

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Невинномысский технологический институт (филиал)

**ИНФОРМАЦИОННОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к практическим занятиям для студентов направления
15.03.02 Технологические машины и оборудование

Невинномысск 2021

Методические указания разработаны в соответствии с требованиями Государственного образовательного стандарта в части содержания и уровня подготовки выпускников направления 15.03.02 Технологические машины и оборудование

Указания содержат рекомендации по проведению практических занятий, изучению отдельных тем дисциплины, примеры расчетов свойств рабочих веществ химической технологии и список рекомендуемой литературы [1-14].

Составитель *доц. А.И. Свидченко*

Рецензент *доц. А.Л. Проскурнин*

Содержание

Занятие 1. Изучение источников поиска справочной информации при проектировании технологического оборудования	4
Занятие 2. Освоение методов выбора аппаратов и машин по результатам проектирования и расчетов	4
Занятие 3. Изучение перечня используемых свойств веществ и их параметров состояния	7
Занятие 4. Физико-химические характеристики рабочих веществ и их смесей	8
Занятие 5. Расчет равновесных свойств рабочих веществ.....	10
Занятие 6. Расчет объемных свойств рабочих веществ.....	14
Занятие 7. Расчет калорических свойств рабочих веществ	18
Занятие 8. Расчет переносных свойств рабочих веществ	22
Литература	31

Занятие 1. Изучение источников поиска справочной информации при проектировании технологического оборудования

Целью занятия является ознакомление с государственными и отраслевыми стандартами, каталогами, техническими условиями на типовое, стандартизованное и серийно выпускаемое химическое оборудование, справочниками и др. литературой как источниками информации.

Необходимо дать понятие о нормативно-технических документах (НТД) как источниках информации о машинах и оборудовании, справочной литературе как источниках информации о свойствах рабочих веществ и материалов химических производств.

Каждый студент знакомится с одним (двумя) каталогами (стандартами) на оборудование и составляет краткое резюме о назначении НТД, его содержании, разновидностях и типоразмерах оборудования.

В качестве источников информации рекомендуется использовать НТД для машин и оборудования химических производств.

Завершая тему занятия следует составить список информационных источников для личного пользования.

Занятие 2. Освоение методов выбора аппаратов и машин по результатам проектирования и расчетов

Целью занятия является освоение методов подбора аппаратов и машин по результатам расчетов с использованием информационных источников; составление описания оборудования по нормативно-техническим документам.

Задача 2.1. По исходным данным, приведенным в таблицах 2.1, 2.2, 2.3:

1. Определить требуемую поверхность теплопередачи теплообменного аппарата.
2. Подобрать стандартный аппарат и их число.
3. Составить характеристику аппарата.
4. Составить эскиз аппарата.

Таблица 2.1 – Исходные данные для подбора трубчатой печи

№ п/п	Тепловая нагрузка Q_p , МВт	Тип топлива*)	№ п/п	Тепловая нагрузка Q_p , МВт	Тип топлива*)
1	9,0	г	7	50	ж
2	20	г	8	0,7	ж
3	34	г	9	3,7	г
4	48	г	10	7,1	ж
5	14	ж	11	16	ж
6	26,5	ж	12	10	ж

*) г – газообразное; ж – жидкое.

Таблица 2.2 – Исходные данные для подбора теплообменного аппарата (ТА)

№ п/п	Назначение аппарата	Тепловая нагрузка, Q , МВт	k , Вт/(м ² К)	Δt_{cp} , К	Рекомендуемый тип
1	Паровой подогреватель	1	150	60	кожухотрубчатый
2	ТА промежуточного нагрева	0,2	120	30	кожухотрубчатый
3	Конденсатор-холодильник	1,5	30	40	спиральный
4	Испаритель с паровым пространством	0,5	180	45	
5	Концевой холодильник	0,8	28	29	пластинчатый
6	Паровой подогреватель	0,6	160	30	
7	ТА промежуточного нагрева	0,4	135	70	пластинчатый
8	Конденсатор-холодильник	0,7	35	25	спиральный
9	Испаритель с паровым пространством	0,9	215	65	
10	Концевой холодильник	0,3	190	30	кожухотрубчатый
11	Паровой подогреватель	0,1	220	40	кожухотрубчатый
12	ТА промежуточ-	1,1	150	80	

	ного нагрева				
--	--------------	--	--	--	--

Продолжение таблицы 2.2

13	Конденсатор-холодильник	1,2	28	30	
14	Испаритель с паровым пространством	1,3	200	50	
15	Концевой холодильник	1,4	180	35	кожухотрубчатый
16	Паровой подогреватель	0,4	135	25	
17	ТА промежуточного нагрева	0,6	170	60	
18	Конденсатор-холодильник	0,3	160	30	

Таблица 2.3 – Исходные данные для подбора выпарного аппарата

№ п/п	Тепловая нагрузка, Q, МВт	k, Вт/м ² К	Δt _{пол} , К
1	1	500	20
2	1,5	650	30
3	1,3	800	35
4	0,5	500	20
5	0,7	550	15
6	1,2	720	20
7	0,8	800	10

Решение

Параметром, служащим для подбора типового оборудования для проведения тепловых процессов (печи, теплообменные и выпарные аппараты), является площадь поверхности теплопередачи. Данные, приведенные в таблицах 2.1-2.3, позволяют ее рассчитать предварительно.

Для печей определяют площадь труб радиантной камеры F_p по формуле

$$F_p = Q_p / q_p,$$

где Q_p – тепловая нагрузка радиантной камеры, кВт; q_p – теплонапряжение радиантных труб, кВт/м², принимаемое по справочным данным.

Для теплообменных и выпарных аппаратов определяют площадь теплопередачи F из основного уравнения теплопередачи.

Далее по заданному преподавателем варианту оборудования проводят расчет необходимой площади поверхности теплопередачи и по информационным источникам подбирают подходящий типоразмер оборудования.

Занятие 3. Изучение перечня используемых свойств веществ и их параметров состояния

Цель занятия - познакомиться со свойствами рабочих веществ, входящих в состав информационного обеспечения при проектировании технологического оборудования.

В химической технологии более 50% исходных данных на проектирование и оптимизацию процессов и оборудования составляют физико-химические и теплофизические свойства веществ. Причем точность их имеет решающее значение для определения параметров процесса. Режимные параметры, например, процесса ректификации для органических и неорганических веществ, углеводородов и нефтепродуктов редко выходят за пределы $t = -50 \dots 400^\circ\text{C}$, а $P = 0,008 \dots 3$ МПа. Для других процессов они могут быть иными.

Важнейшими первичными, экспериментально определяемыми характеристиками индивидуальных веществ, являются следующие.

- *Химическая формула* вещества.
- *Молярная* (молекулярная) *масса* – M . Имеет размерность г/моль, кг/кмоль. В большинстве случаев в справочной литературе размерность M не указывают, а подразумевают.
- *Плотность* при эталонном (опорном) состоянии – ρ . Имеет размерность кг/м^3 , иногда г/см^3 . Для газов и паров используют ρ_0 при $t=0^\circ\text{C}$ и $P=0,1013$ МПа, для жидкостей – ρ_{20} при $t=20^\circ\text{C}$ и $P=0,1013$ МПа (иногда при другой температуре и давлении насыщенного пара для легких и при атмосферном давлении для тяжелых продуктов).
- *Показатель преломления* при эталонном (опорном) состоянии – n_D . Безразмерный. Используют обычно только для жидкостей n_D^{20}

при $t=20^{\circ}\text{C}$ и $P=0,1013$ МПа (иногда при другой температуре и давлении насыщенного пара для легких и при атмосферном давлении для тяжелых продуктов).

- Нормальная *температура кипения* – $t_{\text{к}}$, $T_{\text{к}}$. Имеет размерность $^{\circ}\text{C}$ или K и соответствует давлению $P=0,1013$ МПа.

- *Критическая температура* – $t_{\text{кр}}$, $T_{\text{кр}}$. Имеет размерность $^{\circ}\text{C}$ или K .

- *Критическое давление* – $P_{\text{кр}}$. Имеет размерность Па или МПа .

- *Критическая плотность* – $\rho_{\text{кр}}$ или *критический удельный объем* – $v_{\text{кр}}$. Имеют размерности $\text{кг}/\text{м}^3$ и $\text{м}^3/\text{кг}$.

В качестве дополнительных характеристик индивидуальных веществ служат: факторы ацентричности, полярности, сложности межмолекулярного взаимодействия и др., рассчитываемые на основе первичных. Наиболее часто в расчетной практике используют *фактор ацентричности* – ω (безразмерный).

Среди используемых теплофизических свойств веществ: термодинамические (равновесные, объемные, калорические), переносные и некоторые другие свойства.

Представленные свойства рабочих веществ должны предварительно определяться по известным методикам – в идеале - автоматизированным путем средствами вычислительной техники.

Далее по заданному преподавателем варианту конкретного оборудования или процесса по информационным источникам составляют перечень необходимых свойств рабочих веществ для проектирования изучаемого объекта.

Занятие 4. Физико-химические характеристики рабочих веществ и их смесей

Целью занятия является освоение способов нахождения данных о свойствах рабочих веществ с использованием справочных табличных и графических материалов, применением интерполяции и экстраполяции. Рекомендуется рассмотреть несколько типичных примеров.

Базовый уровень

Пример 4.1. Определить теплофизические свойства воды на линии насыщения при температуре 110°C.

Решение

Используем справочную таблицу XXXIX [1]. При температуре $t = 110^\circ\text{C}$ находим:

Давление насыщенного пара $P = 1,46 \text{ кг/см}^2 = 0,14323 \text{ МПа}$;

Плотность $\rho = 951 \text{ кг/м}^3$;

Изобарная теплоемкость $C_p = 4,23 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$;

Коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,685 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$;

Коэффициент динамической вязкости $\mu = 0,000256 \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Пример 4.2. Определить коэффициент динамической вязкости воды при 20°C.

Решение

Используем номограмму (рисунок V [1]).

Из точки 20°C температурной шкалы проводим прямую линию через точку 20, соответствующую воде, и на ее пересечении со шкалой вязкости находим $\mu = 1 \text{ сП} = 1 \text{ мПа}\cdot\text{с}$.

Повышенный уровень

Пример 4.3. Определить коэффициент динамической вязкости воздуха при атмосферном давлении и температуре 20°C.

Решение

Используем номограмму (рисунок VI [1]).

Соединяем прямой линией точку 20°C температурной шкалы с точкой 5, соответствующей воздуху, и на ее пересечении со шкалой вязкости находим $\mu = 0,0185 \text{ сП} = 0,0185 \text{ мПа}\cdot\text{с}$.

Пример 4.4. Определить плотность жидкой нефтяной фракции при температурах 55 и 90°C при атмосферном давлении, если известны два значения относительной плотности: $\rho_4^{20} = 0,7754$ и $\rho_4^{70} = 0,73665$.

Решение

Известно, что относительная плотность жидких нефтепродуктов и углеводородов в небольшом интервале температуры описывается линейным уравнением

$$\rho_4^t = \rho_4^{20} - \gamma(t - 20),$$

где ρ_4^{20} , ρ_4^t – относительная плотность при 20 и t , °С; γ – температурная поправка плотности, K^{-1} .

Исходные данные позволяют определить γ :

$$\gamma = (\rho_4^{20} - \rho_4^{70}) / (70 - 20) = (0,7754 - 0,73665) / (70 - 20) = 0,000775 K^{-1}.$$

Тогда получим уравнение в виде:

$$\rho_4^t = 0,7754 - 0,000775(t - 20),$$

которое позволяет проводить интерполяционные и экстраполяционные расчеты относительной плотности.

Для заданных температур получим: $\rho_4^{55} = 0,7754 - 0,000775(55 - 20) = 0,7483$; $\rho_4^{90} = 0,7754 - 0,000775(90 - 20) = 0,7212$.

Искомые значения плотности равны: $\rho_{55} = 748,3 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{90} = 721,2 \text{ кг/м}^3$.

Примечание. Рассмотренные расчеты плотности могут быть проведены графическим путем или прямой интерполяцией или экстраполяцией исходных данных.

Для закрепления темы рекомендуется выполнить каждому студенту индивидуальное задание для поиска свойств рабочих веществ химической технологии с использованием информационных источников.

Занятие 5. Расчет равновесных свойств рабочих веществ

Целью занятия является изучение методов определения давления насыщенного пара (ДНП) вещества, констант фазового равновесия и коэффициентов относительной летучести, поверхностного натяжения жидкостей.

Рекомендуется рассмотреть использование обобщенных методов расчета и эмпирических уравнений.

Базовый уровень

Пример 5.1. Рассчитать ДНП ацетона при 273,4 К.

Решение

Для расчетов давления насыщенных паров используем уравнение Антуана

$$\ln P = A - \frac{B}{T + C},$$

где T – температура паро-жидкой системы, К; A , B , C – коэффициенты, определяемые для индивидуальных веществ по справочным данным.

По данным [2] для ацетона находим константы уравнения Антуана:

$$A = 16,6513; \quad B = 2940,46; \quad C = -35,93.$$

После подстановки получим:

$$\ln P = 16,6513 - [2940,46 / (273,4 - 35,93)] = 4,26885$$

или $P = 71,4$ мм рт.ст.

По опытным данным значение ДНП составляет $P_{оп} = 71,2$ мм рт.ст., ошибка расчета $\Delta p = 0,3\%$.

Пример 5.2. Рассчитать ДНП фракции 140 – 240 мангышлакской нефтесмеси при 130°C, если средняя температура кипения фракции составляет $t_k = 189^\circ\text{C}$.

Решение

Для расчетов используем видоизмененное уравнение Антуана для нефтепродуктов

$$\lg \left(\frac{P}{0,101325} \right) = \frac{A \cdot (T_k - T)}{C - T},$$

где $A = 3,60886 + 1,24685 \cdot 10^{-6} \cdot T_k^2$; $C = 9,68942 \cdot 10^{-2} \cdot T_k + 2,20052 \cdot 10^{-4} \cdot T_k^2$; T_k – температура кипения, К; T – текущая температура, К.

Определим значения температур в К:

$$T_k = 189 + 273,15 = 462,15 \text{ К}; \quad T = 130 + 273,15 = 403,15 \text{ К}.$$

Определим коэффициенты уравнения:

$$A = 3,60886 + 1,24685 \cdot 10^{-6} \cdot 462,15^2 = 3,87516;$$

$$C = 9,68942 \cdot 10^{-2} \cdot 462,15 + 2,20052 \cdot 10^{-4} \cdot 462,15^2 = 91,7789.$$

Тогда давление насыщенных паров составит

$$\lg(P/0,101325) = (3,87516 (462,15 - 403,15))/(91,7789 - 403,15) = \\ = - 0,73428$$

или $P = 0,01868$ МПа = 136,3 мм рт.ст.

Пример 5.3. Рассчитать ДНП этилбензола при $t = 186,8^\circ\text{C} = 459,95$ К.

Решение

Для расчетов давления насыщенного пара используем метод Питцера

$$P = P_{\text{кр}} \cdot \exp(f_0 + \omega \cdot f_1),$$

где f_0 и f_1 рассчитываются по формулам:

$$f_0 = 5,92714 - 6,09648/\tau - 1,28862 \cdot \ln\tau + 0,169347 \cdot \tau^6;$$

$$f_1 = 15,2518 - 15,6875/\tau - 13,4721 \cdot \ln\tau + 0,43577 \cdot \tau^6,$$

где $\tau = T/T_{\text{кр}}$ – приведенная температура; T – текущая температура, К; $T_{\text{кр}}$ – критическая температура, К.

По справочным данным [2] находим для этилбензола:

$$T_{\text{к}} = 409,3 \text{ К}; T_{\text{кр}} = 617,1 \text{ К}; P_{\text{кр}} = 35,6 \text{ атм} = 3,607 \text{ МПа}; \omega = 0,299.$$

Приведенная температура равна

$$\tau = T/T_{\text{кр}} = 459,95/617,1 = 0,74534.$$

Определим температурные функции:

$$f^{(0)} = 5,92714 - (6,09648/0,74534) - 1,28862 \ln 0,74534 + \\ + 0,169347 \cdot 0,74534 = -1,84453;$$

$$f^{(1)} = 15,2518 - (15,6875/0,74534) - 13,4721 \ln 0,74534 + \\ + 0,43577 \cdot 0,74534^6 = -1,76127.$$

Давление паров составит

$$\ln(P/P_{\text{кр}}) = -1,84453 - 0,299 \cdot 1,76127 = - 2,3711$$

или $P = 0,3368$ МПа = 2526 мм рт.ст.

Опытное значение равно $P_{\text{оп}} = 2494$ мм рт.ст., ошибка расчета – $\Delta p = 1,28\%$.

Пример 5.4. Рассчитать константы фазового равновесия системы этилбензол (1) – фракция 140 – 240 (2) мангышлакской нефти, находящейся при температуре 130°C , если давления насыщенных паров

составляют $P_1 = 641,72$ мм рт.ст. и $P_2 = 130,5$ мм рт.ст., а давление в системе равно $\pi = 0,05$ МПа = 375,03 мм рт.ст.

Решение

Константы фазового равновесия определяем как для идеальной системы, т.е.:

$$k_1 = P_1/\pi = 641,72/375,03 = 1,711;$$

$$k_2 = P_2/\pi = 130,5/375,03 = 0,348.$$

Пример 5.5. Рассчитать коэффициент относительной летучести для паро-жидкой равновесной системы этилбензол – фракция 140 – 240 мангышлакской нефти при 130°C. Воспользоваться результатами предыдущего примера.

Решение

Коэффициент относительной летучести для бинарной системы определяем по формуле

$$\alpha = k_1/k_2 = 1,711/0,348 = 4,92.$$

Повышенный уровень

Пример 5.6. Для трехкомпонентной паро-жидкой смеси, находящейся в равновесии и состоящей из н-гексана, н-гептана и н-нонана при температуре 110°C, определить коэффициенты относительной летучести компонентов.

Решение

Для многокомпонентной смеси коэффициенты относительной летучести определяем по отношению к эталонному компоненту, в качестве которого принимаем н-нонан, т.е.:

$$\alpha_i = P_i/P_{\text{эт}}, (i = \overline{1,3})$$

где P_i – давление насыщенного пара i -го компонента, МПа; $P_{\text{эт}}$ – давление насыщенного пара эталонного компонента; i – номер компонента.

Предварительно определим давления насыщенных паров компонентов при температуре системы:

$$P_1 = 0,314 \text{ МПа}; P_2 = 0,138 \text{ МПа}; P_3 = 0,03 \text{ МПа}.$$

Тогда получим:

$$\alpha_1 = P_1/P_{\text{эт}} = 0,314/0,03 = 10,47; \alpha_2 = P_2/P_{\text{эт}} = 0,138/0,03 = 4,6;$$

$$\alpha_3 = P_3/P_{\text{эт}} = 0,03/0,03 = 1.$$

Пример 5.7. Рассчитать поверхностное натяжение фракции 140 – 240 мангышлакской нефти при $t = 150^\circ\text{C}$, если известны следующие ее характеристики: $\rho_4^{20} = 0,7754$; $T_{\text{кр}} = 637,8 \text{ К}$.

Решение

Используем интерполяционную формулу

$$\sigma = \sigma_{T_0} \left(\frac{T_{\text{кр}} - T}{T_{\text{кр}} - T_0} \right)^\mu,$$

где σ_{T_0} – коэффициент поверхностного натяжения при T_0 (К), Н/м; $T_{\text{кр}}$ – критическая температура, К; μ – показатель степени.

Значения σ_{T_0} и μ – предварительно рассчитываются по имеющимся данным.

Для нефтепродуктов $\mu = 1,26 \dots 1,28$, а значения σ_{20} при $t_0 = 20^\circ\text{C}$ могут рассчитываться по формуле

$$\sigma_{20} = 4,117 [\exp(2,6085 \rho_4^{20}) - 1,8658 \rho_4^{20}].$$

Предварительно рассчитаем σ_{20} :

$$\sigma_{20} = 4,117 [\exp(2,6085 \cdot 0,7754) - 1,8658 \cdot 0,7754] = 25,16 \text{ Н/м}.$$

Значение текущей температуры равно $T = 150 + 273,15 = 423,15 \text{ К}$.

Тогда

$$\sigma_{150} = 25,16 [(637,8 - 423,15)/(637,8 - 293,15)]^{1,27} = 13,79 \text{ Н/м}.$$

Занятие 6. Расчет объемных свойств рабочих веществ

Целью занятия является изучение методов определения плотности и удельных объемов газов и жидкостей.

Рекомендуется рассмотреть использование обобщенных методов расчета и эмпирических уравнений.

Базовый уровень

Пример 6.1. Рассчитать плотность фракции 140 – 240 мангышлакской нефтесмеси при 240°C и давлением $0,511 \text{ МПа}$, если

известны следующие ее характеристики: $M = 149,8$ кг/кмоль; $P_{кр} = 2,26$ МПа; $T_{кр} = 637,8$ К.

Решение

Для определения плотности воспользуемся обобщенной диаграммой сжимаемости реальных веществ [2, 13].

Приведенные параметры состояния равны:

$$T = 240 + 273,15 = 513,15 \text{ К}; T_{пр} = T/T_{кр} = (513,15/637,8) = 0,805;$$

$$P_{пр} = P/P_{кр} = 0,511/2,26 = 0,226.$$

По диаграмме сжимаемости [2, 13] находим значение коэффициента сжимаемости, соответствующее рассчитанным приведенным параметрам:

$$Z (T_{пр} = 0,805; P_{пр} = 0,226) \approx 0,82.$$

Тогда

$$Z = (P \cdot v \cdot M / R \cdot T) = 0,82,$$

где Z – коэффициент сжимаемости; P – давление, Па; T – температура, К; v – удельный объем, м³/кг; M – молярная масса, кг/кмоль; $R=8314$ Дж/(кмоль·К).

Выразив удельный объем, получим

$$v = (0,82 \cdot RT) / (P \cdot M) = (0,82 \cdot 8314 \cdot 513,15) / (0,511 \cdot 10^6 \cdot 149,8) = 0,0457 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Плотность равна

$$\rho = 1/v = 1/0,0457 = 21,8 \text{ кг/м}^3, \text{ что соответствует плотности пара.}$$

Пример 6.2. Рассчитать плотность фракции 140-240°С мангышлакской нефти при $t = 240^\circ\text{C}$ и $P = 0,511$ МПа, если известны следующие данные: приведенные параметры равны $T_{пр} = 0,805$; $P_{пр} = 0,226$; фактор ацентричности – $\omega = 0,5246$.

Решение

Используем табличный метод нахождения составляющих коэффициента сжимаемости.

Расчет проводим по формуле

$$Z = Z_0 + \omega \cdot Z_1,$$

где $Z_0 = f_1(T_{\text{пр}}, P_{\text{пр}})$, $Z_1 = f_2(T_{\text{пр}}, P_{\text{пр}})$ – вспомогательные функции, определяемые по справочным таблицам.

По данным [2] находим составляющие:

$$Z^{(0)} = 0,8367; Z^{(1)} = -0,1283.$$

Тогда коэффициент сжимаемости равен:

$$Z = 0,8367 - 0,5246 \cdot 0,1253 = 0,7694.$$

Удельный объем составит

$$v = (0,7694 \cdot 8314 \cdot 513,5) / (0,511 \cdot 10^6 \cdot 149,8) = 0,0429 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Плотность равна $\rho = 1/v = 1/0,0429 = 23,32 \text{ кг/м}^3$, что сопоставимо с данными примера 6.1.

Пример 6.3. Рассчитать плотность насыщенного пара и жидкости фракции 140 – 240 мангышлакской нефтесмеси при 270°C, если известны следующие характеристики: $\rho_{\text{кр}} = 253,7 \text{ кг/м}^3$; $T_{\text{кр}} = 637,8 \text{ К}$; фактор Филиппова $\lg A = -0,1691$.

Решение

Для определения сопряженных значений плотности пара и жидкости на линии насыщения используем метод Л.П. Филиппова.

При этом плотность жидкости на линии насыщения рассчитывается по формуле (в кг/м^3):

$$\rho_{\text{ж}} = \rho_{\text{кр}} \cdot [1 + B (1 - T/T_{\text{кр}})^{0,323} + (B - 1) \cdot (1 - T/T_{\text{кр}})],$$

где

$$B = (7,784 - 3,267 \cdot \lg A)^{0,323}.$$

Температура системы составляет

$$T = 270 + 273,15 = 543,15 \text{ К}.$$

Коэффициент B равен

$$B = 7,784 + 3,267 \cdot 0,1691)^{0,323} = 1,9837.$$

Плотность жидкости равна

$$\rho_{\text{ж}} = 253,7 \cdot [1 + 1,9837(1 - (543,15/637,8))^{0,323} + (1,9837 - 1)(1 - (543,15/637,8))] = 562,5 \text{ кг/м}^3.$$

Плотность пара рассчитывается по формуле (в кг/м^3):

$$\rho_{\text{п}} = \rho_{\text{кр}} \cdot [1 - B \cdot (1 - T/T_{\text{кр}})^{0,323} + (B - 1) \cdot (1 - T/T_{\text{кр}})].$$

Плотность пара будет равна

$$\rho_{\text{п}} = 253,7 \cdot [1 - 1,9837(1 - (543,15/637,8))^{0,323} + (1,9837 - 1)(1 - (543,15/637,8))] = 18,99 \text{ кг/м}^3.$$

Повышенный уровень

Пример 6.4. Рассчитать плотность метана при 30°C и давлениях 2 и 46,8 МПа.

Решение

Используем обобщенное уравнение состояния Редлиха-Квонга [2,6]

$$v_{\text{п}} = b + (10^{-3} \cdot R) \cdot T / \{P + a / [T^{0,5} v_{\text{п}} (v_{\text{п}} + b)]\},$$

где

$$a = 0,42748 (10^{-3} \cdot R)^2 T_{\text{кр}}^{2,5} / P_{\text{кр}}; \quad b = 0,08664 (10^{-3} \cdot R) T_{\text{кр}} / P_{\text{кр}}.$$

Расчет удельных объемов проводят методом последовательных приближений. В качестве начального приближения для пара (газа) используют $v_0 = 1000 \text{ см}^3 / \text{моль}$. Для жидкости или плотного газа (высокие давления) в качестве начального приближения используют $v_0 = 1-10 \text{ см}^3 / \text{моль}$.

По справочным данным находим характеристики метана: $M = 16,04 \text{ кг/кмоль}$; $T_{\text{кр}} = 190,6 \text{ К}$; $P_{\text{кр}} = 4,6 \text{ МПа}$.

Константы уравнения будут равны:

$$a = 0,42748 (10^{-3} \cdot 8,314)^2 190,6^{2,5} / 4,6 = 3221702,5;$$

$$b = 0,08664 (10^{-3} \cdot 8,314) 190,6 / 4,6 = 29,846508.$$

Температура системы составляет

$$T = 30 + 273,15 = 303,15 \text{ К}.$$

1) $p = 2 \text{ МПа}$. Используем $v_0 = 1000 \text{ см}^3 / \text{моль}$.

Подстановка дает

$$v_1 = 29,846508 + (10^{-3} \cdot 8,314) \cdot 303,15 / \{2 + 3221702,5 / [303,15^{0,5} \cdot 1000 \times (1000 + 29,846508)]\} = 1186,16 \text{ см}^3 / \text{моль}.$$

Аналогично получаем: ... $v_5 = 1217,70$; $v_6 = 1217,70 \text{ см}^3 / \text{моль}$.

Плотность метана составит

$$\rho = M \cdot 10^{-3} / v_6 = 16,04 \cdot 10^{-3} / 1217,70 = 13,17 \text{ кг/м}^3.$$

2) $p = 46,8$ МПа. Используем $v_0 = 10 \text{ см}^3 / \text{моль}$.

Результат последнего приближения составляет

$$v = 29,846508 + (10^{-3} \cdot 8,314) \cdot 303,15 / \{46,8 + 3221702,5 : [303,15^{0,5} \cdot 61,0408 \times (61,0408 + 29,846508)]\} = 61,040799 \text{ см}^3/\text{моль}.$$

Плотность метана составит

$$\rho = M \cdot 10^{-3} / v = 16,04 \cdot 10^{-3} / 61,040799 = 262,775 \text{ кг/м}^3.$$

Занятие 7. Расчет калорических свойств рабочих веществ

Целью занятия является изучение методов определения теплоемкости газов и жидкостей, теплоты испарения жидкостей, энтальпии.

Рекомендуется рассмотреть использование обобщенных методов расчета и эмпирических уравнений.

Базовый уровень

Пример 7.1. Определить изобарную теплоемкость газообразного этана при $T = 305 \text{ К}$ и $P = 11,75 \text{ МПа}$.

Решение

Изобарную теплоемкость реального газа рассчитываем по формуле

$$C_p = C_p^0 + \Delta C_p,$$

где C_p^0 – теплоемкость в состоянии идеального газа (при $P \rightarrow 0$); ΔC_p – поправка к теплоемкости на давление.

Идеально-газовую теплоемкость рассчитаем по формуле:

$$C_p^0 = A + BT + CT^2 + DT^3,$$

где T – температура, К; A, B, C, D – коэффициенты, определяемые для каждого индивидуального вещества по справочным данным.

Константы уравнения для идеально-газовой теплоемкости этана равны [2]:

$$A = 1,292; B = 4,254 \cdot 10^{-2}; C = -1,657 \cdot 10^{-5}; D = 2,081 \cdot 10^{-9}.$$

Тогда

$$C_p^0 = 1,292 + 4,254 \cdot 10^{-2} \cdot 305 - 1,657 \cdot 10^{-5} \cdot 305^2 + 2,081 \cdot 10^{-9} \cdot 305^3 = 12,78 \text{ ккал}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}) = 0,425 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot \text{К}) = 1,779 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

ΔC_p рассчитывается по формуле (в кДж/(кг·К))

$$\Delta C_p = \frac{R}{M} (\Delta C_p^{(0)} + \omega \Delta C_p^{(1)}),$$

где $R=8,314 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$; M – кг/кмоль; $\Delta C_p^{(0)}$, $\Delta C_p^{(1)}$ – составляющие поправки на давление к теплоемкости, зависящие от приведенных температуры и давления и определяемые по справочным таблицам [2].

По данным [2] находим характеристики этана: $M = 30,07$ кг/кмоль; $T_{кр} = 305,4$ К; $P_{кр} = 4,883$ МПа; $\omega = 0,098$.

Приведенные параметры равны:

$$T_{пр} = T/T_{кр} = 305/305,4 \approx 1,0; P_{пр} = 11,75/4,883 \approx 2,4.$$

По таблицам 5.10 и 5.11 [2] при $T_{пр} = 1$ и $P_{пр} = 2,4$ находим составляющие поправки на давление к C_p :

$$\Delta C_p^{(0)} = 4,64; \quad \Delta C_p^{(1)} = 12,095.$$

Тогда поправка на давление к теплоемкости будет равна:

$$\Delta C_p = 8,314/30,07(4,64 + 0,098 \cdot 12,095) = 1,611 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Теплоемкость этана равна

$$C_p = 1,779 + 1,611 = 3,39 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Пример 7.2. Определить теплоемкость паров фракции 140 – 240 мангышлакской нефтесмеси при $T = 574$ К и $P = 3,39$ МПа, если известны следующие ее характеристики: $T_{кр} = 637,8$ К; $P_{кр} = 2,26$ МПа; $\omega = 0,5246$; $K = 12,075$; $\rho_{15}^{15} = 0,7801$; $M = 149,8$ кг/кмоль.

Решение

Рассчитываем идеально – газовую теплоемкость по эмпирической формуле

$$C_p^0 = -1,3668 + 0,11212 \cdot K - (10,469 - 9,1354 \cdot K + 0,2866 \cdot K^2) \cdot 10^{-4} T - 20,881 \cdot 10^{-7} T^2 - \left[\left(\frac{12,8}{K} - 1 \right) \cdot \left(\frac{10}{K} - 1 \right) \cdot 100 \right]^2 \cdot [0,35493 - 0,33833 \rho_{15}^{15} - (16,409 - 15,695 \rho_{15}^{15}) \cdot 10^{-4} T + (10,669 - 9,553 \rho_{15}^{15}) \cdot 10^{-7} T^2],$$

где T – температура, К; K – характеризующий фактор Ватсона; ρ_{15}^{15} – относительная плотность при 15°C .

Повышенный уровень

После подстановки величин получим:

$$C_p^0 = -1,3668 + 0,11212 \cdot 12,075 - (10,469 - 9,1354 \cdot 12,075 + 0,2866 \cdot 12,075^2) \cdot 10^{-4} \cdot 574 - 20,881 \cdot 10^{-7} \cdot 574^2 - [((12,8/12,075) - 1) \cdot ((10/12,075) - 1) \cdot 100]^2 \cdot [0,35493 - 0,33833 \cdot 0,7801 - (16,409 - 15,695 \cdot 0,7801) \cdot 10^{-4} \cdot 574 + (10,669 - 9,553 \cdot 0,7801) \cdot 10^{-7} \cdot 574^2] = 2,676 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Приведенные параметры системы равны:

$$T_{\text{пр}} = 574/637,8 \approx 0,90; \quad P_{\text{пр}} = 3,39/2,26 = 1,5.$$

По таблицам 5.10 и 5.11 [2] находим составляющие поправки на давление к C_p :

$$\Delta C_p^{(0)} = 4,0; \quad \Delta C_p^{(1)} = 10,324.$$

Тогда поправка на давление к теплоемкости будет равна:

$$\Delta C_p = (8,314/149,8) \cdot (4,0 + 0,5246 \cdot 10,324) = 0,526 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Теплоемкость паров фракции равна

$$C_p = 2,676 + 0,526 = 3,202 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Пример 7.3. Рассчитать теплоемкость жидкой фракции 140 – 240 мангышлакской нефтесмеси при $T = 574 \text{ К}$, если известны следующие данные: $\omega = 0,5246$; $T_{\text{пр}} = 0,9$; $C_p^0 = 2,676 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.

Решение

Рассчитываем поправку на давление к C_p в жидкой фазе по формуле

$$\Delta C_p^{\text{ж}} = \frac{R}{M} (0,5 + 2,2\omega) [3,67 + 11,64(1 - \tau)^4 + 0,634/(1 - \tau)],$$

где $\tau = T_{\text{пр}}$.

После подстановки величин получим:

$$\Delta C_p^{\text{ж}} = (8,314/149,8) \cdot (0,5 + 2,2 \cdot 0,5246) [3,67 + 11,64(1 - 0,9)^4 + (0,634/(1 - 0,9))] = 0,919 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Тогда искомая теплоемкость будет равна

$$C_p = 2,676 + 0,919 = 3,595 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Пример 7.4. Рассчитать теплоемкость паров фракции 140 – 240 мангышлакской нефтесмеси при $T = 574$ К, если известны следующие ее характеристики: $\rho_{15}^{15} = 0,7801$; $K = 12,075$.

Решение

Рассчитаем теплоемкость паров по эмпирической формуле

$$C_p = \frac{4 - \rho_{15}^{15}}{1541} (1,8T + 211) \cdot (0,146K - 0,41),$$

где T – в К; K – характеризующий фактор Ватсона.

Тогда

$$C_p = [(4 - 0,7801)/1541] \cdot (1,8 \cdot 574 + 211) \cdot (0,146 \cdot 12,075 - 0,41) = 2,95 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

В примере 7.2. получено значение $C_p = 3,202$ кДж/(кг·К). Расхождение составляет 8,2% по отношению к среднему значению.

Пример 7.5. Рассчитать теплоту испарения фракции 140 – 240 мангышлакской нефтесмеси при $T = 500$ К, если известны ее следующие характеристики: $T_k = 462,8$ К, $T_{кр} = 637,8$ К; $P_{кр} = 2,26$ МПа; $M = 149,8$ кг/кмоль.

Решение

Теплоту испарения определяем по формуле:

$$L_{\text{исп}} = L_k \left(\frac{1 - \tau}{1 - \tau_k} \right)^{0,38},$$

где L_k – теплота испарения (парообразования) при температуре кипения, кДж/кмоль; $\tau_k = T_k/T_{кр}$ – приведенная температура кипения смеси; $\tau = T/T_{кр}$ – приведенная температура системы.

Теплоту испарения при температуре кипения определяем по эмпирической формуле

$$L_k = \frac{19,68 \cdot T_{кр} (1 - \pi)^{0,69} \cdot \lg \pi}{1 - 1/\tau_k},$$

где $\pi = P_k/P_{кр}$ – приведенное давление паров при температуре кипения; P_k – давление насыщенных паров при T_k (обычно 0,1013), МПа.

Тогда

$$L_k = [19,68 \cdot 637,8 \cdot (1 - (0,1013/2,26))^{0,69} \lg(0,1013/2,26)] / (1 - (637,8/462,8)) / 149,8 = 288,8 \text{ кДж/кг.}$$

Теплота испарения фракции при 500 К будет равна

$$L = 288,8 \cdot [(1 - (500/637,8)) / (1 - (462,8/637,8))]^{0,38} = 263,7 \text{ кДж/кг.}$$

Завершая тему, следует охарактеризовать наиболее известную методику определения энтальпии реальных веществ, базирующуюся на принципах, аналогичных методике расчета изобарной теплоемкости (пример 7.1).

Занятие 8. Расчет переносных свойств рабочих веществ

Целью занятия является изучение методов определения коэффициентов вязкости, теплопроводности и диффузии, скорости звука.

Базовый уровень

Пример 8.1. Рассчитать коэффициент динамической вязкости фракции 140 – 240 мангышлакской нефтесмеси при $p = 0,1013$ МПа и $t = 200^\circ\text{C}$, если известны следующие данные: $\rho_{200} = 634,5$ кг/м³; $\nu_{20} = 1,5$ мм²/с; $\nu_{50} = 1,0$ мм²/с.

Решение

С учетом имеющихся данных коэффициент динамической вязкости определяем по формуле

$$\mu = \nu \cdot \rho, \text{ Па}\cdot\text{с},$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с; ρ – плотность, кг/м³.

Для расчетов кинематической вязкости углеводородов и нефтепродуктов в зависимости от температуры при атмосферном давлении P_0 используют формулу Вальтера:

$$\lg \lg(\nu_T + c) = A + B \lg T,$$

где ν_T – в мм²/с; T – в К; c – константа (обычно принимают значение $c = 0,8$, но иногда $0,5 \dots 1,0$).

Для использования уравнения Вальтера необходимо иметь два опытных значения вязкости при различных температурах (например, при 20 и 50°C), которые измеряют при физико-химических исследо-

ваниях. Тогда значения коэффициентов А и В находят предварительно по формулам:

$$B = \frac{\lg \lg(v_{T_1} + c) - \lg \lg(v_{T_2} + c)}{\lg T_1 - \lg T_2}; \quad A = \lg \lg(v_{T_1} + c) - B \lg T_1.$$

Принимаем $c = 0,8$ и находим константы уравнения Вальтера:

$$B = [\lg \lg(1,5 + 0,8) - \lg \lg(1,0 + 0,8)] / (\lg 293,15 - \lg 323,15) = - 3,5775;$$

$$A = \lg \lg(1,5 + 0,8) + 3,5775 \lg 293,15 = 8,3844.$$

Уравнение Вальтера для данной фракции записывается в виде:

$$\lg \lg(v_T + 0,8) = 8,3844 - 3,5775 \lg T.$$

Тогда при $T = 200 + 273,15 = 473,15$ К получим:

$$\lg \lg(v_{200} + 0,8) = 8,3844 - 3,5775 \lg 473,15 = - 1,1854$$

или $v_{200} = 0,362 \text{ мм}^2/\text{с} = 0,362 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Динамический коэффициент вязкости равен

$$\mu_{200} = v_{200} \cdot \rho_{200} = 0,362 \cdot 10^{-6} \cdot 634,5 = 2,298 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Пример 8.2. Рассчитать коэффициент динамической вязкости фракции 140 – 240 мангышлакской нефтесмеси при $P = 10$ МПа и $t = 200^\circ\text{C}$, если известны следующие данные: $M = 149,8$ кг/кмоль; $\rho_{200} = 634,5$ кг/м³; $\mu_{p_0,200} = 2,298 \cdot 10^{-4}$ Па·с.

Решение

Для расчетов динамической вязкости углеводородов и нефтепродуктов при повышенном давлении $P \leq 60$ МПа используют формулу [13]

$$\mu_{p,T} = \mu_{p_0,T} + \Delta\mu(p - p_0),$$

где $\mu_{p_0,T}$ – динамический коэффициент вязкости при атмосферном (или близком к нему) давлении P_0 и температуре T , Па·с; $\Delta\mu$ – средняя поправка на давление к коэффициенту вязкости, с; P, P_0 – давление, Па.

Величина $\Delta\mu$ рассчитывается по формуле:

$$\Delta\mu = -8,378596 \cdot 10^{-13} + 3,06052 \cdot 10^{-8}k - 2,21265 \cdot 10^{-5}k^2 + 1,09459 \cdot 10^{-2}k^3,$$

где k – комплекс, определяемый по формуле

$$k = \mu_{p_0,T} \sqrt[3]{\frac{M}{\rho_{p_0,T}}}.$$

Найдем значение k:

$$k = 2,298 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt[3]{\frac{149,8}{634,5}} = 1,4203 \cdot 10^{-4}.$$

Величина $\Delta\mu$ равна:

$$\Delta\mu = -8,378596 \cdot 10^{-13} + 3,06052 \cdot 10^{-8} \cdot 1,4203 \cdot 10^{-4} - 2,21265 \cdot 10^{-5} \times \\ \times (1,4203 \cdot 10^{-4})^2 + 1,09459 \cdot 10^{-2} (1,4203 \cdot 10^{-4})^3 = 3,094 \cdot 10^{-12} \text{ с.}$$

Тогда

$$\mu_{p,T} = 2,298 \cdot 10^{-4} + 3,094 \cdot 10^{-12} (10 - 0,1013) \cdot 10^6 = 2,604 \cdot 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с.}$$

Пример 8.3. Рассчитать вязкость паров фракции 140 - 240°C мангышлакской нефти при $P_0 = 0,1013$ МПа и $t = 250^\circ\text{C}$, если известны следующие данные: $M = 149,8$ кг/кмоль; $\rho_{кр} = 253,7$ кг/м³; $T_{кр} = 641,3$ К; $P_{кр} = 2,23$ МПа.

Решение

Вязкость паровой фазы при давлении P и температуре T определяется по формуле:

$$\mu_{п} = \mu^0 + \frac{1,08 \cdot 10^{-7}}{\xi} \cdot [\exp(1,439 \cdot \rho_{пр}) - \exp(-1,11 \cdot \rho_{пр}^{1,858})],$$

где μ^0 – вязкость паров в разреженном состоянии, Па·с; ξ – вспомогательный параметр; $\rho_{пр} = \rho_{п}/\rho_{кр}$ – приведенная плотность; $\rho_{п}$ – плотность паровой фазы, кг/м³.

Величина μ^0 подсчитывается по формуле:

$$\mu^0 = \mu_{кр} \cdot \frac{3 \cdot \tau^{1,5}}{1 + 2 \cdot \tau^{0,91}},$$

где $\mu_{кр}$ – вязкость паров при критической температуре, Па·с; τ – приведенная температура системы.

Величина $\mu_{кр}$ определяется по формуле:

$$\mu_{кр} = 15,8 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{M^{0,5} \cdot P_{кр}^{0,67}}{T_{кр}^{0,17}} = 15,8 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{149,8^{0,5} \cdot 2,23^{0,67}}{641,3^{0,17}} = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с.}$$

При $T = 250 + 273,15 = 523,15$ К получим:

$$\tau = \frac{T}{T_{кр}} = \frac{523,15}{641,3} = 0,816.$$

Тогда величина μ^0 составит:

$$\mu^0 = 1,1 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{3 \cdot 0,816^{1,5}}{1 + 2 \cdot 0,816^{0,91}} = 9,14 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Параметр ξ равен:

$$\xi = \frac{T_{\text{кр}}^{0,17}}{M^{0,5} \cdot \left(\frac{P_{\text{кр}}}{0,10132} \right)^{0,67}} = \frac{641,3^{0,17}}{149,8^{0,5} \left(\frac{2,23}{0,1013} \right)^{0,67}} = 0,0309.$$

Плотность паров при «нормальных» условиях равна

$$\rho_0 = \frac{M}{22,4} = \frac{149,8}{22,4} = 6,688 \text{ кг/м}^3.$$

Плотность паров равна

$$\rho_{\text{п}} = \rho_0 \frac{P T_0}{P_0 T} = 6,688 \cdot \frac{0,1013 \cdot 273,15}{0,1013 \cdot 523} = 3,49 \text{ кг/м}^3.$$

Приведенная плотность составит

$$\rho_{\text{пр}} = \frac{3,49}{253,7} = 0,0137.$$

Тогда

$$\mu_{\text{п}} = 9,14 \cdot 10^{-6} + \frac{1,08 \cdot 10^{-7}}{0,0309} \times$$

$$\times [\exp(1,439 \cdot 0,0137) - \exp(-1,11 \cdot 0,0137^{1,858})] = 9,208 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Пример 8.4. Рассчитать коэффициент теплопроводности жидкого н-декана ($\text{н} - \text{C}_{10}\text{H}_{22}$) при 100°C и $P = 0,1013 \text{ МПа}$.

Решение

При атмосферном давлении $P_0 = 0,1013 \text{ МПа}$ (или близком к нему) и температуре t теплопроводность жидкостей (углеводородов, нефтепродуктов) рассчитывается по формуле:

$$\lambda_t = \lambda_{t_0} [1 - \alpha(t - t_0)],$$

где λ_{t_0} – коэффициент теплопроводности при температуре t_0 , Вт/(м·К); α – температурный коэффициент теплопроводности, K^{-1} ; t – текущая температура, $^\circ\text{C}$.

Значения коэффициентов λ_{t_0} и α предварительно рассчитываются по эмпирическим формулам.

В частности для индивидуальных углеводородов при $t_0=20^\circ\text{C}$ эти коэффициенты определяют по формулам:

$$\lambda_{20}=a_0+a_1\lg M+\frac{a_2}{M}; \quad \alpha \cdot 10^3 = b_0 + b_1 \cdot \frac{\gamma \cdot 10^3}{\rho_4^{20}},$$

где M – мольная масса; γ – температурная поправка плотности, K^{-1} ; ρ_4^{20} – относительная плотность; a_0, a_1, a_2, b_0, b_1 – коэффициенты, значения которых приведены в таблице 3.1 [13].

По данным [2,5] определяем характеристики н-декана: $M = 142,3$ кг/кмоль; $\rho_4^{20} = 0,7299$; $\rho_4^{70} = 0,6910$.

Определяем температурную поправку плотности γ :

$$\gamma = (\rho_4^{20} - \rho_4^{70}) / (70 - 20) = (0,7299 - 0,6910) / (70 - 20) = 0,000778 \text{ K}^{-1}.$$

Определяем коэффициенты уравнения теплопроводности λ_{20} и α :

$$\lambda_{20} = 0 + 6,05 \cdot 10^{-2} \cdot \lg 142,3 + 8,625 \cdot 10^{-2} / 142,3 = 0,1309 \text{ Вт/(м·К)};$$

$$\alpha \cdot 10^3 = -0,710 + 2,552 \cdot (0,000778 \cdot 10^3 / 0,7299) = 2,01 \text{ K}^{-1}.$$

Тогда коэффициент теплопроводности будет равен:

$$\lambda_{100} = 0,1309 \cdot [1 - 2,01 \cdot 10^{-3} (100 - 20)] = 0,1098 \text{ Вт/(м·К)}.$$

Повышенный уровень

Пример 8.5. Рассчитать коэффициент теплопроводности фракции 140 – 240 мангышлакской нефтесмеси при $t = 100^\circ\text{C}$ и $P = 10$ МПа, если известны следующие данные:

$$\lambda_{p_0,100} = 0,1034 \text{ Вт/(м·К)}; \quad \rho_4^{20} = 0,7754; \quad t_0 = 20^\circ\text{C}; \quad \gamma = 0,000775 \text{ K}^{-1}.$$

Решение

При повышенном давлении P теплопроводность рассчитывается по формуле

$$\lambda_p = \frac{\lambda_{p_0}}{1 - A \ln \frac{B(T) + P}{B(T) + P_0}},$$

где коэффициенты: $A=0,1988$ – для нефтей и нефтепродуктов; $B(T)$ – рассчитывается по формуле:

$$B(T) = 38,42(a_0 + a_1\tau + a_2/\tau),$$

где a_0, a_1, a_2 – коэффициенты, значения которых приведены ниже;
 $\tau = \beta T$ – приведенная температура.

Значения β рассчитываются по формуле (в K^{-1}):

$$\beta = \frac{1}{\frac{\rho_4^{t_0}}{\gamma} + T_0}.$$

Для нефтепродуктов: $a_0 = -3,1495$; $a_1 = 2,744$; $a_2 = 1,0203$.

Температура отсчета (базовая) равна

$$T_0 = 20 + 273,15 = 293,15 \text{ К.}$$

Рассчитаем β и τ :

$$\beta = \frac{1}{\frac{0,7754}{0,000775} + 293,15} = 7,73 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1};$$

$$T = 100 + 273,15 = 373,15 \text{ К}; \tau = 7,73 \cdot 10^{-4} \cdot 373,15 = 0,2884.$$

Рассчитываем $B(T)$

$$B(T) = 38,42 \cdot (-3,1495 + 2,744 \cdot 0,2884 + \frac{1,0203}{0,2884}) = 45,32 \text{ МПа.}$$

Искомое значение коэффициента теплопроводности составит:

$$\lambda_{p,t} = \frac{0,1034}{1 - 0,1988 \ln \frac{45,32 + 10}{45,32 + 0,1013}} = 0,1076 \text{ Вт/(м·К).}$$

Пример 8.6. Для бинарной парогазовой смеси, состоящей из полярных компонентов метанол и вода и находящейся при $P = 0,1013$ МПа и $t = 98,2^\circ\text{C}$, рассчитать коэффициент диффузии по данным, приведенным в таблице.

Таблица 8.1 – Исходные данные к примеру

Метанол	Вода
$M_1 = 32,04$	$M_2 = 18,02$
$t_{к1} = 64,7^\circ\text{C}$	$t_{к2} = 100^\circ\text{C}$
$T_{кр1} = 512,6 \text{ К}$	$T_{кр2} = 647,4 \text{ К}$
$P_{кр1} = 6,8 \text{ МПа}$	$P_{кр2} = 21,76 \text{ МПа}$

$\rho_{кр1} = 272 \text{ кг/м}^3$	$\rho_{кр2} = 325 \text{ кг/м}^3$
$\mu_{p1} = 1,7 \text{ D}$	$\mu_{p2} = 1,85 \text{ D}$
$\frac{\varepsilon_1}{k_B} = 417 \text{ К}$	$\frac{\varepsilon_1}{k_B} = 775 \text{ К}$
$\sigma_1 = 3,69 \text{ \AA}$	$\sigma_2 = 2,52 \text{ \AA}$

Решение

Коэффициент диффузии в бинарной парогазовой смеси, состоящей из компонентов 1 и 2 при низких и умеренных давлениях рассчитывается по формуле [2,6] (в $\text{м}^2/\text{с}$):

$$D_{п} = 1,8826 \cdot 10^{-8} \cdot T^{3/2} [(M_1 + M_2) / M_1 M_2]^{1/2} / (P \sigma_{12}^2 \Omega_D),$$

где T – температура системы, К; M_1, M_2 – молярные массы компонентов смеси, кг/кмоль; P – давление в системе, МПа; σ_{12} – характеристическое расстояние, \AA ; Ω_D – интеграл столкновений для диффузии.

Характеристическое расстояние σ_{12} для полярных веществ определяется по формуле

$$\sigma_{12} = (\sigma_1 \sigma_2)^{0,5},$$

где σ_1, σ_2 – параметры потенциалов межмолекулярного взаимодействия Леннарда-Джонса для компонентов смеси.

Для полярных веществ интеграл столкновений определяется по формуле

$$\Omega_D = \Omega_0 + 0,19 \delta_{12}^2 / \tau^*,$$

где Ω_0 – интеграл столкновений для неполярных веществ; δ_{12} – параметр полярности смеси; τ^* – приведенная температура.

Интеграл столкновений Ω_0 определяют по формуле

$$\Omega_0 = 1,06036 / (\tau^*)^{0,15610} + 0,193 / \exp(0,47635 \tau^*) + 1,03587 / \exp(1,52996 \tau^*) + 1,76474 / \exp(3,89411 \tau^*).$$

Значение τ^* предварительно рассчитывают по формуле

$$\tau^* = T / (\varepsilon / k_B)_{1,2},$$

где $(\varepsilon / k_B)_{1,2}$ – характеристическая температура смеси, определяемая по данным для компонентов:

$$(\varepsilon / k_B)_{1,2} = [(\varepsilon / k_B)_1 (\varepsilon / k_B)_2]^{0,5},$$

где $(\varepsilon/k_B)_1, (\varepsilon/k_B)_2$ – параметры потенциалов межмолекулярного взаимодействия Леннарда-Джонса для компонентов смеси, определяемые по формуле

$$\varepsilon / k_B = 1,18 (1 + 1,3 \delta^2) T_K.$$

Параметр полярности смеси определяют по данным для компонентов

$$\delta_{12} = (\delta_1 \delta_2)^{0,5},$$

где δ_1, δ_2 – параметры полярности компонентов, рассчитываемые по формулам:

$$\begin{aligned} \delta &= 1940 \mu_p^2 / v_K T_K; \\ v_K &= 0,285 (1000 v_{кр})^{1,048}; \\ v_{кр} &= M / \rho_{кр}, \end{aligned}$$

где μ_p – дипольный момент молекулы компонента, Дебай; $v_K, v_{кр}$ – мольные объемы компонента при температурах кипения и критической, соответственно, m^3/kg .

Определим значения составляющих формулы для коэффициента диффузии (некоторые промежуточные результаты опущены).

Температура системы $T = 98,2 + 273,15 = 371,35$ К.

$$\frac{M_1 + M_2}{M_1 M_2} = \frac{32,04 + 18,02}{32,04 \cdot 18,02} = 8,6705 \cdot 10^{-2}.$$

$$\sigma_{12} = (\sigma_1 \sigma_2)^{0,5} = (3,69 \cdot 2,52)^{0,5} = 3,0453.$$

$$\Omega_D = \Omega_0 + 0,19 \delta_{12}^2 / \tau^* = 2,08129.$$

Тогда

$$D_{II} = 1,8826 \cdot 10^{-8} 371,35^{3/2} \frac{(8,6705 \cdot 10^{-2})^{1/2}}{0,1013 \cdot 3,0453^2 \cdot 2,08129} = 2,029 \cdot 10^{-5} m^2/c.$$

Пример 8.7. Рассчитать коэффициент диффузии в бинарной жидкой смеси метанол – вода при $P = 0,1013$ МПа и $t = 98,2^\circ C$ по данным, приведенным в таблице. Мольная доля метанола равна 0,01, а вязкость смеси составляет $\mu_{см} = 0,9624$ мПа·с.

Таблица 8.2 – Исходные данные к примеру

Метанол	Вода
---------	------

$M_1 = 32,04 \text{ кг/кмоль}$	$M_2 = 18,02 \text{ кг/кмоль}$
$v_{к1} = 42,207 \text{ см}^3/\text{моль}$	$v_{к2} = 19,16 \text{ см}^3/\text{моль}$
$\mu_1 = 0,38 \text{ мПа}\cdot\text{с}$	$\mu_2 = 0,9743 \text{ мПа}\cdot\text{с}$
$\varnothing_1 = 1,9$	$\varnothing_2 = 2,6$

Решение

Коэффициент диффузии в бинарной жидкой смеси, состоящей из компонентов 1 и 2, рассчитывается по формуле [6] (в $\text{м}^2/\text{с}$):

$$D_{\text{ж}} = (D_{12}^0 \mu_2)^{X_2} (D_{21}^0 \mu_1)^{X_1} / \mu_{12},$$

где D_{12}^0 , D_{21}^0 – коэффициенты диффузии в разбавленном растворе компонента 1 в растворителе 2 и наоборот, $\text{м}^2/\text{с}$; μ_1 , μ_2 , μ_{12} – коэффициенты динамической вязкости компонентов 1, 2 и их смеси в жидкой фазе при параметрах системы, $\text{мПа}\cdot\text{с}$; X_1 , X_2 – мольные доли компонентов.

Значения коэффициентов D^0 рассчитываются по формулам:

$$D_{12}^0 = 7,4 \cdot 10^{-12} (\varnothing M_2)^{0,5} \text{ Г} / (\mu_2 v_{к1}^{0,6});$$

$$D_{21}^0 = 7,4 \cdot 10^{-12} (\varnothing M_1)^{0,5} \text{ Г} / (\mu_1 v_{к2}^{0,6}),$$

где \varnothing – фактор ассоциации растворителя; $v_{к1}$, $v_{к2}$ – мольные объемы компонентов при нормальных температурах кипения, $\text{см}^3/\text{моль}$.

Температура системы равна

$$T = t + 273,15 = 98,2 + 273,15 = 371,35 \text{ К}.$$

Определяем значения D_{12}^0 , D_{21}^0 :

$$D_{12}^0 = 7,4 \cdot 10^{-12} \cdot (2,6 \cdot 18,02)^{0,5} \cdot 371,35 / (0,9743 \cdot 42,207^{0,6}) = 2,044 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$D_{21}^0 = 7,4 \cdot 10^{-12} \cdot (1,9 \cdot 32,04)^{0,5} \cdot 371,35 / (0,38 \cdot 19,16^{0,6}) = 9,594 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Тогда

$$D_{1,2} = \frac{(2,044 \cdot 10^{-9} \cdot 0,9743)^{1-0,01} (9,594 \cdot 10^{-9} \cdot 0,38)^{0,01}}{0,9624} = 2,082 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Пример 8.8. Рассчитать скорость звука в жидкой фракции 140 – 240 мангышлакской нефтесмеси при $T = 423,15 \text{ К}$, если известны следующие ее характеристики: $M = 149,8 \text{ кг/кмоль}$; $T_{\text{кр}} = 637,8 \text{ К}$.

Решение

Расчет скорости звука может проводиться по формуле (в м/с)

$$U = 2,1316 \cdot \frac{1}{\tau^2} \cdot \sqrt{\frac{R \cdot T}{M}},$$

где $\tau = T / T_{кр}$ – приведенная температура; R – универсальная газовая постоянная $R=8314$ Дж/(кмоль·К); M – молярная масса, кг/кмоль.

Приведенная температура равна

$$\tau = 423,15 / 637,8 = 0,6635.$$

Скорость звука составит

$$U = 2,1316 \cdot \frac{1}{0,6635^2} \cdot \sqrt{\frac{8314 \cdot 423,15}{149,8}} = 742 \text{ м/с.}$$

Литература

1. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1981.– 560 с.
2. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей.– Л.: Химия, 1982.– 592 с.
3. Справочник химика / Под ред. Б.П. Никольского.– Л.: Химия, т. 1, 1963.– 1071 с.; т. 2, 1965.– 1168 с.; т. 3, 1965.– 1008 с.; т. 4, 1967.– 920 с.; т. 5, 1968– 974 с.; т. 6, 1967.– 1012 с.
4. Справочник нефтехимика. Т. 1 / Под ред. С.К. Огородникова. – Л.: Химия, 1978.– 496 с.
5. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972.– 720 с.
6. Морачевский А.Г., Сладков И.Б. Физико-химические свойства молекулярных неорганических соединений (экспериментальные данные и методы расчета). – СПб.: Химия, 1996.– 312 с.
7. Расчеты основных процессов и аппаратов нефтепереработки. Справочник. /Под ред. Е.Н. Судакова.– М.: Химия, 1979.– 568 с.
8. Филиппов Л.П. Прогнозирование теплофизических свойств жидкостей и газов.– М.: Энергоатомиздат, 1988.– 168 с.

9. Рудин М.Г., Драбкин А.Е. Краткий справочник нефтепереработчика. – Л.: Химия, 1980.– 328 с.
10. Рудин М.Г. Карманный справочник нефтепереработчика. – Л.: Химия, 1989.– 464 с.
11. Кузнецов А.А., Судаков Е.Н. Расчеты основных процессов и аппаратов переработки углеводородных газов. Справочное пособие. – М.: Химия, 1983.– 224 с.
12. Справочник азотчика – М.: Химия, 1986.– 512 с.
13. Информационное сопровождение проектирования химического оборудования: Электронный курс лекций. / А.И. Свидченко. Ставрополь: СКФУ. 2019.
14. Свидченко А.И. Расчет свойств рабочих веществ химической технологии. Физико-химические характеристики. Методические указания к практическим занятиям по дисциплине "Процессы и аппараты химической технологии" для студентов специальностей 170500 – «Машины и аппараты химических производств» и 250200 – «Химическая технология неорганических веществ». – Ставрополь: СевКавГТУ, 2002. 29 с.

***ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР ХИМИЧЕСКИХ
ПРОИЗВОДСТВ***

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к практическим занятиям для студентов направления
15.03.02 Технологические машины и оборудование

Составитель *доц. А.И. Свидченко*

Рецензент *доц. А.Л. Проскурнин*

Редактор

Подписано в печать Формат 60 x 84 1/16
Уч.-изд. л. Усл. печ. л. Тираж Заказ №
Невинномысский технологический институт (филиал)
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Отпечатано в типографии НТИ
357108, г. Невинномысск, ул. Гагарина, 1