и 2100 мм рт. ст.
940. Определить константу фазового равновесия н-гексана при 150 °С и 4,1 атм.
941. Определить константу фазового равновесия н-гептана при 130 °С и 0,63 МПа.
942. Определить константу фазового равновесия н-нонана при 100 °С и 2,0 кгс/см².
943. Определить константу фазового равновесия н-декана при 140 °С и 25000 кгс/м².
944. Определить константу фазового равновесия метана при 70 °С и 4000 мм рт. ст.
945. Определить константу фазового равновесия этилена при 85 °С и 2,35 атм.
946. Определить константу фазового равновесия этана при 170 °С и 1,4 МПа.
947. Определить константу фазового равновесия пропилена при 90 °С и 1,8 кгс/см².
948. Определить константу фазового равновесия пропана при 120 °С и 29200 кгс/м².
949. Определить константу фазового равновесия изобутана при 65 °С и 1050 мм рт. ст.

950. Определить константу фазового равновесия н-бутана при 100 °С и 5,1 атм.
951. Определить константу фазового равновесия изопентана при 90 °С и 0,7 МПа.
952. Определить константу фазового равновесия н-пентана при 115 °С и 4,2 кгс/см².
953. Определить константу фазового равновесия н-гексана при 200 °С и 26500 кгс/м².
954. Определить константу фазового равновесия н-гептана при 180 °С и 950 мм рт. ст.
955. Определить константу фазового равновесия н-нонана при 150 °С и 4,0 атм.
956. Определить константу фазового равновесия н-декана при 190 °С и 0,35 МПа.
957. Определить константу фазового равновесия метана при 25 °С и 2,2 кгс/см².
958. Определить константу фазового равновесия этилена при 100 °С и 42000 кгс/м².
959. Определить константу фазового равновесия этана при 100 °С и 1000 мм рт. ст.
960. Определить константу фазового равновесия пропилена при 150 °С и 4,9 атм.
961. Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 60 – 70 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7049$ при 120 °С и 3,5 атм и определить её значение по номограмме.
962. Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 70 – 80 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7264$ при 140 °С и 0,7 МПа и определить её значение по номограмме.
963. Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 80 – 85 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7309$ при 135 °С и 900 мм рт. ст и определить её значение по номограмме.
964. Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 85 – 90 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7311$ при 130 °С и 2,2 атм и определить её значение по номограмме.
965. Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 90 – 100 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7049$ при 120 °С и 0,26 МПа и определить её значение по номограмме.
966. Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 100 – 105 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7475$ при 140 °С и 1000 мм рт. ст. и определить её значение по номограмме.
967. Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 105 – 110 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7481$ при 150 °С и 4 кгс/см² и определить её значение по номограмме.

- 968.** Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 110 – 120 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7444$ при 150 °С и 0,5 МПа и определить её значение по номограмме.
- 969.** Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 120 – 130 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7525$ при 160 °С и 3,15 атм и определить её значение по номограмме.
- 970.** Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 130 – 140 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7647$ при 170 °С и 950 мм рт. ст. и определить её значение по номограмме.
- 971.** Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 70 – 90 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7150$ при 120 °С и 3,1 кгс/см² и определить её значение по номограмме.
- 972.** Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 90 – 117 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7440$ при 150 °С и 0,27 МПа и определить её значение по номограмме.
- 973.** Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 117 – 124 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7660$ при 160 °С и 2,8 атм и определить её значение по номограмме.
- 974.** Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 70 – 88 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7330$ при 110 °С и 800 мм рт. ст. и определить её значение по номограмме.
- 975.** Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 88 – 100 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7500$ при 120 °С и 3,0 кгс/см² и определить её значение по номограмме.
- 976.** Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 100 – 112 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7612$ при 150 °С и 0,25 МПа и определить её значение по номограмме.
- 977.** Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 112 – 128 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7700$ при 160 °С и 3,15 атм и определить её значение по номограмме.
- 978.** Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 60 – 95 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7206$ при 110 °С и 925 мм рт. ст. и определить её значение по номограмме.
- 979.** Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 95 – 122 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7500$ при 145 °С и 2,6 кгс/см² и определить её значение по номограмме.
- 980.** Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 50 – 64 °С плотностью $d_4^{20} = 0,6582$ при 90 °С и 0,32 МПа и определить её значение по номограмме.

- 981.** Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 64 – 79 °С плотностью $d_4^{20} = 0,6925$ при 100 °С и 3,0 атм и определить её значение по номограмме.
- 982.** Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 79 – 90 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7182$ при 110 °С и 830 мм рт. ст. и определить её значение по номограмме.
- 983.** Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 90 – 104 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7240$ при 120 °С и 1,9 кгс/см² и определить её значение по номограмме.
- 984.** Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 104 – 117 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7330$ при 140 °С и 0,25 МПа и определить её значение по номограмме.
- 985.** Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 117 – 129 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7400$ при 150 °С и 1,85 атм и определить её значение по номограмме.
- 986.** Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 70 – 88 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7262$ при 110 °С и 1000 мм рт. ст. и определить её значение по номограмме.
- 987.** Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 88 – 106 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7322$ при 130 °С и 2,0 кгс/см² и определить её значение по номограмме.
- 988.** Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 106 – 122 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7473$ при 160 °С и 0,19 МПа и определить её значение по номограмме.
- 989.** Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 122 – 140 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7622$ при 170 °С и 2,6 атм и определить её значение по номограмме.
- 990.** Рассчитать константу фазового равновесия узкой нефтяной фракции 97 – 115 °С плотностью $d_4^{20} = 0,7435$ при 130 °С и 980 мм рт. ст. и определить её значение по номограмме.

Библиографический список

- 1 **Сарданашвили, А. Г.** Примеры и задачи по технологии переработки нефти и газа / А. Г. Сарданашвили, А. И. Львова. – М. : Химия, 1980. – 272 с.
- 2 Расчеты основных процессов и аппаратов нефтепереработки: Справочник / Г. Г. Рабинович [и др.]. – М. : Химия, 1979. – 568 с.
- 3 **Бретшнайдер, С.** Свойства газов и жидкостей / С. Бретшнайдер ; пер. с польск. А. В. Плисса ; под ред. П. Г. Романкова. – М. : Химия, 1966. – 535 с.
- 4 **Рид, Р** Свойства газов и жидкостей. Определение и корреляция / Р. Рид, Т. Шервуд ; пер. с англ. Б. И. Соколова ; под ред. Б. И. Соколова. – Л. : Химия, 1982. – 592 с.
- 5 **Чернышев, А. К.** Сборник номограмм для химико-технологических расчетов / А. К. Чернышев, К. Л. Поплавский, Н. Д. Заичко. – Л. : Химия, 1969. – 225 с.
- 6 **Дубовкин, Н. Ф.** Справочник по теплофизическим свойствам углеводородных топлив и их продуктам сгорания / Н. Ф. Дубовкин. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1962. – 288 с.
- 7 **Maxwell, J. В.** Data book on hydrocarbons / J. В. Maxwell. – Van Norstrand. – New York – Toronto – London, 1958 – 259 p.
- 8 **Григорьев, Б. А.** Теплофизические свойства нефти, нефтепродуктов, газовых конденсатов и их фракций / Б. А. Григорьев, Г. Ф. Богатов, А. А. Герасимов. – М. : Изд-во МЭИ, 1999. – 372 с.
- 9 Справочник химика : в 7 т. / Под ред. Б. П. Никольского. – М.-Л. : Химия, 1966.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Соотношения единиц международной системы с единицами других систем

Таблица П.1

Величины	в различных системах	в СИ	Коэффициент для пересчета
	1	2	
Вес (сила тяжести)	<i>кгс</i> <i>дин</i>	<i>Н</i>	$1 \text{ кгс} = 9,81 \text{ Н}$ $1 \text{ дин} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$
Коэффициент вязкости динамический	$\text{кгс} \cdot \text{с} / \text{м}^2$ $\text{кг} / (\text{м} \cdot \text{с})$ <i>пз</i> <i>спз</i>	<i>Па·с</i>	$1 \text{ кгс} \cdot \text{с} / \text{м}^2 = 9,81 \text{ Па} \cdot \text{с}$ $1 \text{ кг} / (\text{м} \cdot \text{с}) = 1 \text{ Па} \cdot \text{с}$ $1 \text{ пз} = 0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}$ $1 \text{ спз} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$
Кинематический	<i>Ст</i> <i>сСт</i>	$\text{м}^2 / \text{с}$	$1 \text{ Ст} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 / \text{с}$ $1 \text{ сСт} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$
Давление	$\text{кгс} / \text{см}^2$ (или <i>ат</i>) $\text{кгс} / \text{м}^2$ (или <i>мм вод. ст.</i>) <i>мм рт. ст.</i> $\text{дин} / \text{см}^2$ <i>атм</i>	<i>Па</i>	$1 \text{ кгс} / \text{см}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па}$ $1 \text{ кгс} / \text{м}^2 = 9,81 \text{ Па}$ $1 \text{ мм рт. ст.} = 133,3 \text{ Па}$ $1 \text{ дин} / \text{см}^2 = 0,1 \text{ Па}$ $1 \text{ атм} = 10,1 \cdot 10^4 \text{ Па}$
Поверхностное натяжение	$\text{кгс} / \text{м}$ <i>дин/см</i>	<i>Н/м</i> или <i>Дж/м²</i>	$1 \text{ кгс} / \text{м} = 9,81 \text{ Н} / \text{м}$ $1 \text{ дин} / \text{см} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Н} / \text{м}$
Плотность	$\text{г} / \text{см}^3$ <i>г/л</i>	$\text{кг} / \text{м}^3$	$1 \text{ г} / \text{см}^3 = 1 \cdot 10^3 \text{ кг} / \text{м}^3$ $1 \text{ г} / \text{л} = 1 \text{ кг} / \text{м}^3$
Теплоемкость	<i>ккал/(кг·град)</i> <i>кал/(г·град)</i> <i>ккал/(м³·град)</i> <i>кал/(моль·град)</i>	<i>Дж/(кг·град)</i> <i>Дж/(м³·град)</i> <i>Дж/(моль·град)</i>	$1 \text{ ккал} / (\text{кг} \cdot \text{град}) = 4187 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{град})$ $1 \text{ кал} / (\text{г} \cdot \text{град}) = 4187 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{град})$ $1 \text{ ккал} / (\text{м}^3 \cdot \text{град}) = 4187 \text{ Дж} / (\text{м}^3 \cdot \text{град})$ $1 \text{ кал} / (\text{моль} \cdot \text{град}) = 4,187 \text{ Дж} / (\text{моль} \cdot \text{град})$
Коэффициент теплопроводности	<i>ккал/(м·ч·град)</i> <i>кал/(см·с·град)</i>	<i>Вт/(м·град)</i>	$1 \text{ ккал} / (\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}) = 1,163 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{град})$ $1 \text{ кал} / (\text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{град}) = 4,187 \cdot 10^2 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{град})$

1	2	3	4
Теплота фазового превращения	<i>ккал/кг</i>	<i>Дж/кг</i>	<i>1 ккал/кг = 4187 Дж/кг</i>
Энтальпия	<i>ккал/кг</i>	<i>Дж/кг</i>	<i>1 ккал/кг = 4187 Дж/кг</i>

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Варианты индивидуальных домашних заданий

Номер варианта	Номера задач, относящихся к данному варианту
01	1, 31, 61, 91, 121, 151, 181, 211, 241, 271, 301, 331, 361, 391, 421, 451, 481, 511, 541, 571, 601, 631, 661, 691, 721, 751, 781, 811, 841, 871, 901, 931, 961
02	2, 32, 62, 92, 122, 152, 182, 212, 242, 272, 302, 332, 362, 392, 422, 452, 482, 512, 542, 572, 602, 632, 662, 692, 722, 752, 782, 812, 842, 872, 902, 932, 962
03	3, 33, 63, 93, 123, 153, 183, 213, 243, 273, 303, 333, 363, 393, 423, 453, 483, 513, 543, 573, 603, 633, 663, 693, 723, 753, 783, 813, 843, 873, 903, 933, 963
04	4, 34, 64, 94, 124, 154, 184, 214, 244, 274, 304, 334, 364, 394, 424, 454, 484, 514, 544, 574, 604, 634, 664, 694, 724, 754, 784, 814, 844, 874, 904, 934, 964
05	5, 35, 65, 95, 125, 155, 185, 215, 245, 275, 305, 335, 365, 395, 425, 455, 485, 515, 545, 575, 605, 635, 665, 695, 725, 755, 785, 815, 845, 875, 905, 935, 965
06	6, 36, 66, 96, 126, 156, 186, 216, 246, 276, 306, 336, 366, 396, 426, 456, 486, 516, 546, 576, 606, 636, 666, 696, 726, 756, 786, 816, 846, 876, 906, 936, 966
07	7, 37, 67, 97, 127, 157, 187, 217, 247, 277, 307, 337, 367, 397, 427, 457, 487, 517, 547, 577, 607, 637, 667, 697, 727, 757, 787, 817, 847, 877, 907, 937, 967
08	8, 38, 68, 98, 128, 158, 188, 218, 248, 278, 308, 338, 368, 398, 428, 458, 488, 518, 548, 578, 608, 638, 668, 698, 728, 758, 788, 818, 848, 878, 908, 938, 968
09	9, 39, 69, 99, 129, 159, 189, 219, 249, 279, 309, 339, 369, 399, 429, 459, 489, 519, 549, 579, 609, 639, 669, 699, 729, 759, 789, 819, 849, 879, 909, 939, 969
10	10, 40, 70, 100, 130, 160, 190, 220, 250, 280, 310, 340, 370, 400, 430, 460, 490, 520, 550, 580, 610, 640, 670, 700, 730, 760, 790, 820, 850, 880, 910, 940, 970
11	11, 41, 71, 101, 131, 161, 191, 221, 251, 281, 311, 341, 371, 401, 431, 461, 491, 521, 551, 581, 611, 641, 671, 701, 731, 761, 791, 821, 851, 881, 911, 941, 971
12	12, 42, 72, 102, 132, 162, 192, 222, 252, 282, 312, 342, 372, 402, 432, 462, 492, 522, 552, 582, 612, 642, 672, 702, 732, 762, 792, 822, 852, 882, 912, 942, 972

Номер варианта	Номера задач, относящихся к данному варианту
13	13, 43, 73, 103, 133, 163, 193, 223, 253, 283, 313, 343, 373, 403, 433, 463, 493, 523, 553, 583, 613, 643, 673, 703, 733, 763, 793, 823, 853, 883, 913, 943, 973
14	14, 44, 74, 104, 134, 164, 194, 224, 254, 284, 314, 344, 374, 404, 434, 464, 494, 524, 554, 584, 614, 644, 674, 704, 734, 764, 794, 824, 854, 884, 914, 944, 974
15	15, 45, 75, 105, 135, 165, 195, 225, 255, 285, 315, 345, 375, 405, 435, 465, 495, 525, 555, 585, 615, 645, 675, 705, 735, 765, 795, 825, 855, 885, 915, 945, 975
16	16, 46, 76, 106, 136, 166, 196, 226, 256, 286, 316, 346, 376, 406, 436, 466, 496, 526, 556, 586, 616, 646, 676, 706, 736, 766, 796, 826, 856, 886, 916, 946, 976
17	17, 47, 77, 107, 137, 167, 197, 227, 257, 287, 317, 347, 377, 407, 437, 467, 497, 527, 557, 587, 617, 647, 677, 707, 737, 767, 797, 827, 857, 887, 917, 947, 977
18	18, 48, 78, 108, 138, 168, 198, 228, 258, 288, 318, 348, 378, 408, 438, 468, 498, 528, 558, 588, 618, 648, 678, 708, 738, 768, 798, 828, 858, 888, 918, 948, 978
19	19, 49, 79, 109, 139, 169, 199, 229, 259, 289, 319, 349, 379, 409, 439, 469, 499, 529, 559, 589, 619, 649, 679, 709, 739, 769, 799, 829, 859, 889, 919, 949, 979
20	20, 50, 80, 110, 140, 170, 200, 230, 260, 290, 320, 350, 380, 410, 440, 470, 500, 530, 560, 590, 620, 650, 680, 710, 740, 770, 800, 830, 860, 890, 920, 950, 980
21	21, 51, 81, 111, 141, 171, 201, 231, 261, 291, 321, 351, 381, 411, 441, 471, 501, 531, 561, 591, 621, 651, 681, 711, 741, 771, 801, 831, 861, 891, 921, 951, 981
22	22, 52, 82, 112, 142, 172, 202, 232, 262, 292, 322, 352, 382, 412, 442, 472, 502, 532, 562, 592, 622, 652, 682, 712, 742, 772, 802, 832, 862, 892, 922, 952, 982
23	23, 53, 83, 113, 143, 173, 203, 233, 263, 293, 323, 353, 383, 413, 443, 473, 503, 533, 563, 593, 623, 653, 683, 713, 743, 773, 803, 833, 863, 893, 923, 953, 983
24	24, 54, 84, 114, 144, 174, 204, 234, 264, 294, 324, 354, 384, 414, 444, 474, 504, 534, 564, 594, 624, 654, 684, 714, 744, 774, 804, 834, 864, 894, 924, 954, 984
25	25, 55, 85, 115, 145, 175, 205, 235, 265, 295, 325, 355, 385, 415, 445, 475, 505, 535, 565, 595, 625, 655, 685, 715, 745, 775, 805, 835, 865, 895, 925, 955, 985

Номер варианта	Номера задач, относящихся к данному варианту
26	26, 56, 86, 116, 146, 176, 206, 236, 266, 296, 326, 356, 386, 416, 446, 476, 506, 536, 566, 596, 626, 656, 686, 716, 746, 776, 806, 836, 866, 896, 926, 956, 986
27	27, 57, 87, 117, 147, 177, 207, 237, 267, 297, 327, 357, 387, 417, 447, 477, 507, 537, 567, 597, 627, 657, 687, 717, 747, 777, 807, 837, 867, 897, 927, 957, 987
28	28, 58, 88, 118, 148, 178, 208, 238, 268, 298, 328, 358, 388, 418, 448, 478, 508, 538, 568, 598, 628, 658, 688, 718, 748, 778, 808, 838, 868, 898, 928, 958, 988
29	29, 59, 89, 119, 149, 179, 209, 239, 269, 299, 329, 359, 389, 419, 449, 479, 509, 539, 569, 599, 629, 659, 689, 719, 749, 779, 809, 839, 869, 899, 929, 959, 989
30	30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330, 360, 390, 420, 450, 480, 510, 540, 570, 600, 630, 660, 690, 720, 750, 780, 810, 840, 870, 900, 930, 960, 990
31	2, 33, 64, 95, 126, 157, 188, 219, 250, 281, 312, 343, 374, 405, 436, 467, 498, 529, 560, 591, 622, 653, 684, 715, 746, 777, 808, 839, 843, 874, 903, 934, 965
32	3, 34, 65, 96, 127, 158, 189, 220, 251, 282, 313, 344, 375, 406, 437, 468, 499, 530, 561, 592, 623, 654, 685, 716, 747, 778, 809, 840, 844, 875, 904, 935, 966
33	4, 35, 66, 97, 128, 159, 190, 221, 252, 283, 314, 345, 376, 407, 438, 469, 500, 531, 562, 593, 624, 655, 686, 717, 748, 779, 810, 813, 845, 876, 905, 936, 967
34	5, 36, 67, 98, 129, 160, 191, 222, 253, 284, 315, 346, 377, 408, 439, 470, 501, 532, 563, 594, 625, 656, 687, 718, 749, 780, 809, 814, 846, 877, 906, 937, 968
35	6, 37, 68, 99, 130, 161, 192, 223, 254, 285, 316, 347, 378, 409, 440, 471, 502, 533, 564, 595, 626, 657, 688, 719, 750, 778, 810, 815, 847, 878, 907, 938, 969
36	7, 38, 69, 100, 131, 162, 193, 224, 255, 286, 317, 348, 379, 410, 441, 472, 503, 534, 565, 596, 627, 658, 689, 720, 747, 779, 783, 816, 848, 879, 908, 939, 970
37	8, 39, 70, 101, 132, 163, 194, 225, 256, 287, 318, 349, 380, 411, 442, 473, 504, 535, 566, 597, 628, 659, 690, 716, 748, 780, 784, 817, 849, 880, 909, 940, 971
38	9, 40, 71, 102, 133, 164, 195, 226, 257, 288, 319, 350, 381, 412, 443, 474, 505, 536, 567, 598, 629, 660, 685, 717, 749, 754, 785, 818, 850, 881, 910, 941, 972

Номер варианта	Номера задач, относящихся к данному варианту
39	10, 41, 72, 103, 134, 165, 196, 227, 258, 289, 320, 351, 382, 413, 444, 475, 506, 537, 568, 599, 630, 654, 686, 718, 750, 755, 786, 819, 851, 882, 911, 942, 973
40	11, 42, 73, 104, 135, 166, 197, 228, 259, 290, 321, 352, 383, 414, 445, 476, 507, 538, 569, 600, 623, 655, 687, 719, 724, 756, 787, 820, 852, 883, 912, 943, 974
41	12, 43, 74, 105, 136, 167, 198, 229, 260, 291, 322, 353, 384, 415, 446, 477, 508, 539, 570, 592, 624, 656, 688, 720, 725, 757, 788, 821, 853, 884, 913, 944, 975
42	13, 44, 75, 106, 137, 168, 199, 230, 261, 292, 323, 354, 385, 416, 447, 478, 509, 540, 561, 593, 625, 657, 689, 693, 726, 758, 789, 822, 854, 885, 914, 945, 976
43	14, 45, 76, 107, 138, 169, 200, 231, 262, 293, 324, 355, 386, 417, 448, 479, 510, 530, 562, 594, 626, 658, 690, 694, 727, 759, 790, 823, 855, 886, 915, 946, 977
44	15, 46, 77, 108, 139, 170, 201, 232, 263, 294, 325, 356, 387, 418, 449, 480, 499, 531, 563, 595, 627, 659, 728, 760, 791, 824, 856, 887, 916, 947, 978
45	16, 47, 78, 109, 140, 171, 202, 233, 264, 295, 326, 357, 388, 419, 450, 468, 500, 532, 564, 596, 628, 660, 664, 696, 729, 761, 792, 825, 857, 888, 917, 948, 979
46	17, 48, 79, 110, 141, 172, 203, 234, 265, 296, 327, 358, 389, 420, 437, 469, 501, 533, 565, 597, 629, 633, 665, 697, 730, 762, 793, 826, 858, 889, 918, 949, 980
47	18, 49, 80, 111, 142, 173, 204, 235, 266, 297, 328, 359, 390, 406, 438, 470, 502, 534, 566, 598, 630, 634, 666, 698, 731, 763, 794, 827, 859, 890, 919, 950, 981
48	19, 50, 81, 112, 143, 174, 205, 236, 267, 298, 329, 360, 375, 407, 439, 471, 503, 535, 567, 599, 603, 635, 667, 699, 732, 764, 795, 828, 860, 891, 920, 951, 982
49	20, 51, 82, 113, 144, 175, 206, 237, 268, 299, 330, 334, 376, 408, 440, 472, 504, 536, 568, 600, 604, 636, 668, 700, 733, 765, 796, 829, 861, 892, 921, 952, 983
50	21, 52, 83, 114, 145, 176, 207, 238, 269, 300, 313, 335, 377, 409, 411, 473, 505, 537, 569, 573, 605, 637, 669, 701, 734, 766, 797, 830, 862, 893, 922, 953, 984
51	22, 53, 84, 115, 146, 177, 208, 239, 270, 282, 314, 336, 378, 410, 442, 474, 506, 538, 570, 574, 606, 638, 670, 702, 735, 767, 798, 831, 863, 894, 923, 954, 985

Номер варианта	Номера задач, относящихся к данному варианту
52	23, 54, 85, 116, 147, 178, 209, 240, 251, 283, 315, 337, 379, 411, 443, 475, 507, 539, 543, 575, 607, 639, 671, 703, 736, 768, 799, 832, 864, 895, 924, 955, 986
53	24, 55, 86, 117, 148, 179, 210, 220, 252, 284, 316, 338, 380, 412, 444, 476, 508, 540, 544, 576, 608, 640, 672, 704, 737, 769, 800, 833, 865, 896, 925, 956, 987
54	25, 56, 87, 118, 149, 180, 189, 221, 253, 285, 317, 339, 381, 413, 445, 477, 509, 513, 545, 577, 609, 641, 673, 705, 738, 770, 801, 834, 866, 897, 926, 957, 988
55	26, 57, 88, 119, 150, 158, 190, 222, 254, 286, 318, 340, 382, 414, 446, 478, 510, 514, 546, 578, 610, 642, 674, 706, 739, 771, 802, 835, 867, 898, 927, 958, 989
56	27, 58, 89, 120, 127, 159, 191, 223, 255, 287, 319, 341, 383, 415, 447, 479, 483, 515, 547, 579, 611, 643, 675, 707, 740, 772, 803, 836, 868, 899, 928, 959, 990
57	28, 59, 90, 96, 128, 160, 192, 224, 256, 288, 320, 342, 384, 416, 448, 480, 484, 516, 548, 580, 612, 644, 676, 708, 741, 773, 804, 837, 869, 900, 929, 960, 963
58	29, 60, 65, 97, 129, 161, 193, 225, 257, 289, 321, 343, 385, 417, 449, 452, 485, 517, 549, 581, 613, 645, 677, 709, 742, 774, 805, 838, 870, 872, 930, 932, 964
59	30, 34, 66, 98, 130, 162, 194, 226, 258, 290, 322, 344, 386, 418, 450, 453, 486, 518, 550, 582, 614, 646, 678, 710, 743, 775, 806, 839, 841, 873, 901, 933, 965
60	3, 35, 67, 99, 131, 163, 195, 227, 259, 291, 323, 345, 387, 419, 423, 454, 487, 519, 551, 583, 615, 647, 679, 711, 744, 776, 807, 840, 842, 874, 902, 934, 966
61	4, 36, 68, 100, 132, 164, 196, 228, 260, 292, 324, 346, 388, 420, 424, 455, 488, 520, 552, 584, 616, 648, 680, 712, 745, 777, 808, 812, 843, 875, 903, 935, 967
62	5, 37, 69, 101, 133, 165, 197, 229, 261, 293, 325, 347, 389, 393, 425, 456, 489, 521, 553, 585, 617, 649, 681, 713, 746, 778, 809, 813, 844, 876, 904, 936, 968
63	6, 38, 70, 102, 134, 166, 198, 230, 262, 294, 326, 348, 390, 394, 426, 457, 490, 522, 554, 586, 618, 650, 682, 714, 747, 779, 810, 814, 845, 877, 905, 937, 969
64	7, 39, 71, 103, 135, 167, 199, 231, 263, 295, 327, 349, 362, 395, 427, 458, 491, 523, 555, 587, 619, 651, 683, 715, 748, 780, 781, 815, 846, 878, 906, 938, 970

Номер варианта	Номера задач, относящихся к данному варианту
65	8, 40, 72, 104, 136, 168, 200, 232, 264, 296, 328, 350, 363, 396, 428, 459, 492, 524, 556, 588, 620, 652, 684, 716, 749, 752, 782, 816, 847, 879, 907, 939, 971
66	9, 41, 73, 105, 137, 169, 201, 233, 265, 297, 329, 333, 364, 397, 429, 460, 493, 525, 557, 589, 621, 653, 685, 717, 750, 753, 783, 817, 848, 880, 908, 940, 972
67	10, 42, 74, 106, 138, 170, 202, 234, 266, 298, 330, 334, 365, 398, 430, 461, 494, 526, 558, 590, 622, 654, 686, 718, 721, 754, 784, 818, 849, 881, 909, 941, 973
68	11, 43, 75, 107, 139, 171, 203, 235, 267, 299, 302, 335, 366, 399, 431, 462, 495, 527, 559, 591, 623, 655, 687, 719, 722, 755, 785, 819, 850, 882, 910, 942, 974
69	12, 44, 76, 108, 140, 172, 204, 236, 268, 300, 303, 336, 367, 400, 432, 463, 496, 528, 560, 592, 624, 656, 688, 720, 723, 756, 786, 820, 851, 883, 911, 943, 975
70	13, 45, 77, 109, 141, 173, 205, 237, 269, 276, 304, 337, 368, 401, 433, 464, 497, 529, 561, 593, 625, 657, 689, 693, 724, 757, 787, 821, 852, 884, 912, 944, 976
71	14, 46, 78, 110, 142, 174, 206, 238, 270, 277, 305, 338, 369, 402, 434, 465, 498, 530, 562, 594, 626, 658, 690, 694, 725, 758, 788, 822, 853, 885, 913, 945, 977
72	15, 47, 79, 111, 143, 175, 207, 239, 241, 278, 306, 339, 370, 403, 435, 466, 499, 531, 563, 595, 627, 659, 662, 695, 726, 759, 789, 823, 854, 886, 914, 946, 978
73	16, 48, 80, 112, 144, 176, 208, 240, 242, 279, 307, 340, 371, 404, 436, 467, 500, 532, 564, 596, 628, 660, 663, 696, 727, 760, 790, 824, 855, 887, 915, 947, 979
74	17, 49, 81, 113, 145, 177, 209, 212, 243, 280, 308, 341, 372, 405, 437, 468, 501, 533, 565, 597, 629, 633, 664, 697, 728, 761, 791, 825, 856, 888, 916, 948, 980
75	18, 50, 82, 114, 146, 178, 210, 213, 244, 281, 309, 342, 373, 406, 438, 469, 502, 534, 566, 598, 630, 634, 665, 698, 729, 762, 792, 826, 857, 889, 917, 949, 981
76	19, 51, 83, 115, 147, 179, 184, 214, 245, 282, 310, 343, 374, 407, 439, 470, 503, 535, 567, 599, 604, 635, 666, 699, 730, 763, 793, 827, 858, 890, 918, 950, 982
77	20, 52, 84, 116, 148, 180, 185, 215, 246, 283, 311, 344, 375, 408, 440, 471, 504, 536, 568, 600, 605, 636, 667, 700, 731, 764, 794, 828, 859, 891, 919, 951, 983

Номер варианта	Номера задач, относящихся к данному варианту
78	21, 53, 85, 117, 149, 153, 186, 216, 247, 284, 312, 345, 376, 409, 441, 472, 505, 537, 569, 572, 606, 637, 668, 701, 732, 765, 795, 829, 860, 892, 920, 952, 984
79	22, 54, 86, 118, 150, 154, 187, 217, 248, 285, 313, 346, 377, 410, 442, 473, 506, 538, 570, 573, 607, 638, 669, 702, 733, 766, 796, 830, 861, 893, 921, 953, 985
80	23, 55, 87, 119, 122, 155, 188, 218, 249, 286, 314, 347, 378, 411, 443, 474, 507, 539, 541, 574, 608, 639, 670, 703, 734, 767, 797, 831, 862, 894, 922, 954, 986
81	24, 56, 88, 120, 123, 156, 189, 219, 250, 287, 315, 348, 379, 412, 444, 475, 508, 540, 542, 575, 609, 640, 671, 704, 735, 768, 798, 832, 863, 895, 923, 955, 987
82	25, 57, 89, 91, 124, 157, 190, 220, 251, 288, 316, 349, 380, 413, 445, 476, 509, 512, 543, 576, 610, 641, 672, 705, 736, 769, 799, 833, 864, 896, 924, 956, 988
83	26, 58, 90, 92, 125, 158, 191, 221, 252, 289, 317, 350, 381, 414, 446, 477, 510, 513, 544, 577, 611, 642, 673, 706, 737, 770, 800, 834, 865, 894, 925, 957, 989
84	27, 59, 63, 93, 126, 159, 192, 222, 253, 290, 318, 351, 382, 415, 447, 478, 481, 514, 545, 578, 612, 643, 674, 707, 738, 771, 801, 835, 866, 898, 956, 958, 990
85	28, 60, 64, 94, 127, 160, 193, 223, 254, 291, 319, 352, 383, 416, 448, 479, 482, 515, 546, 579, 613, 644, 675, 708, 739, 772, 802, 836, 867, 899, 927, 959, 966
86	29, 31, 65, 95, 128, 161, 194, 224, 255, 292, 320, 353, 384, 417, 449, 480, 483, 516, 547, 580, 614, 645, 676, 709, 740, 773, 803, 837, 868, 900, 928, 960, 967
87	30, 32, 66, 96, 129, 162, 195, 225, 256, 293, 321, 354, 385, 418, 450, 453, 484, 517, 548, 581, 615, 646, 677, 710, 741, 774, 804, 838, 869, 874, 929, 936, 968
88	4, 33, 67, 97, 130, 163, 196, 226, 257, 294, 322, 355, 386, 419, 422, 454, 485, 518, 549, 582, 616, 647, 678, 711, 742, 775, 805, 839, 870, 875, 930, 937, 969
89	5, 34, 68, 98, 131, 164, 197, 227, 258, 295, 323, 356, 387, 420, 423, 455, 486, 519, 550, 583, 617, 648, 679, 712, 743, 776, 806, 840, 843, 876, 905, 938, 970
90	6, 35, 69, 99, 132, 165, 198, 228, 259, 296, 324, 357, 388, 391, 424, 456, 487, 520, 551, 584, 618, 649, 680, 713, 744, 777, 807, 812, 844, 877, 906, 939, 971

Номер варианта	Номера задач, относящихся к данному варианту
91	7, 36, 70, 100, 133, 166, 199, 229, 260, 297, 325, 358, 389, 392, 425, 457, 488, 521, 552, 585, 619, 650, 681, 714, 745, 778, 808, 813, 845, 878, 907, 940, 972
92	8, 37, 71, 101, 134, 167, 200, 230, 261, 298, 326, 359, 361, 393, 426, 458, 489, 522, 553, 586, 620, 651, 682, 715, 746, 779, 809, 814, 846, 879, 908, 941, 973
93	9, 38, 72, 102, 135, 168, 201, 231, 262, 299, 327, 360, 362, 394, 427, 459, 490, 523, 554, 587, 621, 652, 683, 716, 747, 780, 812, 815, 847, 880, 909, 942, 974
94	10, 39, 73, 103, 136, 169, 202, 232, 263, 300, 328, 331, 363, 395, 428, 460, 491, 524, 555, 588, 622, 653, 684, 717, 748, 755, 781, 816, 848, 881, 910, 943, 975
95	11, 40, 74, 104, 137, 170, 203, 233, 264, 272, 329, 332, 364, 396, 429, 461, 492, 525, 556, 589, 623, 654, 685, 718, 749, 756, 782, 817, 849, 882, 911, 944, 976
96	12, 41, 75, 105, 138, 171, 204, 234, 265, 273, 330, 333, 365, 397, 430, 462, 493, 526, 557, 590, 624, 655, 686, 719, 750, 757, 783, 818, 850, 883, 912, 945, 977
97	13, 42, 76, 106, 139, 172, 205, 235, 266, 274, 301, 334, 366, 398, 431, 463, 494, 527, 558, 591, 625, 656, 687, 720, 722, 758, 784, 819, 851, 884, 913, 946, 978
98	14, 43, 77, 107, 140, 173, 206, 236, 267, 275, 302, 335, 367, 399, 432, 464, 495, 528, 559, 592, 626, 657, 688, 691, 723, 759, 785, 820, 852, 885, 914, 947, 979
99	15, 44, 78, 108, 141, 174, 207, 237, 268, 276, 303, 336, 368, 400, 433, 465, 496, 529, 560, 593, 627, 658, 689, 692, 724, 760, 786, 821, 853, 886, 915, 948, 980
00	16, 45, 79, 109, 142, 175, 208, 238, 269, 277, 304, 337, 369, 401, 434, 466, 497, 530, 561, 594, 628, 659, 690, 693, 725, 761, 787, 822, 854, 887, 916, 949, 981

Учебное издание

Моисеев Андрей Владимирович

РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
УГЛЕВОДОРОДНЫХ СИСТЕМ, НЕФТЕЙ И НЕФТЕПРОДУКТОВ:
ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ

Учебное пособие

Научный редактор

Редактор

Подписано в печать ..2011

Формат 60 × 84 1/16. Бумага 80 г/м². Ризограф FR3950EP-α
Усл. печ. л.. Уч.-изд. л.. Тираж 250. Заказ.

Редакционно-издательский отдел Государственного образовательного
учреждения высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»
681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

Полиграфическая лаборатория Государственного образовательного
учреждения высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет».
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.