

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

О.Б. Цветков, Ю.А. Лаптев, Д.Г. Волков

**МЕТОДЫ РАСЧЕТА СВОЙСТВ ПЕРЕНОСА
РАБОЧИХ ВЕЩЕСТВ
ХОЛОДИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ**

Учебно-методическое пособие

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2016

УДК 553.1

Методы расчета свойств переноса рабочих веществ холодильной техники: Учеб.-метод. пособие/ О.Б. Цветков, Ю.А. Лаптев, Д.Г. Волков. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 63 с.

В доступной форме излагаются основы теории и расчета свойств переноса газов и их смесей при различных температурах. Приведены значения интегралов столкновения для модельных потенциалов. Даны примеры расчета динамической вязкости, теплопроводности, коэффициентов диффузии и самодиффузии хладагентов. В приложении приведены таблицы свойств переноса галогенпроизводных предельных углеводородов, используемых в технике низких температур.

Предназначено для бакалавров, обучающихся по направлениям: 14.03.01 по дисциплинам «Термодинамика»; 15.03.04, 16.03.03, 23.03.03 – «Основы термодинамики и теплопередачи»; 19.03.02, 19.03.03 – «Теоретические основы тепло- и хладотехники»; 18.03.02 – «Основы тепло- и хладотехники»; 19.03.01 – «Биотехнология»; 15.03.02 – «Термодинамика и теплообмен» всех форм обучения.

Рецензент: доктор техн. наук, проф. В.А. Рыков

Рекомендовано к печати Советом факультета холодильной, криогенной техники и кондиционирования, протокол № 2 от 30.10.2015 г.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 – 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2016

© Цветков О.Б., Лаптев Ю.А., Волков Д.Г., 2016

ВВЕДЕНИЕ

Важная роль среди теплофизических характеристик принадлежит свойствам переноса: диффузии, вязкости и теплопроводности. Расчеты тепло- и массообменных аппаратов низкотемпературных установок практически невозможны без данных об этих свойствах. Причем качество тепловых расчетов непосредственно зависит от достоверности этих данных. Использование точных данных о свойствах переноса повышает энергоэффективность за счет снижения затрат топлива, электроэнергии, металла, капитальных затрат.

Этим обстоятельством можно объяснить включение разделов о теплофизических свойствах веществ в учебники и учебные пособия по технической термодинамике, теории тепло- и массообмена, в профессиональных монографий. При написании данного учебно-методического пособия авторы, опираясь на предшествующий опыт, стремились использовать последние достижения в области теплофизики и промышленной экологии, которые оказались существенными для подготовки бакалавров, магистров и аспирантов Университета ИТМО.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- D_{12} – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$
 D_{11} – коэффициент самодиффузии, $\text{м}^2/\text{с}$
 η – динамическая вязкость, $\text{Па}\cdot\text{с}$
 λ – теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$
 ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$
 c_p, c_v – удельная теплоемкость идеального газа при $p = \text{const}$
и $v = \text{const}$, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
 M – молекулярная масса, $\text{кг}/\text{кмоль}$
 T – температура, К
 p – давление, Па
 $\epsilon/k, \sigma$ – параметры потенциалов межмолекулярного
взаимодействия, $\text{К}, \text{Å}$
 μ – дипольный момент молекулы, Д
 $\Omega^{(l,s)*}(T^*)$ – приведенный интеграл столкновений
 T^* – приведенная температура, $T^* = T(\epsilon/k)^{-1}$
 Kn – критерий Кнудсена
 Pr – критерий Прандтля
 $T_{\text{кр}}$ – температура в критической точке, К
 $p_{\text{кр}}$ – давление в критической точке, МПа
 $Z_{\text{вр}}$ – число столкновений для вращательной релаксации
 x – мольные доли компонентов
 n – число атомов углерода в молекуле газа
 τ – приведенная температура, $\tau = T/T_{\text{кр}}$
 $\Phi(\tau)$ – температурная функция теплопроводности
 ν – кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$
 $\rho_{\text{кр}}$ – плотность в критической точке, $\text{кг}/\text{м}^3$
 $T_{\text{н.к}}$ – температура кипения при нормальном ($101,3 \text{ кПа}$)
давлении, К
 R – удельная газовая постоянная, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$

ИНДЕКСЫ

- см – смесь
 i – компонент смеси

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ

Диффузия, вязкость и теплопроводность относятся к явлениям переноса, возникающим в газах и жидкостях. Диффузия представляет собой перенос массы из одной области в другую при наличии градиента концентрации; вязкость – перенос импульса (количества движения) вследствие градиента скорости; теплопроводность – перенос тепловой энергии в результате градиента температуры.

Достаточно полное описание явлений переноса приводится в разделах молекулярной физики. В этом случае молекулы газа рассматриваются как твердые сферы диаметром σ , не притягивающиеся друг к другу, движущиеся с одинаковой скоростью в направлении, параллельном одной из координатных осей.

Коэффициент диффузии равен плотности потока молекул вследствие единичного градиента плотности числа частиц и в соответствии с элементарной кинетической теорией имеет вид

$$D_{11} = \frac{1}{3} LW, \quad (1.1)$$

где L – длина свободного пробега молекулы; W – средняя арифметическая скорость молекул.

В выражении (1.1) D_{11} является коэффициентом самодиффузии, т. е. диффузии частиц одинаковой массы и одинакового размера. Примерами самодиффузии могут служить диффузия орто- и параразновидностей газа (например, водорода) и диффузия тяжелых изотопов.

Вязкость численно равна плотности потока импульса, создаваемого единичным градиентом скорости,

$$\eta = \frac{1}{3} LW\rho. \quad (1.2)$$

Соответственно для теплопроводности, представляющей собой плотность потока энергии, вызванного единичным градиентом температуры, элементарная кинетическая теория позволяет записать

$$\lambda = \frac{1}{3} LW\rho c_v. \quad (1.3)$$

Расшифровка входящих в уравнения (1.1)–(1.3) величин для модели газа, состоящего из твердых сфер, позволяет уточнить приведенные выше зависимости для коэффициентов переноса [1]

$$D_{11} = 2,6620 \cdot 10^{-4} \frac{\sqrt{T^3/M}}{p\sigma^2}, \quad (1.4)$$

$$\eta = 2,67 \cdot 10^{-6} \frac{\sqrt{MT}}{\sigma^2}, \quad (1.5)$$

$$\lambda = 8,33 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{T/M}}{\sigma^2}. \quad (1.6)$$

Из уравнений (1.4)–(1.6) видно, что коэффициент диффузии изменяется пропорционально абсолютной температуре в степени 3/2 и обратно пропорционально давлению. Вязкость и теплопроводность независимы от давления и возрастают с повышением температуры как квадратные корни из T . Все свойства переноса обратно пропорциональны квадрату диаметра молекул.

Соотношения (1.4)–(1.6) справедливы для молекул, являющихся твердыми сферами. Для молекул реальных газов их использование ограничено. Вместе с тем из соотношений (1.4)–(1.6) вытекает целый ряд практически полезных выводов. Здесь представляет интерес, в частности, рассмотрение безразмерных комплексов: критериев Прандтля $Pr = \eta c_p / \lambda$ и Шмидта $Pr_D = \eta / \rho D_{11}$.

Поскольку отношение удельных теплоемкостей c_p / c_v для одноатомных газов (а именно для этих газов наиболее близка к действительности модель твердых сфер) теоретически постоянно и равно 5/3, значение критерия Прандтля должно быть постоянно и равно 0,67, а критерий Шмидта (часто его называют также диффузионным критерием Прандтля) должен иметь значение 0,83. Экспериментальные значения этих комплексов при $t = 0$ °С и $p = 0,101$ МПа приведены в табл. 1.1 [1].

Значения критериев Прандтля и Шмидта

| Критерий | Газ | | | | | | |
|-----------------|------|------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| | Ne | Ar | N ₂ | CH ₄ | O ₂ | CO ₂ | H ₂ |
| Pr | 0,66 | 0,67 | 0,71 | 0,74 | 0,72 | 0,75 | 0,71 |
| Pr _D | 0,73 | 0,75 | 0,74 | 0,70 | 0,74 | 0,71 | 0,73 |

Уравнения для расчета свойств переноса, выведенные из представлений элементарной кинетической теории газов, не являются строгими. При описании свойств реальных газов необходимо учитывать сложный характер межмолекулярного взаимодействия, поскольку реальные молекулы притягиваются друг к другу на больших расстояниях и отталкиваются друг от друга, когда межмолекулярное расстояние становится очень малым (порядка 10^{-10} м).

Межмолекулярные силы бывают двух типов: коротко- и дальнедействующие. Короткодействующие силы чаще называют валентными или химическими силами. Короткодействующие силы возникают тогда, когда молекулы настолько сближаются друг с другом, что их электронные облака перекрываются.

Среди дальнедействующих сил можно выделить три составляющие: электростатическую, индуцированную и дисперсионную.

Электростатическая составляющая межмолекулярных сил проявляется как воздействие электрических сил, если взаимодействующие молекулы обладают дипольными моментами. Диполи притягиваются друг к другу, происходит взаимная ориентация молекул. Это дает основание в ряде работ называть электростатическую составляющую ориентационным межмолекулярным взаимодействием.

Каждая молекула обладает поляризуемостью. Индуцированная составляющая характеризует, таким образом, взаимодействие индуцированных диполей, вызванных воздействием на молекулу внешних сил, например, электрического поля.

Более сложным является дисперсионное взаимодействие, которое для неполярных молекул является главной составляющей сил,

действующих на больших расстояниях (нередко ее называют силой Ван-дер-Ваальса). Дело в том, что, хотя в среднем дипольный момент неполярной молекулы равен нулю, в отдельные мгновения он отличен от нуля, и поэтому взаимодействие неполярных молекул возможно. Предложенная здесь картина взаимодействия, естественно, упрощена, и строгий расчет дисперсионного взаимодействия возможен лишь в рамках квантово-механических представлений.

За исключением случаев взаимодействия простейших молекул, строгий расчет сил межмолекулярного взаимодействия выходит за рамки современных вычислительных возможностей, поэтому конструируют различные модельные потенциалы, описывающие основные свойства межмолекулярного взаимодействия и включающие в себя небольшое число (два-четыре) свободных параметров, значения которых подбирают, исходя из экспериментальных данных, в частности, о свойствах переноса.

На рис. 1.1 схематически изображены различные модельные потенциалы межмолекулярного взаимодействия, которые оказались достаточно полезными и часто применяются. Рассмотрим некоторые качественные и количественные аспекты этих потенциалов [1].

Потенциал твердой сферы

Это простейшая, так называемая однопараметрическая модель (рис. 1.1, а). Она содержит только один параметр – диаметр сферы σ . Модель наглядна, но далека от реальности, поскольку на малых расстояниях потенциал взаимодействия $\varphi(r)$ растет слишком круто, а на больших расстояниях модель совершенно не учитывает межмолекулярного взаимодействия

$$\varphi(r) = \infty, \quad r < \sigma,$$

$$\varphi(r) = 0, \quad r > \sigma.$$

Эту модель использовали в элементарной кинетической теории газа, о чем упоминалось ранее.

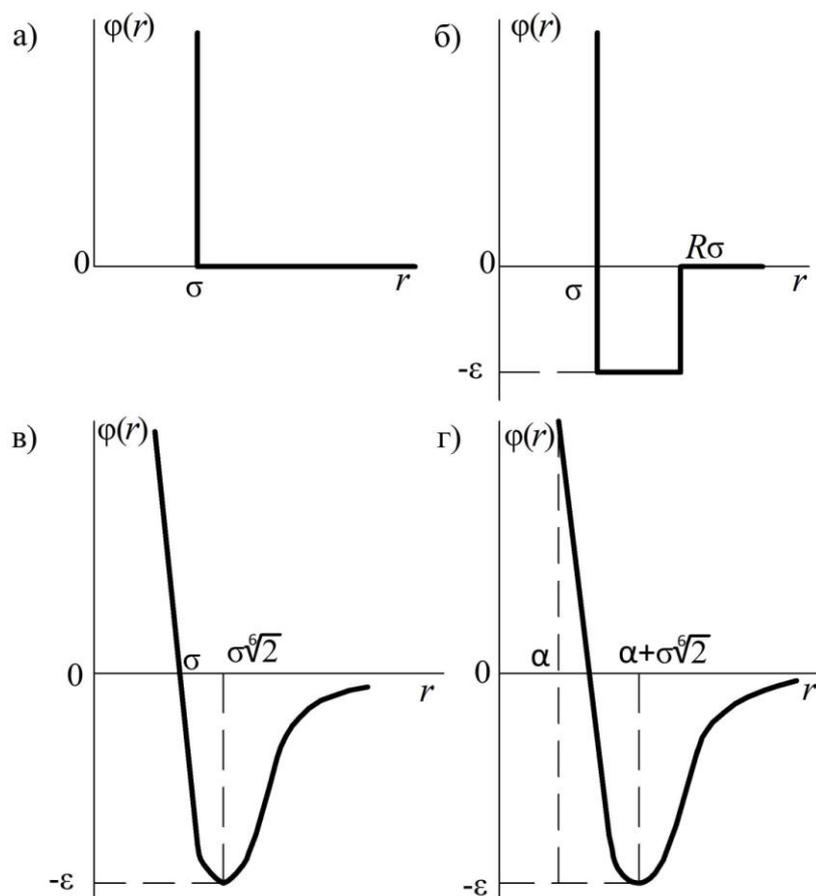


Рис. 1.1. Графическое представление модельных потенциалов:
а – модель твердой сферы; б – модель прямоугольной ямы; в – потенциал
Леннарда–Джонса; г – потенциал Кихары

Модель прямоугольной потенциальной ямы

Эта модель принимает в расчет как силы отталкивания, так и силы притяжения (рис. 1.1, б). Она имеет вид

$$\varphi(r) = \infty, \quad r < \sigma;$$

$$\varphi(r) = -\varepsilon, \quad \delta < r < R\sigma;$$

$$\varphi(r) = 0, \quad r > R\sigma.$$

Модель содержит три произвольных параметра: σ , ε , $R\sigma$ ($R\sigma$ – численный коэффициент). Потенциал прямоугольной ямы удобен в расчетах и в ряде случаев позволяет получить хорошие результаты.

Потенциал Леннарда-Джонса

Модель Леннарда-Джонса (рис.1.1, в) имеет достаточно широкое применение и описывается уравнением вида

$$\varphi(r) = \frac{\alpha}{r^\delta} - \frac{c}{r^\gamma}.$$

Первый член уравнения описывает энергию отталкивания, второй – энергии притяжения. Это уравнение обычно записывают как

$$\varphi(r) = 4\varepsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right]$$

и называют потенциалом (6-12) Леннарда-Джонса. Параметры ε и σ являются постоянными, характеризующими химическую разновидность взаимодействующих молекул. Параметр σ определяет значение расстояния r между молекулами, при котором потенциал взаимодействия $\varphi(r) = 0$. Величина ε – максимальное значение энергии притяжения (глубина потенциальной ямы), которое соответствует $r = 2^{1/6}\sigma$.

Потенциал Леннарда-Джонса имеет достаточно близкую к реальной картине межмолекулярного взаимодействия форму, однако выбор значений показателей степени 6 и 12 не является единственно возможным. В ряде работ предложены другие, более подходящие, значения параметров потенциала δ и γ , например, $\delta = 18$.

Потенциал Кихары

Потенциал Кихары (рис. 1.1, г) имеет вид

$$\varphi(r) = 4\varepsilon \left[\left(\frac{\sigma}{\rho} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{\rho} \right)^6 \right],$$

где $\rho = r - a$.

По сравнению с моделью Леннарда-Джонса появился третий параметр a – минимально допустимое расстояние между молекулами, при котором потенциальная функция обращается в бесконечность.

Потенциал Кихары по некоторым сведениям позволяет лучше согласовать экспериментальные данные о свойствах переноса и равновесных характеристиках газов.

Потенциал Штокмайера

Для систем, состоящих из полярных молекул, используют так называемый потенциал Штокмайера

$$\varphi(r) = 4\varepsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] - \frac{\mu_1 \mu_2}{r^3} \xi,$$

где ξ – множитель, учитывающий зависимость энергии взаимодействия от углов ориентации диполей.

Легко заметить, что потенциал Штокмайера является суперпозицией двух моделей: модели (6-12) Леннарда-Джонса и потенциала диполь-дипольного взаимодействия. Действительно, если μ_1 или μ_2 стремятся к нулю, имеем потенциал Леннарда-Джонса. Как и для модели Леннарда-Джонса, шестая степень описывает притяжение молекул, а двенадцатая степень описывает отталкивающую часть потенциала. Минус третья степень в потенциале Штокмайера учитывает только диполь-дипольное взаимодействие.

Изучение межмолекулярного взаимодействия весьма существенно для исследования свойств и структуры жидкостей, молекулярных кристаллов. Многие физические явления, играющие важную роль в технике, определяются, в конечном счете, межмолекулярными силами. Полезно знать, что характер межмолекулярного взаимодействия оказывает также значительное влияние на свойства переноса.

Согласно современной строгой кинетической теории все свойства переноса оказывается возможным выразить через так называемые интегралы столкновений $\Omega^{(l,s)}$. Эти интегралы учитывают всю динамику столкновения молекулы и, следовательно, закон действия межмолекулярных сил. Обычно, в записи выражений для интегралов индекс l означает число молекул, которые одновременно сталкиваются; индекс s – число молекул, влияющих на поведение данной моле-

кулы. Заметим, что s не может быть меньше l . Если $l = 1$, молекулы вообще не сталкиваются. При $l = 2$ сталкиваются две молекулы, при $l = 3$ – три молекулы.

Формулы строгой молекулярно-кинетической теории, включающие интегралы столкновений для динамической вязкости, имеют вид [1]

$$\eta = 2,6693 \cdot 10^{-6} \frac{\sqrt{MT}}{\sigma^2 \Omega^{(2,2)*}(T^*)}, \quad (1.7)$$

где $\Omega^{(2,2)*}(T^*)$ – приведенный интеграл столкновений; ε/k – параметр модельного потенциала, К.

Для теплопроводности

$$\lambda = 8,3280 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{T/M}}{\sigma^2 \Omega^{(2,2)*}(T^*)}. \quad (1.8)$$

Для коэффициента самодиффузии строгая молекулярно-кинетическая теория приводит к следующему выражению

$$D_{11} = 2,6628 \cdot 10^2 \frac{\sqrt{T^3/M}}{\rho \sigma^2 \Omega^{(1,1)*}(T^*)}, \quad (1.9)$$

где $\Omega^{(1,1)*}(T^*)$ – приведенный интеграл столкновений.

Коэффициент диффузии бинарной смеси газов может быть вычислен по формуле

$$D_{12} = 2,6628 \cdot 10^2 \frac{\sqrt{(M_1 + M_2)T^3/2M_1M_2}}{\rho \sigma_{12}^2 \Omega_{12}^{(1,1)*}(T^*)}, \quad (1.10)$$

где σ_{12} – параметр потенциальной функции, характеризующий взаимодействие молекул компонентов бинарной газовой смеси, 10^{-10} м; $\Omega_{12}^{(1,1)*}(T^*)$ – приведенный интеграл столкновений для бинарной смеси.

Подчеркнем, что для вычисления свойств переноса газовой смеси используют комбинационные соотношения (правила смешения

ния). Так, расстояние σ_{12} между центрами двух молекул с диаметрами σ_1 и σ_2 при их столкновении вычисляется по простой зависимости

$$\sigma_{12} = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2). \quad (1.11)$$

Для глубины потенциальной ямы ε_{12} имеем комбинационное соотношение

$$\varepsilon_{12}\sigma_{12}^6 = \sqrt{\varepsilon_{12}\sigma_1^6\varepsilon_1\sigma_2^6}. \quad (1.12)$$

Зная ε_{12} , определяют $T^* = T(\varepsilon/k)^{-1}$ и по величине T^* , используя специальные таблицы, находят интеграл столкновений $\Omega_{12}^{(1,1)*}(T^*)$.

Не вдаваясь в детали строгой кинетической теории газов (этот материал выходит за рамки настоящего курса), отметим, что в целом можно считать разработку теории завершенной. Существенны, однако, допущения, принятые при построении этой теории и ограничивающие возможности ее применения.

Прежде всего, уравнения (1.7)–(1.10) описывают поведение газов при малых плотностях и состоящих из одноатомных молекул (молекулы не имеют внутренних степеней свободы, потенциал взаимодействия сферически симметричен). Молекулы многоатомных газов обладают внутренними степенями свободы, их потенциал взаимодействия, строго говоря, не является сферически симметричной функцией. Эти два фактора различным образом влияют на коэффициенты переноса. Влияние внутренней энергии молекул отражается в первую очередь на тех коэффициентах переноса, которые связаны с переносом молекулами кинетической энергии. Вязкость и коэффициент диффузии несущественно зависят от наличия внутренних степеней свободы. На практике теория одноатомных газов успешно применяется для расчетов η и D многоатомных молекул при условии, что форма молекул не слишком отличается от сферической. Еще раз подчеркнем, что уравнение (1.8) применимо для расчета теплопроводности только молекул одноатомных газов (таких, как криптон, ксенон, аргон, неон, диссоциированные газы).

Существуют верхний ρ_{\max} и нижний ρ_{\min} плотностные пределы применимости уравнений (1.7)–(1.10).

При очень малых плотностях газ не является сплошным, а скорее проявляет свойства дискретной среды: молекулы газа в этом случае чаще сталкиваются со стенками содержащего газ сосуда, чем друг с другом. Минимальное предельное значение плотности газа можно оценить из условия [1]–[3].

$$\text{Kn} = \frac{L}{\delta} \sim 0,1,$$

где δ – характерный размер сосуда; L – средняя длина свободного пробега молекул.

Причем

$$L = \frac{3\eta}{\rho} \sqrt{\frac{\pi M}{8kT}}.$$

При $p = 0,1$ МПа средняя длина свободного пробега L очень мала (порядка 10^{-7} м). Однако с понижением давления L резко возрастает и при $p = 0,01$ Па может составлять около 0,5 м. Расчеты показывают, например, что минимально допустимая для применения уравнений (1.7)–(1.10) плотность неона, находящегося в трубке диаметром 2 мм при $T = 300$ К, соответствует давлению 200 Па.

Кинетическая теория рассматривает только парные столкновения, результаты ее неприменимы при больших плотностях, когда коэффициенты переноса начинают зависеть от столкновений трех и более молекул. Предельное значение плотности ρ_{max} можно оценить, по величине приведенной длины свободного пробега

$$l^* = \frac{L}{\sigma}.$$

Формулы (1.7)–(1.10) можно использовать с погрешностью 1 % до значений $l^* \sim 30$, с погрешностью 2 % до $l^* \sim 12$, а с погрешностью 5 % до $l^* \sim 6$.

Проведенные расчеты показывают, что для аргона и неона при $T = 300$ К ошибка не более 2 % соответствует давлению 3 МПа. Этот факт подтверждается экспериментально, и поэтому в диапазоне дав-

лений от 133 Па до 2–3 МПа свойства переноса при инженерных расчетах можно считать зависящими только от температуры, а влияние давления не учитывать [3].

Подчеркнем, однако, что погрешность расчета по формулам (1.7)–(1.10) резко возрастает вблизи кривой насыщения и в околоскритической области.

Практическое использование уравнений строгой кинетической теории для расчета свойств переноса требует решения вопроса о выборе модельного потенциала. С инженерной точки зрения для большинства газов со сферически симметричным силовым полем молекул удовлетворительные результаты достигаются при применении потенциалов (6-12) Леннарда-Джонса и Штокмайера.

Погрешность расчета значений свойств переноса с помощью этих моделей соизмерима с точностью экспериментальных данных и составляет величину порядка 1–2 %.

Потенциалы Леннарда-Джонса и Штокмайера являются всего лишь очередным приближением к истинному потенциалу межмолекулярного взаимодействия и их возможности, естественно, ограничены. В частности, набором постоянных значений параметров потенциала удастся описать поведение кинетических коэффициентов лишь в ограниченном интервале температур.

Параметры модельных потенциалов на практике обычно определяют не теоретически, а из экспериментальных данных, предполагая наличие табулированных величин приведенных интегралов столкновений. Такие табуляции приведены для интегралов $\Omega_{12}^{(1,1)*}(T^*)$ и $\Omega_{12}^{(2,2)*}(T^*)$ в табл. 1.2–1.3.

Удобно использовать аппроксимирующие выражения для температурной зависимости приведенных интегралов столкновений. Для потенциала Леннарда-Джонса аппроксимирующие функции имеют вид

$$\Omega_{12}^{(2,2)*}(T^*) = \frac{1,155}{(T^*)^{0,1462}} + \frac{0,3945}{\exp(0,6672 T^*)} - \frac{2,05}{\exp(2,168 T^*)}, \quad (1.13)$$

$$\Omega^{(1,1)*}(T^*) = \frac{1,069}{(T^*)^{0,1580}} - \sum_{i=1}^3 a_i \exp(-b_i T^*), \quad (1.14)$$

где $a_1 = 0,3445$; $a_2 = 1,556$; $a_3 = 1,976$; $b_1 = 0,6537$; $b_2 = 2,099$; $b_3 = 6,488$.

Вышеприведенные уравнения воспроизводят табличные значения интегралов в интервале $0,4 \leq T^* \leq 90$ со средней погрешностью не более 0,13 %. Аналогичным образом можно рассчитать интеграл столкновений потенциала Штокмайера.

$$\Omega^{(2,2)*}(T^*) = \sum_{i=0}^n A_i (T^*)^i. \quad (1.15)$$

Коэффициенты полинома (1.15) имеют следующие значения для $0,5 \leq T^* \leq 3,5$:

– для $\delta = 0,25$: $A_0 = 4,10224$; $A_1 = -5,70801$; $A_2 = 5,38039$; $A_3 = -2,98366$; $A_4 = 0,96516$; $A_5 = -0,16786$;

– для $\delta = 0,5$: $A_0 = 4,19562$; $A_1 = -5,87522$; $A_2 = 5,62974$; $A_3 = -3,18506$; $A_4 = 1,04923$; $A_5 = -0,18522$; $A_6 = 0,01350$, где $\delta = \mu^2/2\varepsilon\sigma^3$ – приведенный дипольный момент.

Результаты определений параметров потенциалов Леннарда-Джонса и Штокмайера путем сравнения теоретических и экспериментальных данных для вязкости приведены в табл. 1.4. Они дают хорошее согласование расчетов по строгой кинетической теории для вязкости с экспериментом. Важно, что, используя значения параметров, полученные по результатам экспериментального исследования вязкости, представляется возможным рассчитать другие свойства переноса: теплопроводность и коэффициент диффузии.

Значение интегралов $\Omega^{(l,s)*}(T^*)$ для потенциала (6-12) Леннарда-Джонса

| T^* | $\Omega^{(1,1)*}$ | $\Omega^{(2,2)*}$ | T^* | $\Omega^{(1,1)*}$ | $\Omega^{(2,2)*}$ |
|-------|-------------------|-------------------|-------|-------------------|-------------------|
| 0,30 | 2,662 | 2,785 | 1,45 | 1,215 | 1,333 |
| 0,35 | 2,476 | 2,628 | 1,50 | 1,198 | 1,314 |
| 0,40 | 2,318 | 2,492 | 1,55 | 1,182 | 1,296 |
| 0,45 | 2,184 | 2,368 | 1,60 | 1,167 | 1,279 |
| 0,50 | 2,066 | 2,257 | 1,65 | 1,153 | 1,264 |
| 0,55 | 1,966 | 2,156 | 1,70 | 1,140 | 1,248 |
| 0,60 | 1,877 | 2,065 | 1,75 | 1,128 | 1,234 |
| 0,65 | 1,798 | 1,982 | 1,80 | 1,116 | 1,221 |
| 0,70 | 1,729 | 1,908 | 1,85 | 1,105 | 1,209 |
| 0,75 | 1,667 | 1,841 | 1,90 | 1,094 | 1,197 |
| 0,80 | 1,612 | 1,780 | 1,95 | 1,084 | 1,186 |
| 0,85 | 1,562 | 1,725 | 2,00 | 1,075 | 1,175 |
| 0,90 | 1,517 | 1,675 | 2,10 | 1,057 | 1,156 |
| 0,95 | 1,476 | 1,629 | 2,20 | 1,041 | 1,138 |
| 1,00 | 1,439 | 1,587 | 2,30 | 1,026 | 1,122 |
| 1,05 | 1,406 | 1,549 | 2,40 | 1,012 | 1,107 |
| 1,10 | 1,375 | 1,514 | 2,50 | 0,9996 | 1,093 |
| 1,15 | 1,346 | 1,482 | 2,60 | 0,9878 | 1,081 |
| 1,20 | 1,320 | 1,452 | 2,70 | 0,9770 | 1,069 |
| 1,25 | 1,296 | 1,424 | 2,80 | 0,9672 | 1,058 |
| 1,30 | 1,273 | 1,399 | 2,90 | 0,9576 | 1,048 |
| 1,35 | 1,253 | 1,375 | 3,00 | 0,9490 | 1,039 |
| 1,40 | 1,233 | 1,353 | — | — | — |

Значение интегралов $\Omega^{(l,s)*}(T^*, \delta)$ для потенциала Штокмайера1.3.1. Интеграл $\Omega^{(1,1)*}(T^*, \delta)$

| T^* | δ | | | | | |
|-------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0 | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 1,0 | 1,5 |
| 0,1 | 4,0079 | 4,002 | 4,655 | 5,521 | 6,454 | 8,214 |
| 0,2 | 3,1300 | 3,164 | 3,355 | 3,721 | 4,198 | 5,230 |
| 0,3 | 2,6494 | 2,637 | 2,770 | 3,002 | 3,319 | 4,054 |
| 0,4 | 2,3144 | 2,320 | 2,402 | 2,572 | 2,812 | 3,386 |
| 0,5 | 2,0661 | 2,073 | 2,140 | 2,278 | 2,472 | 2,946 |
| 0,6 | 1,8767 | 1,885 | 1,944 | 2,060 | 2,225 | 2,628 |
| 0,7 | 1,7293 | 1,738 | 1,791 | 1,893 | 2,036 | 2,388 |
| 0,8 | 1,6122 | 1,622 | 1,670 | 1,760 | 1,886 | 2,198 |
| 0,9 | 1,5175 | 1,527 | 1,572 | 1,653 | 1,765 | 2,044 |
| 1,0 | 1,4398 | 1,450 | 1,490 | 1,564 | 1,665 | 1,917 |
| 1,2 | 1,3204 | 1,330 | 1,364 | 1,425 | 1,509 | 1,720 |
| 1,4 | 1,2336 | 1,242 | 1,272 | 1,324 | 1,394 | 1,573 |
| 1,6 | 1,1679 | 1,176 | 1,202 | 1,246 | 1,306 | 1,461 |
| 1,8 | 1,1166 | 1,124 | 1,146 | 1,185 | 1,237 | 1,372 |
| 2,0 | 1,0753 | 1,082 | 1,102 | 1,135 | 1,181 | 1,300 |
| 2,5 | 1,0006 | 1,005 | 1,020 | 1,046 | 1,080 | 1,170 |
| 3,0 | 0,95003 | 0,9538 | 0,9656 | 0,9852 | 1,012 | 1,082 |
| 3,5 | 0,91311 | 0,9162 | 0,9256 | 0,9413 | 0,9626 | 1,019 |
| 4,0 | 0,88453 | 0,8871 | 0,8948 | 0,9076 | 0,9252 | 0,9721 |
| 5,0 | 0,84277 | 0,8446 | 0,8501 | 0,8592 | 0,8716 | 0,9053 |
| 6,0 | 0,81287 | 0,8142 | 0,8183 | 0,8251 | 0,8344 | 0,8598 |
| 7,0 | 0,78976 | 0,7908 | 0,7940 | 0,7993 | 0,8066 | 0,8265 |
| 8,0 | 0,77111 | 0,7720 | 0,7745 | 0,7788 | 0,7846 | 0,8007 |
| 9,0 | 0,75553 | 0,7562 | 0,7584 | 0,7619 | 0,7667 | 0,7800 |
| 10,0 | 0,74220 | 0,7428 | 0,7446 | 0,7475 | 0,7515 | 0,7627 |

1.3.2. Интеграл $\Omega^{(2,2)}(T^*, \delta)$

| T^* | δ | | | | | |
|-------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0 | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 1,0 | 1,5 |
| 0,1 | 4,1005 | 4,266 | 4,833 | 5,742 | 6,729 | 8,624 |
| 0,2 | 3,2626 | 3,305 | 3,516 | 3,914 | 4,433 | 5,570 |
| 0,3 | 2,8399 | 2,836 | 2,936 | 3,168 | 3,511 | 4,329 |
| 0,4 | 2,5310 | 2,522 | 2,586 | 2,749 | 3,004 | 3,640 |
| 0,5 | 2,2837 | 2,277 | 2,329 | 2,460 | 2,665 | 3,187 |
| 0,6 | 2,0838 | 2,081 | 2,130 | 2,243 | 2,417 | 2,862 |
| 0,7 | 1,9220 | 1,924 | 1,970 | 2,072 | 2,225 | 2,614 |
| 0,8 | 1,7902 | 1,795 | 1,840 | 1,934 | 2,070 | 2,417 |
| 0,9 | 1,6823 | 1,689 | 1,733 | 1,820 | 1,944 | 2,258 |
| 1,0 | 1,5929 | 1,601 | 1,644 | 1,725 | 1,838 | 2,124 |
| 1,2 | 1,4551 | 1,465 | 1,504 | 1,574 | 1,670 | 1,913 |
| 1,4 | 1,3551 | 1,365 | 1,400 | 1,461 | 1,544 | 1,754 |
| 1,6 | 1,2800 | 1,289 | 1,321 | 1,374 | 1,447 | 1,630 |
| 1,8 | 1,2219 | 1,231 | 1,259 | 1,306 | 1,370 | 1,532 |
| 2,0 | 1,1757 | 1,184 | 1,209 | 1,251 | 1,307 | 1,451 |
| 2,5 | 1,0933 | 1,100 | 1,119 | 1,150 | 1,193 | 1,304 |
| 3,0 | 1,0388 | 1,044 | 1,059 | 1,083 | 1,117 | 1,204 |
| 3,5 | 0,99963 | 1,004 | 1,016 | 1,035 | 1,062 | 1,133 |
| 4,0 | 0,96988 | 0,9732 | 0,9830 | 0,9991 | 1,021 | 1,079 |
| 5,0 | 0,92676 | 0,9291 | 0,9360 | 0,9473 | 0,9628 | 1,005 |
| 6,0 | 0,89616 | 0,8979 | 0,9030 | 0,9114 | 0,9230 | 0,9545 |
| 7,0 | 0,87272 | 0,8741 | 0,8780 | 0,8845 | 0,8935 | 0,9181 |
| 8,0 | 0,85319 | 0,8549 | 0,8580 | 0,8632 | 0,8703 | 0,8901 |
| 9,0 | 0,83795 | 0,8388 | 0,8414 | 0,8456 | 0,8515 | 0,8678 |
| 10,0 | 0,82435 | 0,8251 | 0,8273 | 0,8308 | 0,8356 | 0,8493 |

Таблица 1.4

**Параметры модельных потенциалов (6-12)
Леннарда-Джонса и Штокмайера**

| Газ | $\sigma \cdot 10^{10}$, м | ϵ/k , К | δ | M , кг/кмоль | $T_{кр}$, К | $P_{кр}$, МПа | $\rho_{кр}$, кг/м ³ | $\lambda_{кр} \cdot 10^5$, Вт/(м·К) |
|---------------------|-------------------------------|---------------------|----------|-------------------|-----------------|-------------------|------------------------------------|---|
| Аргон | 3,465 | 116,0 | — | 39,944 | 150,86 | 5,00 | 536,0 | 971 |
| Гелий | 2,576 | 10,22 | — | 4,003 | 5,19 | 0,229 | 69,3 | 1020 |
| Криптон | 3,61 | 190,0 | — | 83,80 | 209,4 | 5,49 | 911,0 | 689 |
| Неон | 2,789 | 35,7 | — | 20,18 | 44,45 | 2,721 | 483,0 | 1100 |
| Ксенон | 4,055 | 229,0 | — | 131,30 | 289,7 | 5,83 | 1110 | 549 |
| R10 | 5,881 | 327,0 | — | 153,82 | 556,36 | 4,493 | 554,0 | 1510 |
| R11 | 5,721 | 271,8 | — | 137,37 | 471,2 | 4,409 | 553,7 | 1480 |
| R12 | 5,306 | 254,4 | — | 120,01 | 385,15 | 4,131 | 533,3 | 1415 |
| R13 | 4,841 | 235,8 | — | 104,46 | 301,99 | 3,870 | 553,1 | 1245 |
| R13B1 | 5,140 | 221,3 | — | 148,91 | 340,2 | 3,985 | 744,6 | 1118 |
| R14 | 4,546 | 156,59 | — | 88,01 | 227,50 | 3,745 | 625,8 | 1065 |
| Азот | 3,681 | 1,5 | — | 28,016 | 126,26 | 3,398 | 304,0 | 1190 |
| Кислород | 3,433 | 113,0 | — | 32,000 | 154,78 | 5,107 | 430,1 | 1423 |
| Гексафторид серы | 5,206 | 212,6 | — | 146,05 | 318,8 | 3,777 | 737,5 | 1461 |
| Аммиак | 3,441 | 146,8 | 1,2499 | 17,03 | 405,5 | 11,35 | 235,0 | 3815 |
| Вода | 2,824 | 230,9 | 2,333 | 18,016 | 647,3 | 22,13 | 317,8 | 5162 |
| Диоксид углерода | 3,996 | 190,0 | — | 44,011 | 304,2 | 7,383 | 467,9 | 1692 |
| Окись углерода | 3,590 | 110,0 | — | 28,01 | 133,15 | 3,498 | 301,0 | 1168 |
| Ацетилен | 4,221 | 185,0 | — | 26,04 | 308,65 | 6,24 | 230,0 | 2338 |
| Этилен | 4,232 | 205,0 | — | 28,05 | 282,65 | 5,06 | 220,0 | 1859 |
| RC318 | 6,753 | 162,5 | — | 200,03 | 388,47 | 2,783 | 620,0 | 1793 |
| R21 | 4,875 | 355,5 | — | 102,92 | 451,65 | 5,181 | 524,9 | 1645 |
| R22 | 4,597 | 291,9 | 0,25 | 86,47 | 369,28 | 4,986 | 512,8 | 1502 |
| R23 | 4,197 | 244,0 | 0,5 | 70,01 | 299,09 | 4,835 | 525,2 | 1315 |
| Метан | 3,697 | 163,6 | — | 16,043 | 190,55 | 4,599 | 160,4 | 2065 |
| Этан | 4,395 | 232,7 | — | 30,070 | 305,33 | 4,871 | 204,5 | 2206 |
| R113 | 5,785 | 382,4 | — | 187,38 | 487,3 | 3,414 | 576,4 | 1785 |
| R114 | 5,644 | 329,4 | — | 170,92 | 418,9 | 3,263 | 581,7 | 1680 |
| R115 | 5,501 | 270,2 | — | 154,47 | 353,15 | 3,158 | 613,1 | 1505 |
| Пропан | 4,904 | 291,3 | — | 44,096 | 369,82 | 4,24 | 219,0 | 2710 |
| Н-бутан | 4,997 | 410,0 | — | 58,12 | 425,16 | 3,796 | 228,0 | 3180 |
| Н-пентан | 5,769 | 345,0 | — | 72,146 | 469,77 | 3,374 | 232,0 | 3517 |
| Н-гексан | 5,909 | 413,0 | — | 86,17 | 507,85 | 3,031 | 234,0 | 3700 |

В случае отсутствия экспериментальных данных параметры потенциала σ и ε определяют с помощью эмпирических, естественно, не очень точных зависимостей от критической температуры $T_{кр}$ вещества, температуры кипения $T_{нк}$, температуры плавления $T_{пл}$ или мольного объема в критической точке $Mv_{кр}$:

$$\varepsilon/k = 0,77T_{кр}; \quad \varepsilon/k = 1,15T_{нк}; \quad \varepsilon/k = 1,92T_{пл};$$

$$\sigma = 0,561(Mv_{кр})^{5/16}; \quad \sigma = 0,1866(Mv_{кр})^{1/3}z_{кр}^{-6/5},$$

где $z_{кр} = \frac{p_{кр}(Mv_{кр})}{RT_{кр}}$.

Примеры расчета

1.1. Определить динамическую вязкость пропана (C_3H_8) при $T = 373,15$ К.

Расчет. Из табл. 1.4 для пропана находим: $M = 44,09$ кг/кмоль; $\varepsilon/k = 291,3$ К; $\sigma = 4,904 \cdot 10^{-10}$ м. Приведенная температура

$$T^* = \frac{373,15}{291,3} = 1,281.$$

Для этой приведенной температуры по табл. 1.2 (либо по формуле (1.13)) находим $\Omega^{(2,2)*}(T^*) = 1,4093$, а далее – значение коэффициента динамической вязкости

$$\eta = 2,6693 \cdot 10^{-6} \frac{\sqrt{44,09 \cdot 373,15}}{(4,904)^2 \cdot 1,4093} = 1010,2 \cdot 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Экспериментальное значение $\eta = 1018 \cdot 10^{-8}$ Па·с.

1.2. Определить динамическую вязкость хладагента R13B1 (CF_3Br) при $T = 238,2$ К.

Расчет. По табл. 1.4 для R13B1 находим: $M = 148,93$ кг/кмоль; $\varepsilon/k = 221,3$ К; $\sigma = 5,140 \cdot 10^{-10}$ м; $T^* = 238,2/221,3 = 1,0764$; $\Omega^{(2,2)*}(T^*) = 1,5338$;

$$\eta = 2,6693 \cdot 10^{-6} \frac{\sqrt{148,93 \cdot 238,2}}{(5,140)^2 \cdot 1,5338} = 1240,7 \cdot 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Экспериментальное значение $\eta = 1240,8 \cdot 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{с}$.

1.3. Определить теплопроводность аргона при $T = 150 \text{ К}$.

Расчет. По табл. 1.4 для аргона находим: $M = 39,944 \text{ кг/кмоль}$; $\varepsilon/k = 116,0 \text{ К}$; $\sigma = 3,465 \cdot 10^{-10} \text{ м}$; $T^* = 150,0/116,0 = 1,2931$; $\Omega^{(2,2)*}(T^*) = 1,4031$. Согласно (1.8)

$$\lambda = 8,3280 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{159,0/39,944}}{(3,465)^2 \cdot 1,4031} = 958 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Рекомендуемое табличное значение $\lambda = 960 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$,

1.4. Определить коэффициент самодиффузии диоксида углерода CO_2 при $T = 233 \text{ К}$ и $p = 10^5 \text{ Па}$.

Расчет. По табл. 1.4 для CO_2 находим: $M = 44,011 \text{ кг/кмоль}$; $\varepsilon/k = 190,0 \text{ К}$; $\sigma = 3,996 \cdot 10^{-10} \text{ м}$; $T^* = 233,0/190,0 = 1,2263$; $\Omega^{(1,1)*}(T^*) = 1,3089$. Согласно (1.9)

$$D_{11} = 2,6628 \cdot 10^2 \frac{\sqrt{233,0^3/44,011}}{10^5 (3,996)^2 \cdot 1,3089} = 0,0683 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Экспериментальное значение $D_{11} = 0,0662 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

1.5. Определить коэффициент диффузии D_{12} для смеси Ne-Xe при $T = 320 \text{ К}$ и $p = 0,2 \text{ МПа}$.

Расчет. Обозначим Ne индексом 1, Xe – индексом 2. По данным табл. 1.4 имеем: $M_1 = 20,183 \text{ кг/кмоль}$; $\varepsilon_1/k = 35,7 \text{ К}$; $\sigma_1 = 2,789 \cdot 10^{-10} \text{ м}$; $M_2 = 131,300 \text{ кг/кмоль}$; $\varepsilon_2/k = 229,0 \text{ К}$; $\sigma_2 = 4,055 \cdot 10^{-10} \text{ м}$.

По формулам (1.11)–(1.12), используя правила смешения, получаем

$$\sigma_{12} = 0,5(2,789 \cdot 10^{-10} + 4,055 \cdot 10^{-10}) = 3,422 \cdot 10^{-10} \text{ м};$$

$$\frac{\varepsilon}{k} = \frac{\sqrt{35,7(2,789)^6 \cdot 229,0(4,055)^6}}{(3,422)^6} = 81,12 \text{ К}.$$

Приведенная температура $T_{12}^* = 320,0/81,45 = 3,929$. По табл. 1.2 для этой температуры находим $\Omega_{12}^{(1,1)*}(T_{12}^*) = 0,8880$. Далее, пользуясь формулой (1.10), получаем

$$D_{12} = 2,6628 \cdot 10^2 \left[\frac{320^3 (20,183 + 130,3)}{2 \cdot 20,183 \cdot 131,3} \right]^{\frac{1}{2}} /$$

$$/ 2 \cdot 10^5 \cdot 3,422^2 \cdot 0,888 = 0,124 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}.$$

2. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ МНОГОАТОМНЫХ ГАЗОВ

Исключительно для одноатомных газов, молекулы которых не обладают внутренней энергией, справедливо соотношение (1.8). Выводы строгой молекулярно-кинетической теории относительно теплопроводности многоатомных газов не вполне обоснованы, поскольку теплопроводность многоатомных газов во многом зависит от присутствия внутренних степеней свободы.

Для расчета теплопроводности многоатомных газов в ряде работ рекомендуется формула [1]

$$\lambda = \frac{\eta c_v}{M} \left(1 + \frac{9R}{4c_v} \right) = \frac{\eta}{M} \left(c_v + \frac{9}{4}R \right), \quad (2.1)$$

приблизительно учитывающая переход энергии между поступательной и внутренними степенями свободы. Более точное выражение получается из предпосылки, что перенос внутренней энергии осуществляется с помощью механизма диффузии. Соображения такого рода приводят к формуле [2]

$$\lambda = \frac{\eta c_v}{M} \left[\frac{\rho D}{\eta} + \frac{3R}{2c_v} \left(\frac{5}{2} - \frac{\rho D}{\eta} \right) \right]. \quad (2.2)$$

Безразмерное отношение $\rho D/\eta$ почти не зависит от температуры и для модели потенциала Леннарда-Джонса его можно принять равным 1,328.

Тогда имеем

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{\eta c_v}{M} \left[1,328 + \frac{3R}{2c_v} (2,5 - 1,328) \right] = \\ &= \frac{\eta c_v}{M} \left(1,328 - \frac{1,758R}{c_v} \right).\end{aligned}\quad (2.3)$$

Однако и в этом случае найденные значения теплопроводности заметно расходятся с экспериментальными данными. Это соотношение дает более высокие значения теплопроводности, чем измеренные. При высоких температурах согласование с экспериментом лучше, чем при низких, но эту формулу, тем не менее, используют, когда нужно быстро получить приближенные значения теплопроводности.

Главная причина отклонений расчетных данных от опытных заключается в пренебрежении влиянием неупругих столкновений многоатомных молекул. Наружные столкновения уменьшают вклад в теплопроводность, обусловленный поступательным движением молекул, и увеличивают долю, связанную с внутренней энергией молекул. В целом же эффект неупругих столкновений приводит к снижению суммарного значения теплопроводности. Такие представления приводят к формуле [2, 4, 5]

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{\eta c_v}{M} \left(1,328 + \frac{1,758R}{c_v} \right) - \frac{\eta}{M} \left[\frac{2}{\pi} (2,5 - 1,328)^2 \frac{c_{v,вп}}{z_{вп}} \right] = \\ &= \frac{\eta c_v}{M} \left(1,328 + \frac{1,758R}{c_v} \right) - \frac{\eta}{M} \frac{0,875c_{v,вп}}{z_{вп}} = \\ &= \frac{\eta}{M} \left(1,328c_v + 1,758R - \frac{0,875c_{v,вп}}{z_{вп}} \right),\end{aligned}\quad (2.4)$$

где c_v – мольная теплоемкость идеального газа; $c_{v,вр}$ – составляющая удельной теплоемкости, обусловленная вращательными степенями свободы; $z_{вр}$ – число столкновений, необходимых для обмена квантом энергии между поступательной и вращательной степенями свободы.

Важной задачей является определение $z_{вр}$. Хотя возможен теоретический расчет $z_{вр}$, превалирует оценка числа столкновений по экспериментальным данным о теплопроводности. Однако даже этих результатов в литературе чрезвычайно мало и для приблизительной оценки $z_{вр}$ можно рекомендовать уравнение

$$z_{вр} = z_{вр}^{\infty} \left[1 + \frac{\pi^{3/2}}{2} \left(\frac{1}{T^*} \right)^{1/2} + \left(\frac{\pi^2}{4} + 2 \right) \frac{1}{T^*} + \pi^{3/2} \left(\frac{1}{T^*} \right)^{3/2} \right]^{-1}, \quad (2.5)$$

где $z_{вр}^{\infty} = 25$.

Развитие теории теплопроводности многоатомных газов далеко не закончено. Тем не менее, приближенное выражение (2.4) лучше согласуется с опытом и позволяет получить удовлетворительные результаты, хотя нельзя надеяться, что для полярных газов результат окажется столь же точным, как и для неполярных.

Примеры расчета

2.1. Вычислить теплопроводность водорода при $T = 273,15$ К.

Расчет. По табл. 1.4 определяем параметры модельного потенциала водорода: $M = 4,016$ кг/кмоль; $\varepsilon/k = 33,3$ К; $\sigma = 2,968 \cdot 10^{-10}$ м.

Приведенная температура $T^* = 273,15/33,3 = 8,203$.

По табл. 1.2 для потенциала Леннарда-Джонса находим $\Omega^{(2,2)*}(T^*) = 0,8506$. Динамическая вязкость рассчитывается по (1.7)

$$\eta = 2,6693 \cdot 10^{-6} \frac{\sqrt{2,016 \cdot 273,15}}{(2,968)^2 \cdot 0,8506} = 836 \cdot 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$z_{вр} = 25 \left[1 + \frac{\pi^{3/2}}{2} \left(\frac{1}{1,082} \right)^{1/2} + \left(\frac{\pi^2}{4} + 2 \right) \frac{1}{1,082} + \pi^{3/2} \left(\frac{1}{1,082} \right)^{3/2} \right]^{-1} =$$

$$= 1,967.$$

Для линейных молекул $c_{v,вр} = R$, тогда, согласно (2.4),

$$\lambda = \frac{1080 \cdot 10^{-8}}{44,096} (1,328 \cdot 85,767 \cdot 10^3 + 1,758 \cdot 8314 - \frac{0,875 \cdot 8314}{1,967}) = 3057 \cdot 10^{-5}, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

Рекомендуемое значение $\lambda = 3110 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·К) [3].

3. ВЯЗКОСТЬ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Для расчета вязкости бинарных неполярных газовых смесей молекулярно-кинетическая теория предлагает следующую зависимость [1]:

$$\frac{1}{\eta_{см}} = X_{\eta} \left[\frac{1 + (Y_{\eta}/X_{\eta})}{1 + Z_{\eta}} \right]. \quad (3.1)$$

Значения X_{η} , Y_{η} , и Z_{η} определяют из соотношений

$$X_{\eta} = \frac{x_1^2}{\eta_1} + \frac{2x_1x_2}{\eta_{12}} + \frac{x_2^2}{\eta_2}, \quad (3.2)$$

$$Y_{\eta} = \frac{3}{5} A_{12}^* \left[\frac{x_1^2}{\eta_1} \left(\frac{M_1}{M_1} \right) + \frac{2x_1x_2}{\eta_{12}} \frac{(M_1 + M_2)^2}{4M_1M_2} \frac{\eta_{12}^2}{\eta_1\eta_2} + \frac{x_2^2}{\eta_2} \left(\frac{M_2}{M_1} \right) \right], \quad (3.3)$$

$$Z_{\eta} = \frac{3}{5} A_{12}^* \left\{ x_1^2 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) + 2x_1x_2 \left[\frac{(M_1 + M_2)^2}{4M_1M_2} x \left(\frac{\eta_{12}}{\eta_1} + \frac{\eta_{12}}{\eta_2} \right) - 1 \right] + x_2^2 \left(\frac{M_2}{M_1} \right) \right\}, \quad (3.4)$$

где A_{12}^* – функция приведенной температуры $T_{12}^* = T(\varepsilon_{12}/k)^{-1}$, определяемая по формуле

$$A_{12}^* = \Omega^{(2,2)*}(T_{12}^*) / \Omega^{(1,1)*}(T_{12}^*). \quad (3.5)$$

В расчетах пользуются величиной вязкости гипотетического газа, молекулы которого имеют молекулярную массу, равную $2M_1M_2/(M_1+M_2)$, и взаимодействуют по потенциальной кривой, определяемой параметрами взаимодействия σ_{12} и ε_{12} ,

$$\eta_{12} = 2,6693 \cdot 10^{-6} \frac{2M_1M_2T/(M_1 + M_2)}{\sigma_{12}^2 \Omega_{12}^{(2,2)*}(T_{12}^*)}. \quad (3.6)$$

Параметры потенциальной функции σ_{12} и ε_{12} определяют из комбинационных правил, приведенных выше.

Молекулярно-кинетическая теория позволяет также рассчитать вязкость многокомпонентных газовых смесей, однако вычисления становятся существенно более сложными и громоздкими. Точность уравнений строгой молекулярно-кинетической теории по сравнению с экспериментальными данными о вязкости газовых смесей во многих случаях невелика. Одной из основных причин этого положения является недостаточное знание особенностей межмолекулярного взаимодействия. Модели потенциалов, с определенными ограничениями «работающие» для индивидуальных газов, в то же время для смесей, состоящих из большего числа различных газов, мало обоснованы [6]. Теоретические уравнения обрастают эмпирическими коэффициентами и формулами, сложными и недостаточно строгими. Это ограничивает возможность применения теоретических формул к практическим задачам, заставляет искать более рациональные методы расчета, основанные на обобщенных закономерностях, справедливых и для составляющих смесь компонентов, и для смеси. С этой точки зрения наиболее приемлемым можно считать метод, предложенный И.Ф. Голубевым и Н.Е. Гнездиловым [7].

Общее уравнение, включающее все возможные по составу варианты газовых смесей, имеет вид [7]

$$\eta_{см} \cdot 10^8 = 34 \left[1 - \frac{0,6(n_{см} - 1)}{M_{см}} \sum_{i=1}^n A_i x_i \right] x \times [B_{см} + \sum_{i=1}^n \Phi_i x_i]^3 \tau_{см}^\alpha, \quad (3.7)$$

где
$$A_i = \sqrt{M_{\text{см}} T_{\text{кр,см}}} / \sqrt{M_i T_{\text{кр},i}}, \quad (3.8)$$

$$B_{\text{см}} = M_{\text{см}}^{1/2} p / T_{\text{кр,см}}^{1/6}, \quad (3.9)$$

$$\Phi_i = \frac{P_{\text{кр},i}^{1/4} \sqrt{M_{\text{см}} T_{\text{кр,см}}}}{T_{\text{кр},i}^{1/4} \sqrt{M_i T_{\text{кр},i}}}, \quad (3.10)$$

$$\beta = 1 + \left(\frac{0,55 \mu_{\text{см}}}{M_{\text{см}}} \right). \quad (3.11)$$

При $\tau \leq 1$ до $T_{\text{см}} = 1000\text{--}1200$ К

$$\alpha = 0,71 + \frac{0,29}{\tau_{\text{см}}} + \frac{\mu_{\text{см}} \tau_{\text{см}}}{M_{\text{см}}}, \quad (3.12)$$

при $\tau_{\text{см}} \leq 1$
$$\alpha = 0,965 + \frac{\mu_{\text{см}}}{M_{\text{см}}}.$$

Для смесей, содержащих одновременно полярный газ и кислород, являющийся по сравнению с другими газами сильным парамагнитным веществом, показатель степени

$$\beta = 1 + 0,55 \frac{\mu_{\text{см}}}{M_{\text{см}}} (1 + 3,3x_{\text{O}_2}).$$

Особый класс смесей – смеси, содержащие гелий. В этом случае расчетное уравнение имеет вид

$$\eta_{\text{см}} \cdot 10^8 = 33,7 \left\{ 1 + 0,6 \frac{n_{\text{см}} - 1}{M_{\text{см}}} \left[\left(1 - 1,8 \frac{M_{\text{см}} - M_{\text{He}}}{M_{\text{см}}^2} x \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. x \frac{\sqrt{M_{\text{см}} T_{\text{кр,см}}}}{\sqrt{M_{\text{He}} T_{\text{кр,He}}}} x_{\text{He}} + \frac{\sqrt{M_{\text{см}} T_{\text{кр,см}}}}{\sqrt{M_2 T_{\text{кр},2}}} x_2 + \dots \right] \right\} x$$

$$\begin{aligned}
& x \tau_{\text{см}}^{\alpha_{\text{He}}} \left[B_{\text{см}} + 2,22 \left(1 - 1,8 \frac{M_{\text{см}} - M_{\text{He}}}{M_{\text{см}}^2} \right) \frac{p_{\text{кр,He}}^{\frac{1}{4}} \sqrt{M_{\text{см}} T_{\text{кр,см}}}}{T_{\text{кр,He}}^{\frac{1}{4}} \sqrt{M_{\text{см}} T_{\text{кр,He}}}} x_{\text{He}} + \right. \\
& \left. + \frac{p_{\text{кр,2}}^{\frac{1}{4}} \sqrt{M_{\text{см}} T_{\text{кр,см}}}}{T_{\text{кр,2}}^{\frac{1}{4}} \sqrt{M_2 T_{\text{кр,2}}}} x_2 + \dots \right]^{1 + \frac{0,55 \mu_{\text{см}}}{M_{\text{см}}}} \tau_{\text{см}}^{\alpha_{\text{He}}}, \quad (3.13)
\end{aligned}$$

где

$$\alpha_{\text{He}} = 0,71 + \frac{0,29}{\tau_{\text{см}}} + \frac{\mu_{\text{см}} \tau_{\text{см}}}{M_{\text{см}}} - \left(0,067 + \frac{0,38}{\tau_{\text{см}}} \right) x_{\text{He}}, \quad (3.14)$$

При расчетах определяющие смесь параметры вычисляются в соответствии с законом аддитивности:

$$M_{\text{см}} = M_1 x_1 + M_2 x_2 + \dots,$$

$$T_{\text{кр,см}} = T_{\text{кр,1}} x_1 + T_{\text{кр,2}} x_2 + \dots,$$

$$p_{\text{кр,см}} = p_{\text{кр,1}} x_1 + p_{\text{кр,2}} x_2 + \dots,$$

$$n_{\text{см}} = n_1 x_1 + n_2 x_2 + \dots,$$

$$\mu_{\text{см}} = \mu_1 x_1 + \mu_2 x_2 + \dots.$$

Для всех неуглеводородов принимается $n = 1$, а для полярных молекул, не содержащих атомы водорода, $\mu = 0$. Уравнения (3.7)–(3.14) позволяют вычислять вязкость смесей: неполярных газов, неполярных и полярных газов, полярных газов, а также смесей, содержащих кислород и гелий. Для расчета необходимо знать молекулярные массы компонентов, критические температуры, давления и дипольные моменты индивидуальных газов, составляющих смесь.

Примеры расчета

3.1. Определить вязкость смеси следующего мольного состава: 60,22 % H_2 и 39,78 % CH_4 при $T = 473,15$ К.

Расчет. Параметры потенциала (6-12) Леннарда-Джонса возьмем из табл. 1.4. Обозначим индексом 1 параметры водорода и индексом 2 параметры метана. Имеем: $\varepsilon_1/k = 38$ К; $\sigma_1 = 2,915 \cdot 10^{-10}$ м; $\varepsilon_2/k = 163,6$ К; $\sigma_2 = 3,697 \cdot 10^{-10}$ м.

Определяем значения приведенных температур:

$$T_1^* = 473,15/38 = 12,45; T_2^* = 473,15/163,6 = 2,892.$$

Параметры потенциала для смеси находим с помощью комбинационных правил

$$\sigma_{12} = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) = 3,306 \cdot 10^{-10} \text{ м}$$

$$\frac{\varepsilon_{12}}{k} \cong \frac{\sqrt{\varepsilon_1 \sigma_1^6 \varepsilon_2 \sigma_2^6}}{\sigma_{12}^6} = 75,6 \text{ К.}$$

Определяем

$$T_{12}^* = \frac{473,15}{\varepsilon_{12}/k} = 6,259$$

Из табл. 1.2 найдем: для $T_1^* = 12,45$ $\Omega_1^{(2,2)*}(T_1^*) = 0,7989$; для $T_2^* = 2,892$ $\Omega_2^{(2,2)*}(T_2^*) = 1,050$; для $T_1^* = 6,259$ $\Omega_{12}^{(2,2)*}(T_{12}^*) = 0,8894$.

По формуле (1.7) вычисляем вязкость:

– водорода

$$\eta_1 = 266,93 \cdot 10^{-8} \frac{\sqrt{2,015 \cdot 473,15}}{(2,915)^2 \cdot 0,8894} = 1214 \cdot 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

– метана

$$\eta_2 = 266,93 \cdot 10^{-8} \frac{\sqrt{16,04 \cdot 473,15}}{(3,697)^2 \cdot 1,050} = 1620 \cdot 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

и по формуле (3.6) вязкость гипотетического газа

$$\eta_{12} = 266,93 \cdot 10^{-8} \frac{\sqrt{2 \cdot 2,015 \cdot 16,04 \cdot 473,5 / (2 \cdot (15 + 16,04))}}{(3,306)^2 \cdot 0,8894} =$$

$$= 1130 \cdot 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Вязкость смеси определяем по уравнению (3.1), где $A_{12}^* = \Omega_{12}^{(2,2)*} / \Omega_{12}^{(1,1)*} = 1,10$ (значение $\Omega_{12}^{(1,1)*}$ находим по T_{12}^* из табл. 1.2).

Вычисляем

$$X_{\eta} = \frac{(0,6022)^2}{1214 \cdot 10^{-8}} + \frac{2 \cdot 0,6022 \cdot 0,3978}{1130 \cdot 10^{-8}} + \frac{(0,3978)^2}{1620 \cdot 10^{-8}} = 8,2 \cdot 10^4,$$

$$Y_{\eta} = \frac{3}{5} \left[1,1 \frac{6,6022^2}{1214 \cdot 10^{-8}} \frac{2,015}{16,04} + \frac{2 \cdot 0,6022 \cdot 0,3978 (2,015 + 16,04)^2}{1130 \cdot 10^{-8} \cdot 4 \cdot 2,015 \cdot 16,04} \right] \times$$

$$\times \frac{(1130 \cdot 10^{-8})^2}{1214 \cdot 1620 \cdot (10^{-8})^2} + \frac{0,3978^2 \cdot 16,04}{1620 \cdot 10^{-8} \cdot 2,015} = 9,96 \cdot 10^4,$$

$$Z_{\eta} = \frac{3}{5} \cdot 1,1 \left\{ 0,6022^2 \frac{2,015}{16,04} + 2 \cdot 0,6022 \cdot 0,3978 \left[\frac{(2,015 + 16,04)^2}{4 \cdot 2,015 \cdot 16,04} \right] \times \right.$$

$$\left. \times \left(\frac{1130 \cdot 10^{-8}}{1214 \cdot 10^{-8}} + \frac{1130 \cdot 10^{-8}}{1620 \cdot 10^{-8}} \right) - 1 \right\} + 0,3978^2 \frac{16,04}{2,015} = 1,8436,$$

$$\frac{1}{\eta_{см}} = 8,2 \cdot 10^4 \left[\frac{1 + (9,96 \cdot 10^4 / 8,2 \cdot 10^4)}{1 + 1,8436} \right] = 6,386 \cdot 10^4 \text{ (Па} \cdot \text{с)}^{-1},$$

$$\eta_{см} = 1566 \cdot 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Экспериментальное значение $\eta_{см} = 1551 \cdot 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{с}.$

3.2. Определить вязкость смеси, содержащей 47,86 % аммиака и 52,14 % кислорода при $T = 473,15 \text{ К}$ (состав смеси выражен в молях).

Расчет. Определяем псевдокритические параметры и кажущуюся молекулярную массу смеси:

$$p_{кр,см} = 11,353 \cdot 0,4786 + 5,107 \cdot 0,5214 = 8,0963 \text{ МПа};$$

$$T_{кр,см} = 405,50 \cdot 0,4786 + 154,78 \cdot 0,5214 = 274,78 \text{ К};$$

$$M_{кр,см} = 17,030 \cdot 0,4786 + 32 \cdot 0,5214 = 24,83 \text{ кг/кмоль};$$

$$\eta_{кр,см} = 33,710^{-8} \left(\frac{24,83^{\frac{1}{3}} \cdot 80,963^{\frac{2}{3}}}{274,78^{\frac{1}{6}}} + \frac{113,53^{\frac{1}{4}} \sqrt{24,83 \cdot 274,78}}{405,5^{\frac{1}{4}} \sqrt{17,030 \cdot 405}} \times \right. \\ \left. \times 0,4786 + \frac{51,07^{\frac{1}{4}} \sqrt{24,83 \cdot 274,78}}{154,78^{\frac{1}{4}} \sqrt{32 \cdot 154,78}} \cdot 0,5214 \right)^{1 + \frac{0,55 \cdot 1,46 \cdot 0,4786}{24,83} (1 + 3,3 \cdot 0,5214)} = \\ = 2428 \cdot 10^{-8}, \text{ Па} \cdot \text{ с}.$$

При $T_{см} = 473,15 \text{ К}$ $\tau_{см} = 473,15/274,78 = 1,722,$

$$\eta_{см} = 1467 \cdot 10^{-8} \cdot 1,722^{0,71} + \frac{0,29}{1,722} + \frac{1,46 \cdot 0,4786 \cdot 1,722}{24,83} = \\ = 2428 \cdot 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{ с}.$$

Экспериментальное значение $\eta_{см} = 2390 \cdot 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{ с}.$

Напомним, что дипольный момент молекулы аммиака $\mu = 1,46 \text{ Д}.$

3.3. Определить вязкость смеси следующего мольного состава: 20 % He, 20 % N₂, 20 % H₂O, 20 % C₃H₈ и 20 % O₂ при $T = 300 \text{ К}.$

Расчет. Сначала вычислим псевдокритические параметры и кажущуюся молекулярную массу этой многокомпонентной смеси:

$$p_{кр,см} = 2,29 \cdot 0,2 + 33,98 \cdot 0,2 + 221,3 \cdot 0,2 + 48,4 \cdot 0,2 + \\ + 51,07 \cdot 0,2 = 7,021, \text{ МПа},$$

$$T_{кр,см} = 5,19 \cdot 0,2 + 126,26 \cdot 0,2 + 647,30 \cdot 0,2 + 369,82 \cdot 0,2 + \\ + 154,78 \cdot 0,2 = 260,67, \text{ К,}$$

$$M_{кр,см} = 4,003 \cdot 0,2 + 28,016 \cdot 0,2 + 18,016 \cdot 0,2 + 44,096 \cdot 0,2 + \\ + 32,000 \cdot 0,2 = 25,23, \text{ кг/кмоль.}$$

При $T_{см} = 300 \text{ К}$ имеем $\tau_{см} = 300/260,67 = 1,151$.

Далее по формуле (3.7) можно вычислить $\eta_{см}$. Промежуточные величины имеют значения

$$\sum_{i=1}^n A_i x_i = 0,2 \cdot \left(\frac{\sqrt{25,23 \cdot 260,67}}{\sqrt{28,016 \cdot 126,26}} + \frac{\sqrt{25,23 \cdot 260,67}}{\sqrt{18,016 \cdot 647,30}} + \right. \\ \left. + \frac{\sqrt{25,23 \cdot 260,67}}{\sqrt{44,096 \cdot 369,82}} + \frac{\sqrt{25,23 \cdot 260,67}}{\sqrt{32,0 \cdot 154,78}} \right) = 0,780 \text{ (без He),}$$

$$B_{см} = \frac{25,23^{1/2} \cdot 70,21^{2/3}}{260,67^{1/6}} = 33,864,$$

$$\sum_{i=1}^n \Phi_i x_i = 0,2 \left(\frac{33,98^{1/4} \sqrt{25,23 \cdot 260,67}}{126,26^{1/4} \sqrt{28,016 \cdot 126,26}} + \frac{221,3^{1/4}}{647,30^{1/4}} \times \right. \\ \times \frac{\sqrt{25,23 \cdot 260,67}}{\sqrt{18,016 \cdot 647,30}} + \frac{42,4^{1/4} \sqrt{25,23 \cdot 260,67}}{369,82^{1/4} \sqrt{44,096 \cdot 369,82}} + \\ \left. + \frac{51,07^{1/4} \sqrt{25,23 \cdot 260,67}}{154,78^{1/4} \sqrt{32,0 \cdot 154,78}} \right) = 0,560 \text{ (без He),}$$

$$n_{см} = 1 \cdot 0,2 + 1 \cdot 0,2 + 1 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,3 + 1 \cdot 0,2 = 1,4,$$

$$\mu_{см} = 1,84 \cdot 0,2 = 0,368.$$

Заметим, что здесь учтен только дипольный момент молекулы водяного пара $\mu = 1,84$ Д.

Далее:

$$\beta = 1 + 0,55 \cdot \frac{0,368}{25,23} (1 + 3,3 \cdot 0,2) = 1,0133,$$

$$\alpha_{\text{He}} = 0,71 + \frac{0,29}{1,151} + \frac{0,368 \cdot 1,151}{25,23} - \left(0,067 + \frac{0,38}{1,151}\right) 0,2 = 0,899.$$

После этого рассчитаем динамическую вязкость смеси

$$\begin{aligned} \eta_{\text{см}} &= 33,7 \cdot 10^{-8} \left\{ 1 - 0,6 \cdot \frac{1,4 - 1}{25,23} \left[\left(1 - 1,8 \frac{25,23 - 4,003}{25,23^2} \right) \times \right. \right. \\ &\quad \times \frac{\sqrt{25,23 \cdot 260,67}}{\sqrt{4,003 \cdot 5,19}} 0,2 + 0,78 \left. \right] \left[33,864 + 2,22x \right. \\ &\quad \times \left(1 - 1,8 \frac{25,23 - 4,003}{25,23^2} \right) \cdot \frac{2,29^{\frac{1}{4}}}{5,19^{\frac{1}{4}}} \cdot \frac{\sqrt{25,23 \cdot 260,67}}{\sqrt{4,003 \cdot 5,19}} \cdot 0,2 + \\ &\quad \left. \left. + 0,560 \right]^{1,0133} \cdot 1,151^{0,899} = 33,7 \cdot 10^{-8} \cdot 0,961 \cdot 42,518 \cdot 1,135 = \right. \\ &\quad \left. = 1563 \cdot 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{с}. \right. \end{aligned}$$

4. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ БИНАРНЫХ СМЕСЕЙ ГАЗОВ

Формулы для расчета теплопроводности бинарных смесей одноатомных газов могут быть получены на основе строгой молекулярно-кинетической теории. Эти формулы более сложны по сравнению с аналогичными зависимостями для вязкости бинарных смесей. Заметим, что и в этом случае точность вычислений теплопроводности недостаточна и отражает приблизительный характер наших знаний об особенностях межмолекулярного взаимодействия в смесях газов.

Строгое теоретическое решение для теплопроводности смесей многоатомных газов отсутствует. Для расчета пользуются прибли-

женными формулами, которые лучше согласуются с экспериментальными данными, чем строгие теоретические соотношения [8].

Методы такого рода многочисленны, часто дают противоречивые результаты. Рассмотрим лишь один пример, успешно использованный для описания бинарных смесей газообразных холодильных агентов [4].

Уравнение для расчета теплопроводности смеси может быть записано в виде

$$\lambda_{см} = \lambda_{кр,см} V \Phi(\tau_{см}), \quad (4.1)$$

где $V = c_{v,см}/c_{v,кр,см}$; $\lambda_{кр,см}$; $c_{v,кр,см}$ – соответственно значения теплопроводности и удельной теплоемкости смеси при $T_{кр,см}$.

Единую температурную функцию $\Phi(\tau_{см})$ удается описать аналитической зависимостью

$$(\tau_{см}) = \Phi(\tau_1)x_1 + \Phi(\tau_2)x_2, \quad (4.2)$$

где $\Phi(\tau_i) = \tau_i^\alpha$, $\tau = T/T_{кр}$.

Здесь: при $\tau_i \geq 1$ $\alpha = 0,71 + 0,29/\tau_i + \mu_i \tau_i/M_i - (0,067 + 0,38/\tau_i) \cdot x_{He}$ и при $\tau \leq 1$ $\alpha = 0,965 + \mu_i/M_i$.

На основании анализа литературных данных для теплопроводности бинарной газовой смеси при температуре $T_{кр,см}$ предлагается зависимость

$$\lambda_{кр,см} = \lambda_{ад}(1 + Ax_2), \quad (4.3)$$

в которой

$$\lambda_{ад} = \lambda_{кр,1}x_1 + \lambda_{кр,2}x_2, \quad (4.4)$$

$$A = \sum_{k=0}^3 c_k \kappa^k \left[1 - \left(\frac{x_2 - 0,5}{0,5} \right)^2 \right], \quad (4.5)$$

$$\kappa = M_1/M_2, \quad (4.6)$$

где C_k – коэффициенты ($C_0 = -0,3961$; $C_1 = 1,2840$; $C_2 = -1,4373$; $C_3 = 0,5885$); x_2 , M_2 – соответственно мольная доля и молекулярная

масса более тяжелого компонента смеси; x_1 , M_1 – мольная доля и молекулярная масса легкого компонента смеси.

Следует заметить, что для вычислений теплопроводности смеси необходимо знать значения теплопроводности компонентов при критической температуре и их теплоемкость.

Таблицы теплоемкости одноатомных и двухатомных газов приведены в учебниках термодинамики. В табл. 4.1 поэтому дан только перечень формул для расчета теплоемкости некоторых широко используемых холодильных агентов, составленный по литературным данным. Значения теплопроводности газов при $T_{кр}$ могут быть взяты из табл. 1.4 или рассчитаны по уравнению (2.1).

Таблица 4.1

**Перечень аппроксимирующих уравнений
для расчета теплоемкости идеального газа**

| Газ | Уравнение | Интервал температур, К |
|-------|---|------------------------|
| Метан | $c_{p_0} = \sum_{i=0}^4 A_i t^i$, Дж/(моль·К); $t = T/100$; $A_0 = 44,00054$; $A_1 = -12,80249$; $A_2 = 4,68939$; $A_3 = -0,49566$; $A_4 = 0,01845$ | 200–900 |
| Этан | $c_{p_0} = \sum_{i=0}^5 A_i t^i$, Дж/(моль·К); $t = T/100$; $A_0 = 29,35714$; $A_1 = 9,28501$; $A_2 = -5,25486$; $A_3 = 2,76957$; $A_4 = -0,47895$; $A_5 = 0,02776$ | 90–600 |
| R113 | $c_{p_0} = \sum_{i=0}^4 A_i t^i$, Дж/(моль·К); $t = T/100$; $A_0 = 22,57892$; $A_1 = 0,51528$; $A_2 = -7,62929 \cdot 10^{-4}$; $A_3 = 5,49709 \cdot 10^{-7}$; $A_4 = -1,56001 \cdot 10^{-10}$ | 293–600 |
| R21 | $c_v = A + D$, Дж/(моль·К); $A = A_1 T^b$; $D = A_2 \exp(cT^{-3})$; $A_1 = 2,2500$; $A_2 = -13,7630$; $b = 0,5547$; $c = -3,0688 \cdot 10^8$ | 300–600 |
| R23 | $c_v = A + B$, Дж/(моль·К); $A = A_0 + A_1 T$; $B = A_2 \exp(cT^{-3})$; $A_0 = 12,7340$; $A_1 = 0,10160$; $A_2 = -19,4030$; $c = -2,7642 \cdot 10^8$ | 200–600 |
| R22 | $c_{p_0} = \sum_{i=-1}^2 A_i t^i$, кДж/(кг·К); $t = T/100$; $A_{-1} = 0,07948$; $A_0 = 0,14987$; $A_1 = 0,19082$; $A_2 = -0,010757$ | 200–600 |
| R12 | $c_{v_0} = \sum_{i=0}^5 A_i t^i$, кДж/(кг·К); $t = T/T_{кр}$; $T_{кр} = 385,15$ К $A_0 = 0,077432$; $A_1 = 0,707146$; $A_2 = 0,0919702$; $A_3 = -0,513222$; $A_4 = 0,302382$; $A_5 = -0,0576614$ | 100–700 |

| Газ | Уравнение | Интервал температур, К |
|-------|--|------------------------|
| R11 | $c_{p_0} = \sum_{i=0}^3 A_i t^i$, Дж/(моль·К); $A_0 = 16,54901$; $A_1 = 0,32458$; $A_2 = -4,65110 \cdot 10^{-4}$; $A_3 = 2,50371 \cdot 10^{-7}$ | 200–600 |
| R14 | $c_p = \sum_{i=0}^4 A_i t^i$, Дж/(моль·К); $A_0 = 9,04322$; $A_1 = 0,23055$; $A_2 = -1,98748 \cdot 10^{-4}$; $A_3 = 5,47453 \cdot 10^{-8}$ | 200–650 |
| R115 | $c_{p_0} = \sum_{i=0}^3 A_i t^i$, Дж/(моль·К); $A_0 = 16,91850$; $A_1 = 0,43821$; $A_2 = -4,75769 \cdot 10^{-4}$; $A_3 = 1,97520 \cdot 10^{-7}$ | 200–600 |
| R114 | $c_{p_0} = \sum_{i=0}^3 A_i t^i$, Дж/(моль·К); $A_0 = -19,46135$; $A_1 = 0,80349$; $A_2 = -1,47200 \cdot 10^{-3}$; $A_3 = 1,03410 \cdot 10^{-6}$ | 220–600 |
| R13 | $c_v = \sum_{i=0}^5 A_i t^i$, кДж/(кг·К); $\tau = T/T_{кр}$; $T_{кр} = 301,99$ К; $A_0 = 0,217931$; $A_1 = -0,244135$; $A_2 = 1,828576$; $A_3 = -2,139585$; $A_4 = 1,214109$; $A_5 = -0,347027$ | 100–700 |
| R13B1 | $c_{p_0} = A + D + E$, Дж/(моль·К); $A = A_0 + t^b$; $D = A_1 \exp(c_1 t^{-3})$; $E = A_2 \exp(c_2 t^{-5})$; $A_0 = 39,3086$; $A_1 = -13,1408$; $A_2 = -69,12$; $b = 0,5192$; $c_1 = -140,47$; $c_2 = -3,035 \cdot 10^4$; $t = T/100$ | 200–600 |
| R12B1 | $c_{p_0} = A + D + E$, Дж/(моль·К); $A = A_0 + t^b$; $D = A_1 \exp(c_1 t^{-3})$; $E = A_2 \exp(c_2 t^{-5})$; $A_0 = 44,2654$; $A_1 = -15,6323$; $A_2 = -76,28$; $b = 0,4796$; $c_1 = -130,14$; $c_2 = -3,066 \cdot 10^4$; $t = T/100$ | 200–600 |

Примеры расчета

4.1. Определить теплопроводность бинарной смеси газов, состав которой задан в мольных долях: 50 % N₂ и 50 % R12 при $T = 292$ К и $p = 0,1$ МПа.

Расчет.

Используя данные табл. 1.4 и 4.1, рассчитываем

$$\kappa = \frac{28,016}{120,914} = 0,232;$$

$$M_{см} = 0,5 \cdot 28,016 + 0,5 \cdot 120,194 = 74,47 \text{ кг/кмоль};$$

$$T_{кр,см} = 0,5 \cdot 126,25 + 0,5 \cdot 385,15 = 255,7 \text{ К};$$

$$c_{v,кр,N_2} = 20,79 \text{ кДж/(кмоль}\cdot\text{К)};$$

$$c_{v,N_2} = 20,837 \text{ кДж/(кмоль}\cdot\text{К)} \text{ (при } T = 292 \text{ К)};$$

$$c_{v,кр,R12} = 73,52 \text{ кДж/(кмоль}\cdot\text{К)};$$

$$c_{v,R12} = 63,87 \text{ кДж/(кмоль}\cdot\text{К)} \text{ (при } T = 292 \text{ К)};$$

$$c_{v,кр,см} = 0,5 \cdot 20,79 + 0,5 \cdot 73,52 = 47,16 \text{ кДж/(кмоль}\cdot\text{К)};$$

$$c_{v,см} = 0,5 \cdot 20,837 + 0,5 \cdot 63,87 = 42,35 \text{ кДж/(кмоль}\cdot\text{К)};$$

$$\tau_{R12} = \frac{292}{385,15} = 0,758;$$

$$\tau_{N_2} = \frac{292}{126,25} = 2,313.$$

На основе формулы (4.2) определяется $\Phi(\tau_i)$. Имеем

$$\Phi(\tau_{N_2}) = 2,313^{(0,71 + \frac{0,29}{2,313})} = 2,015;$$

$$\Phi(\tau_{R12}) = 0,758^{0,965} = 0,765.$$

Откуда

$$\Phi(\tau_{см}) = 0,5 \cdot 2,015 + 0,5 \cdot 0,765 = 1,390.$$

Далее из табл. 1.4 находим

$$\lambda_{кр,N_2} = 1190 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)};$$

$$\lambda_{кр,R12} = 1415 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$$

и вычисляем по формуле (4.4)

$$\lambda_{ад} = 0,5 \cdot 1190 \cdot 10^{-5} + 0,5 \cdot 1415 \cdot 10^{-5} = 1302,5 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Определяем по формулам (4.3) и (4.5)

$$A = (-0,3961 + 1,2840 \cdot 0,232 - 1,4373 \cdot 0,232^2 + 0,5885 \cdot 0,232^3) \times \\ \times \left[1 - \left(\frac{0,5-0,5}{0,5} \right)^2 \right] = -0,168,$$

$$\lambda_{см.кр} = 1302,5 \cdot 10^{-5} \cdot (1 - 0,168 \cdot 0,5) = 1193 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Окончательно получаем

$$\lambda_{см} = 1193 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{42,35}{47,16} \cdot 1,390 = 1489 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}.$$

Экспериментальное значение $\lambda_{см} = 1439 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

4.2. Определить теплопроводность смеси газообразных хлад-агентов R12 и RC318, состав которой задан в мольных долях: $x_{R12} = 0,421$, $x_{RC318} = 0,579$ при $T = 353,77 \text{ К}$ и $p = 0,1 \text{ МПа}$.

Расчет. Рассчитываем, используя данные табл. 1.4 и 4.1,

$$\kappa = \frac{120,94}{200,04} = 0,604;$$

$$M_{см} = 120,914 \cdot 0,421 + 200,04 \cdot 0,579 = 166,73 \text{ кг/кмоль};$$

$$T_{кр,см} = 385,15 \cdot 0,421 + 388,15 \cdot 0,579 = 396,89 \text{ К};$$

$$c_{v,кр,R12} = 73,52 \text{ кДж/(кмоль}\cdot\text{К)};$$

$$c_{v,R12} = 70,50 \text{ кДж/(кмоль}\cdot\text{К)} \text{ (при } T = 353,77 \text{ К)};$$

$$c_{v,кр,RC318} = 173,99 \text{ кДж/(кмоль}\cdot\text{К)};$$

$$c_{v,RC318} = 164,76 \text{ кДж/(кмоль}\cdot\text{К)} \text{ (при } T = 353,77 \text{ К)};$$

$$c_{v,кр,см} = 73,52 \cdot 0,421 + 173,99 \cdot 0,579 =$$

$$= 131,69 \text{ кДж/(кмоль}\cdot\text{K)};$$

$$c_{v,см} = 73,50 \cdot 0,421 + 164,76 \cdot 0,579 = 125,08, \text{ кДж/(кмоль}\cdot\text{K)};$$

$$\tau_{R12} = \frac{353,77}{385,15} = 0,919;$$

$$\tau_{RC318} = \frac{353,77}{388,15} = 0,911;$$

$$\Phi(\tau_{R12}) = 0,919^{0,965} = 0,922;$$

$$\Phi(\tau_{RC318}) = 0,911^{0,965} = 0,914;$$

$$\Phi(\tau_{см}) = 0,421 \cdot 0,922 + 0,579 \cdot 0,914 = 0,917.$$

Из табл. 1.4 находим

$$\lambda_{кр,R12} = 1415 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)};$$

$$\lambda_{кр,RC318} = 1793 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}.$$

Имеем

$$\lambda_{ад} = 0,421 \cdot 1415 \cdot 10^{-5} + 0,579 \cdot 1793 \cdot 10^{-5} =$$

$$= 1634 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)},$$

$$A = (-0,3961 + 1,2840 \cdot 0,604 - 1,4373 \cdot 0,604^2 + 0,5885 \cdot 0,604^3) \times$$

$$\times \left[1 - \left(\frac{0,5 - 0,579}{0,5} \right)^2 \right] = -0,015,$$

$$\lambda_{см,кр} = 1634 \cdot 10^{-5} \cdot (1 - 0,015 \cdot 0,579) = 1620 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)},$$

$$\lambda_{\text{см}} = 1620 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{125,08}{131,69} \cdot 0,917 = 1411 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Экспериментальное значение $\lambda_{\text{см}} = 1451 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$,

4.3. Определить теплопроводность смеси аргона и криптона, состав которой задан в мольных долях: $x_{\text{Ar}} = 0,75$; $x_{\text{Kr}} = 0,25$, при $T = 221,04 \text{ К}$ и $p = 0,1 \text{ МПа}$.

Расчет.

Рассчитываем, используя данные табл. 1.4 и 4.1,

$$\kappa = \frac{39,944}{83,8} = 0,477,$$

$$M_{\text{см}} = 39,44 \cdot 0,75 + 83,8 \cdot 0,25 = 50,91 \text{ кг/кмоль},$$

$$T_{\text{кр,см}} = 150,86 \cdot 0,75 + 209,4 \cdot 0,25 = 165,50 \text{ К},$$

$$c_{v,\text{кр,Ar}} = 12,463 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)},$$

$$c_{v,\text{Ar}} = 12,463 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)} \text{ (при } T = 292 \text{ К)},$$

$$c_{v,\text{кр,Kr}} = 12,654 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)},$$

$$c_{v,\text{Kr}} = 12,486 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)} \text{ (при } T = 292 \text{ К)},$$

$$c_{v,\text{кр,см}} = 12,463 \cdot 0,75 + 12,654 \cdot 0,25 = 12,511, \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)},$$

$$c_{v,\text{см}} = 12,463 \cdot 0,75 + 12,486 \cdot 0,25 = 12,469, \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)},$$

$$\tau_{\text{Ar}} = \frac{221,04}{150,86} = 1,465,$$

$$\tau_{\text{Kr}} = \frac{221,04}{209,4} = 1,056,$$

$$\Phi(\tau_{\text{Ar}}) = 1,465^{\left(0,71 + \frac{0,29}{1,465}\right)} = 1,414,$$

$$\Phi(\tau_{Kr}) = 1,056^{(0,71 + \frac{0,29}{1,056})} = 1,055,$$

$$\Phi(\tau_{cm}) = 0,75 \cdot 1,414 + 0,25 \cdot 1,055 = 1,324,$$

$$\lambda_{кр,Ar} = 968 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/(м·К)},$$

$$\lambda_{кр,Kr} = 689 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/(м·К)},$$

$$\lambda_{ад} = 0,75 \cdot 968 \cdot 10^{-5} + 0,25 \cdot 689 \cdot 10^{-5} = 898 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/(м·К)},$$

$$A = (-0,3961 + 1,2840 \cdot 0,477 - 1,4373 \cdot 0,477^2 + 0,5885 \cdot 0,477^3) \times$$

$$\times \left[1 - \left(\frac{0,5 - 0,25}{0,5} \right)^2 \right] = -0,035,$$

$$\lambda_{см,кр} = 898,5 \cdot 10^{-5} \cdot (1 - 0,035 \cdot 0,25) = 890 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/(м·К)},$$

$$\lambda_{см} = 890 \cdot 10^{-5} \frac{12,469}{12,511} 1,324 = 1174 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/(м·К)}.$$

Экспериментальное значение $\lambda_{см} = 1168 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/(м·К)}$.

ПРИЛОЖЕНИЯ

В качестве рабочих веществ холодильных машин, а в ряде случаев и паросиловых установок, широко используются фтор-, хлор-, бромпроизводные углеводороды (метана, этана, пропана и др.). Промышленное производство первого из веществ – дифтордихлорметана (CF_2Cl_2) – было начато в 1931 г. Длительное время эти соединения в соответствии с фирменным названием дифтордихлорметана называли фреонами. Это название еще довольно часто можно встретить в советской и иностранной технической литературе. Так, дифтордихлорметан, известный как фреон-12, рабочее вещество с химической формулой CF_2Cl_2 как фреон-13 и т. д.

В соответствии с международным стандартом «Органические хладагенты» (МС ИСО 817) Международной организации по стандартизации (ИСО) в 1986 г. установлена система обозначений галоидных производных углеводородов. Эта система состоит из наименования и числа. Буква R или слово *Refrigerant* (холодильный агент) составляет наименование. Цифры связаны со структурой молекул холодильного агента, Последняя цифра равна числу атомов фтора в молекуле, предпоследняя цифра на единицу больше числа атомов водорода, а третья от конца на единицу меньше числа атомов углерода в молекуле. Число атомов хлора равно разности от вычитания атомов фтора и водорода из общего числа атомов, присоединенных к атому углерода. Перед числовым обозначением циклических предельных соединений ставят букву «С». Если в молекуле холодильного агента присутствуют атомы брома, к числовому обозначению соответствующего соединения добавляют букву «В» и цифру, равную числу атомов брома. Например, соединение CHF_2Cl имеет по системе ИСО обозначение R22. Здесь последняя цифра 2 – число атомов фтора, первая цифра 2 – число атомов водорода в молекуле плюс единица, третьей цифры нет, так как она на единицу меньше числа атомов углерода в молекуле и поэтому равна нулю. Другой пример. Для химической формулы $\text{C}_2\text{F}_5\text{Cl}$ обозначение по ИСО R115. Цифра 5 характеризует число атомов фтора, цифра 1 означает отсутствие атомов водорода в молекуле и третья цифра от конца на единицу меньше числа атомов углерода.

Часто в литературе галоидные производные продолжают обозначать торговыми марками. Можно встретить такие названия: Gene-

tron, Isotron, Arctron, Alkofrene, Frigen и др. В России в соответствии с ГОСТ 8502-73 и 19212-73 галоидные производные метана называют хладоны. Таким образом, хладагент R12 российского производства может обозначаться как хладон 12, R22 как хладон 22 и т. д.

В приложении 1 приведены основные параметры хладагентов: R11, R12, R13, R14, R21, R22, R23, R113, R114, R115, R12B1, R13B1, RC318, метана (R50) и этана (R170).

В приложениях 2–16 представлены теплофизические свойства (теплопроводность, кинематическая и динамическая вязкость, плотность, теплоемкость при постоянном давлении и число Прандтля) указанных выше хладагентов в газообразном состоянии при $p = 0,1$ МПа по данным справочников и обобщений [4, 5, 9,10, 11].

Таблица III

Общая характеристика холодильных агентов

| Хлад-агент | Химическая формула | M , кг/кмоль | $T_{нк}$, К | $T_{кр}$, К | $P_{кр}$, МПа | $\rho_{кр}$, кг/м ³ | R , кДж/(кг·К) | ε/k , К | $\sigma \cdot 10^{10}$, м |
|----------------|---|----------------|--------------|--------------|----------------|---------------------------------|------------------|---------------------|----------------------------|
| R11 | CFCl ₃ | 137,368 | 296,95 | 471,15 | 4,381 | 570,2 | 0,06053 | 271,8 | 5,721 |
| R12 | CF ₂ Cl ₂ | 120,914 | 243,35 | 385,15 | 4,131 | 533,2 | 0,06876 | 254,4 | 5,306 |
| R13 | CF ₃ Cl | 104,459 | 191,65 | 301,99 | 3,870 | 553,2 | 0,07959 | 253,8 | 4,841 |
| R14 | CF ₄ | 88,005 | 145,15 | 227,49 | 3,773 | 625,6 | 0,09448 | 156,54 | 4,546 |
| R21 | CHFCl ₂ | 102,923 | 282,07 | 451,65 | 5,181 | 525,0 | 0,08078 | 355,5 | 4,875 |
| R22 | CHF ₂ Cl | 86,469 | 232,35 | 369,28 | 4,986 | 512,8 | 0,09616 | 283,8 | 4,647 |
| R23 | CHF ₃ | 70,014 | 191,05 | 299,09 | 4,835 | 525,1 | 0,11876 | 250,0 | 4,240 |
| R113 | C ₂ F ₃ Cl ₃ | 187,376 | 320,75 | 487,3 | 3,414 | 576,4 | 0,04437 | 382,4 | 5,785 |
| R114 | C ₂ F ₄ Cl ₂ | 170,922 | 276,65 | 418,84 | 3,266 | 585,2 | 0,04864 | 329,4 | 5,644 |
| R115 | C ₂ F ₅ Cl | 154,467 | 234,45 | 353,15 | 3,158 | 613,1 | 0,05383 | 270,2 | 5,501 |
| R12B1 | CF ₂ ClBr | 165,36 | 269,32 | 426,88 | 4,252 | 741,0 | 0,05028 | 270,0 | 5,46 |
| R13B1 | CF ₃ Br | 148,91 | 215,38 | 340,05 | 3,946 | 770,0 | 0,05584 | 221,3 | 5,140 |
| RC318 | C ₄ F ₈ | 200,031 | 267,18 | 388,47 | 2,780 | 547,9 | 0,04156 | 162,5 | 6,753 |
| R50 (метан) | CH ₄ | 16,043 | 111,66 | 190,77 | 4,626 | 163,5 | 0,51835 | 163,6 | 3,697 |
| R170 (этан) | C ₂ H ₆ | 30,070 | 184,62 | 305,42 | 4,934 | 213,8 | 0,27651 | 232,7 | 4,395 |

Теплофизические свойства хладагента R11

| T, K | $c_p,$ кДж/(кг·К) | $\lambda \cdot 10^5,$ Вт/(м·К) | $\eta \cdot 10^8,$ Па·с | $\nu \cdot 10^8,$ м ² /с | $\rho,$ кг/м ³ | Pr |
|--------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|--|------------------------------|-------|
| 303 | 0,581 | 822 | 1105 | 196,6 | 5,62 | 0,781 |
| 313 | 0,588 | 862 | 1141 | 210,1 | 5,43 | 0,778 |
| 323 | 0,594 | 902 | 1177 | 224,2 | 5,25 | 0,775 |
| 333 | 0,601 | 942 | 1212 | 238,6 | 5,08 | 0,773 |
| 343 | 0,608 | 982 | 1248 | 253,7 | 4,92 | 0,773 |
| 353 | 0,614 | 1022 | 1283 | 269,0 | 4,77 | 0,771 |
| 363 | 0,620 | 1062 | 1318 | 284,7 | 4,63 | 0,770 |
| 373 | 0,626 | 1102 | 1353 | 300,7 | 4,50 | 0,768 |
| 383 | 0,632 | 1142 | 1387 | 316,7 | 4,38 | 0,767 |
| 393 | 0,637 | 1181 | 1421 | 333,6 | 4,26 | 0,766 |
| 403 | 0,642 | 1220 | 1455 | 350,6 | 4,15 | 0,765 |
| 413 | 0,646 | 1259 | 1488 | 367,4 | 4,05 | 0,763 |
| 423 | 0,650 | 1298 | 1522 | 385,3 | 3,95 | 0,762 |
| 433 | 0,654 | 1337 | 1554 | 403,6 | 3,85 | 0,760 |
| 443 | 0,658 | 1375 | 1587 | 422,1 | 3,76 | 0,759 |
| 453 | 0,662 | 1412 | 1619 | 439,9 | 3,68 | 0,759 |

Теплофизические свойства хладагента R12

| T, K | $c_p,$ кДж/(кг·К) | $\lambda \cdot 10^5,$ Вт/(м·К) | $\eta \cdot 10^8,$ Па·с | $\nu \cdot 10^8,$ м ² /с | $\rho,$ кг/м ³ | Pr |
|--------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|--|------------------------------|-------|
| 243 | 0,551 | 698 | 1000 | 159,5 | 6,27 | 0,792 |
| 253 | 0,562 | 745 | 1042 | 174,2 | 5,98 | 0,789 |
| 263 | 0,573 | 793 | 1083 | 189,0 | 5,73 | 0,785 |
| 273 | 0,583 | 842 | 1125 | 204,5 | 5,50 | 0,782 |
| 283 | 0,593 | 892 | 1166 | 220,4 | 5,29 | 0,778 |
| 293 | 0,603 | 941 | 1207 | 236,7 | 5,10 | 0,775 |
| 303 | 0,613 | 991 | 1247 | 253,5 | 4,92 | 0,773 |
| 313 | 0,622 | 1042 | 1288 | 271,2 | 4,75 | 0,770 |
| 323 | 0,631 | 1092 | 1328 | 288,7 | 4,60 | 0,769 |
| 333 | 0,639 | 1143 | 1367 | 307,2 | 4,45 | 0,767 |
| 343 | 0,648 | 1193 | 1407 | 326,5 | 4,31 | 0,765 |
| 353 | 0,655 | 1244 | 1446 | 335,1 | 4,19 | 0,764 |
| 363 | 0,663 | 1294 | 1484 | 364,6 | 4,07 | 0,762 |
| 373 | 0,671 | 1345 | 1523 | 384,6 | 3,96 | 0,761 |
| 383 | 0,678 | 1395 | 1561 | 405,5 | 3,85 | 0,760 |
| 393 | 0,685 | 1445 | 1598 | 426,1 | 3,75 | 0,759 |
| 403 | 0,691 | 1495 | 1635 | 446,7 | 3,66 | 0,757 |
| 413 | 0,697 | 1544 | 1672 | 468,3 | 3,57 | 0,756 |
| 423 | 0,703 | 1594 | 1709 | 491,1 | 3,48 | 0,755 |
| 433 | 0,709 | 1643 | 1745 | 513,2 | 3,40 | 0,754 |
| 443 | 0,715 | 1692 | 1781 | 536,4 | 3,32 | 0,753 |

Теплофизические свойства хладагента R13

| T, K | $c_p,$ кДж/(кг·К) | $\lambda \cdot 10^5,$ Вт/(м·К) | $\eta \cdot 10^8,$ Па·с | $\nu \cdot 10^8,$ м ² /с | $\rho,$ кг/м ³ | Pr |
|--------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|--|------------------------------|-------|
| 203 | 0,519 | 636 | 965 | 150,8 | 6,40 | 0,784 |
| 213 | 0,534 | 695 | 1014 | 166,8 | 6,08 | 0,779 |
| 223 | 0,549 | 754 | 1061 | 183,6 | 5,78 | 0,772 |
| 233 | 0,563 | 813 | 1109 | 201,6 | 5,50 | 0,768 |
| 243 | 0,578 | 873 | 1158 | 220,2 | 5,26 | 0,767 |
| 253 | 0,591 | 934 | 1206 | 239,3 | 5,04 | 0,763 |
| 263 | 0,604 | 996 | 1254 | 259,1 | 4,84 | 0,760 |
| 273 | 0,617 | 1060 | 1300 | 279,6 | 4,65 | 0,757 |
| 283 | 0,629 | 1124 | 1348 | 300,9 | 4,48 | 0,754 |
| 293 | 0,640 | 1188 | 1394 | 329,9 | 4,33 | 0,751 |
| 303 | 0,652 | 1254 | 1441 | 344,7 | 4,18 | 0,749 |
| 313 | 0,663 | 1320 | 1487 | 368,1 | 4,04 | 0,747 |
| 323 | 0,673 | 1385 | 1531 | 391,6 | 3,91 | 0,744 |
| 333 | 0,684 | 1453 | 1577 | 416,1 | 3,79 | 0,742 |
| 343 | 0,694 | 1519 | 1622 | 440,8 | 3,68 | 0,741 |
| 353 | 0,703 | 1586 | 1665 | 466,4 | 3,57 | 0,738 |
| 363 | 0,713 | 1654 | 1709 | 492,5 | 3,47 | 0,737 |
| 373 | 0,722 | 1721 | 1752 | 518,3 | 3,38 | 0,735 |
| 383 | 0,731 | 1787 | 1794 | 545,3 | 3,29 | 0,734 |
| 393 | 0,739 | 1854 | 1836 | 572,0 | 3,21 | 0,732 |
| 403 | 0,747 | 1920 | 1878 | 600,0 | 3,13 | 0,731 |
| 413 | 0,755 | 1985 | 1919 | 629,2 | 3,05 | 0,730 |
| 423 | 0,763 | 2050 | 1960 | 657,7 | 2,98 | 0,730 |
| 433 | 0,771 | 2115 | 2001 | 687,6 | 2,91 | 0,729 |
| 443 | 0,778 | 2180 | 2041 | 718,7 | 2,84 | 0,728 |

Теплофизические свойства хладагента R14

| T, K | $c_p,$ кДж/(кг·К) | $\lambda \cdot 10^5,$ Вт/(м·К) | $\eta \cdot 10^8,$ Па·с | $\nu \cdot 10^8,$ м ² /с | $\rho,$ кг/м ³ | Pr |
|--------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|--|------------------------------|-------|
| 203 | 0,519 | 636 | 965 | 150,8 | 6,40 | 0,784 |
| 213 | 0,534 | 695 | 1014 | 166,8 | 6,08 | 0,779 |
| 223 | 0,549 | 754 | 1061 | 183,6 | 5,78 | 0,772 |
| 233 | 0,563 | 813 | 1109 | 201,6 | 5,50 | 0,768 |
| 243 | 0,578 | 873 | 1158 | 220,2 | 5,26 | 0,767 |
| 253 | 0,591 | 934 | 1206 | 239,3 | 5,04 | 0,763 |
| 263 | 0,604 | 996 | 1254 | 259,1 | 4,84 | 0,760 |
| 273 | 0,617 | 1060 | 1300 | 279,6 | 4,65 | 0,757 |
| 283 | 0,629 | 1124 | 1348 | 300,9 | 4,48 | 0,754 |
| 293 | 0,640 | 1188 | 1394 | 329,9 | 4,33 | 0,751 |
| 303 | 0,652 | 1254 | 1441 | 344,7 | 4,18 | 0,749 |
| 313 | 0,663 | 1320 | 1487 | 368,1 | 4,04 | 0,747 |
| 323 | 0,673 | 1385 | 1531 | 391,6 | 3,91 | 0,744 |
| 333 | 0,684 | 1453 | 1577 | 416,1 | 3,79 | 0,742 |
| 343 | 0,694 | 1519 | 1622 | 440,8 | 3,68 | 0,741 |
| 353 | 0,703 | 1586 | 1665 | 466,4 | 3,57 | 0,738 |
| 363 | 0,713 | 1654 | 1709 | 492,5 | 3,47 | 0,737 |
| 373 | 0,722 | 1721 | 1752 | 518,3 | 3,38 | 0,735 |
| 383 | 0,731 | 1787 | 1794 | 545,3 | 3,29 | 0,734 |
| 393 | 0,739 | 1854 | 1836 | 572,0 | 3,21 | 0,732 |
| 403 | 0,747 | 1920 | 1878 | 600,0 | 3,13 | 0,731 |
| 413 | 0,755 | 1985 | 1919 | 629,2 | 3,05 | 0,730 |
| 423 | 0,763 | 2050 | 1960 | 657,7 | 2,98 | 0,730 |
| 433 | 0,771 | 2115 | 2001 | 687,6 | 2,91 | 0,729 |
| 443 | 0,778 | 2180 | 2041 | 718,7 | 2,84 | 0,728 |

Теплофизические свойства хладагента R21

| T, K | $c_p,$ кДж/(кг·К) | $\lambda \cdot 10^5,$ Вт/(м·К) | $\eta \cdot 10^8,$ Па·с | $\nu \cdot 10^8,$ м ² /с | $\rho,$ кг/м ³ | Pr |
|--------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|--|------------------------------|-------|
| 303 | 0,616 | 892 | 1148 | 274,0 | 4,19 | 0,793 |
| 313 | 0,623 | 938 | 1186 | 292,8 | 4,05 | 0,788 |
| 323 | 0,630 | 986 | 1225 | 313,3 | 3,91 | 0,783 |
| 333 | 0,638 | 1034 | 1263 | 333,2 | 3,79 | 0,779 |
| 343 | 0,646 | 1083 | 1302 | 354,8 | 3,67 | 0,777 |
| 353 | 0,654 | 1133 | 1340 | 376,4 | 3,56 | 0,774 |
| 363 | 0,661 | 1183 | 1378 | 398,3 | 3,46 | 0,770 |
| 373 | 0,669 | 1234 | 1416 | 421,4 | 3,36 | 0,768 |
| 383 | 0,676 | 1285 | 1454 | 444,6 | 3,27 | 0,765 |
| 393 | 0,684 | 1337 | 1492 | 469,2 | 3,18 | 0,763 |
| 403 | 0,691 | 1389 | 1530 | 493,5 | 3,10 | 0,761 |
| 413 | 0,698 | 1442 | 1568 | 519,2 | 3,02 | 0,759 |
| 423 | 0,705 | 1495 | 1605 | 544,1 | 2,95 | 0,757 |
| 433 | 0,712 | 1548 | 1643 | 570,5 | 2,88 | 0,756 |
| 443 | 0,718 | 1601 | 1680 | 597,9 | 2,81 | 0,753 |
| 453 | 0,725 | 1654 | 1717 | 624,4 | 2,75 | 0,753 |
| 463 | 0,731 | 1707 | 1754 | 652,0 | 2,69 | 0,751 |
| 473 | 0,737 | 1760 | 1790 | 680,6 | 2,63 | 0,740 |

Теплофизические свойства хладагента R22

| T, K | $c_p,$ кДж/(кг·К) | $\lambda \cdot 10^5,$ Вт/(м·К) | $\eta \cdot 10^8,$ Па·с | $\nu \cdot 10^8,$ м ² /с | $\rho,$ кг/м ³ | Pr |
|--------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|--|------------------------------|-------|
| 233 | 0,617 | 709 | 996 | 215,1 | 4,63 | 0,867 |
| 243 | 0,620 | 760 | 1039 | 235,6 | 4,41 | 0,848 |
| 253 | 0,626 | 812 | 1082 | 256,4 | 4,22 | 0,834 |
| 263 | 0,633 | 865 | 1126 | 278,7 | 4,04 | 0,824 |
| 273 | 0,641 | 920 | 1169 | 301,3 | 3,88 | 0,814 |
| 283 | 0,649 | 976 | 1212 | 324,1 | 3,74 | 0,806 |
| 293 | 0,659 | 1033 | 1256 | 348,9 | 3,60 | 0,801 |
| 303 | 0,668 | 1091 | 1299 | 373,3 | 3,48 | 0,795 |
| 313 | 0,678 | 1151 | 1342 | 399,4 | 3,36 | 0,790 |
| 323 | 0,688 | 1212 | 1385 | 426,2 | 3,25 | 0,786 |
| 333 | 0,698 | 1273 | 1427 | 453,0 | 3,15 | 0,782 |
| 343 | 0,708 | 1336 | 1470 | 480,4 | 3,06 | 0,779 |
| 353 | 0,719 | 1399 | 1512 | 509,1 | 2,97 | 0,777 |
| 363 | 0,729 | 1463 | 1554 | 539,6 | 2,88 | 0,774 |
| 373 | 0,739 | 1527 | 1596 | 568,0 | 2,81 | 0,772 |
| 383 | 0,749 | 1593 | 1638 | 600,0 | 2,73 | 0,770 |
| 393 | 0,758 | 1658 | 1678 | 630,8 | 2,66 | 0,767 |
| 403 | 0,768 | 1724 | 1720 | 664,1 | 2,59 | 0,766 |
| 413 | 0,777 | 1791 | 1759 | 695,3 | 2,53 | 0,763 |
| 423 | 0,787 | 1858 | 1799 | 728,3 | 2,47 | 0,762 |
| 433 | 0,796 | 1924 | 1839 | 763,1 | 2,41 | 0,761 |
| 443 | 0,805 | 1992 | 1878 | 795,8 | 2,36 | 0,759 |
| 453 | 0,814 | 2059 | 1917 | 833,5 | 2,30 | 0,758 |
| 463 | 0,823 | 2126 | 1955 | 868,9 | 2,25 | 0,757 |
| 473 | 0,831 | 2194 | 1993 | 905,9 | 2,20 | 0,755 |

Теплофизические свойства хладагента R23

| T, K | $c_p,$ кДж/(кг·К) | $\lambda \cdot 10^5,$ Вт/(м·К) | $\eta \cdot 10^8,$ Па·с | $\nu \cdot 10^8,$ м ² /с | $\rho,$ кг/м ³ | Pr |
|--------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|--|------------------------------|-------|
| 203 | 0,639 | 692 | 1002 | 235,2 | 4,26 | 0,925 |
| 213 | 0,646 | 748 | 1052 | 259,8 | 4,05 | 0,908 |
| 223 | 0,654 | 807 | 1102 | 286,2 | 3,85 | 0,893 |
| 233 | 0,663 | 868 | 1152 | 313,0 | 3,68 | 0,880 |
| 243 | 0,672 | 931 | 1202 | 341,5 | 3,52 | 0,868 |
| 253 | 0,683 | 995 | 1252 | 371,5 | 3,37 | 0,859 |
| 263 | 0,694 | 1062 | 1301 | 401,5 | 3,24 | 0,850 |
| 273 | 0,706 | 1130 | 1350 | 432,7 | 3,12 | 0,843 |
| 283 | 0,719 | 1201 | 1399 | 466,3 | 3,00 | 0,838 |
| 293 | 0,731 | 1273 | 1448 | 499,3 | 2,90 | 0,832 |
| 303 | 0,745 | 1346 | 1496 | 534,3 | 2,80 | 0,828 |
| 313 | 0,758 | 1422 | 1544 | 569,7 | 2,71 | 0,823 |
| 323 | 0,772 | 1498 | 1591 | 607,3 | 2,62 | 0,820 |
| 333 | 0,785 | 1577 | 1638 | 644,9 | 2,54 | 0,815 |
| 343 | 0,799 | 1657 | 1684 | 681,8 | 2,47 | 0,812 |
| 353 | 0,812 | 1737 | 1730 | 723,8 | 2,39 | 0,809 |
| 363 | 0,826 | 1819 | 1775 | 762,8 | 2,33 | 0,806 |
| 373 | 0,839 | 1901 | 1820 | 805,3 | 2,26 | 0,803 |
| 383 | 0,853 | 1984 | 1864 | 847,3 | 2,20 | 0,801 |
| 393 | 0,866 | 2068 | 1909 | 887,9 | 2,15 | 0,799 |
| 403 | 0,879 | 2152 | 1952 | 934,0 | 2,09 | 0,797 |
| 413 | 0,891 | 2236 | 1996 | 978,4 | 2,04 | 0,795 |
| 423 | 0,904 | 2320 | 2039 | 1024,6 | 1,99 | 0,794 |

Теплофизические свойства хладагента R113

| T, K | $c_p,$ кДж/(кг·К) | $\lambda \cdot 10^5,$ Вт/(м·К) | $\eta \cdot 10^8,$ Па·с | $\nu \cdot 10^8,$ м ² /с | $\rho,$ кг/м ³ | Pr |
|--------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|--|------------------------------|-------|
| 293 | 0,654 | 868 | 1024 | 127,5 | 8,03 | 0,772 |
| 303 | 0,663 | 913 | 1059 | 136,8 | 7,74 | 0,769 |
| 313 | 0,672 | 958 | 1095 | 146,8 | 7,46 | 0,768 |
| 323 | 0,681 | 1004 | 1130 | 156,7 | 7,21 | 0,766 |
| 333 | 0,689 | 1051 | 1166 | 167,3 | 6,97 | 0,764 |
| 343 | 0,697 | 1098 | 1201 | 177,0 | 6,75 | 0,762 |
| 353 | 0,705 | 1145 | 1236 | 188,7 | 6,55 | 0,761 |
| 363 | 0,713 | 1192 | 1272 | 200,3 | 6,35 | 0,761 |
| 373 | 0,720 | 1240 | 1307 | 211,8 | 6,17 | 0,759 |
| 383 | 0,728 | 1288 | 1343 | 223,8 | 6,00 | 0,759 |
| 393 | 0,734 | 1336 | 1378 | 236,0 | 5,84 | 0,757 |
| 403 | 0,741 | 1383 | 1413 | 248,3 | 5,69 | 0,757 |
| 413 | 0,748 | 1432 | 1448 | 261,4 | 5,54 | 0,756 |
| 423 | 0,754 | 1480 | 1484 | 274,3 | 5,41 | 0,756 |
| 433 | 0,760 | 1528 | 1518 | 287,5 | 5,28 | 0,755 |
| 443 | 0,765 | 1576 | 1553 | 301,0 | 5,16 | 0,754 |
| 453 | 0,771 | 1624 | 1588 | 315,1 | 5,04 | 0,754 |
| 463 | 0,776 | 1671 | 1622 | 329,7 | 4,92 | 0,753 |
| 473 | 0,781 | 1719 | 1657 | 343,8 | 4,82 | 0,753 |
| 483 | 0,786 | 1767 | 1691 | 359,0 | 4,71 | 0,752 |
| 493 | 0,791 | 1814 | 1725 | 373,4 | 4,62 | 0,752 |
| 503 | 0,796 | 1861 | 1759 | 389,2 | 4,52 | 0,752 |
| 513 | 0,800 | 1908 | 1793 | 404,7 | 4,43 | 0,752 |
| 523 | 0,804 | 1955 | 1826 | 421,7 | 4,34 | 0,751 |

Теплофизические свойства хладагента R114

| T, K | $c_p,$ кДж/(кг·К) | $\lambda \cdot 10^5,$ Вт/(м·К) | $\eta \cdot 10^8,$ Па·с | $\nu \cdot 10^8,$ м ² /с | $\rho,$ кг/м ³ | Pr |
|--------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|--|------------------------------|-------|
| 223 | 0,593 | 637 | 842 | 85,2 | 9,88 | 0,784 |
| 233 | 0,607 | 689 | 880 | 93,9 | 9,37 | 0,775 |
| 243 | 0,621 | 738 | 919 | 103,0 | 8,92 | 0,773 |
| 253 | 0,634 | 789 | 957 | 112,5 | 8,51 | 0,769 |
| 263 | 0,647 | 841 | 995 | 117,1 | 8,15 | 0,766 |
| 273 | 0,660 | 894 | 1033 | 132,1 | 7,82 | 0,763 |
| 283 | 0,672 | 947 | 1072 | 142,7 | 7,51 | 0,761 |
| 293 | 0,684 | 1001 | 1110 | 153,5 | 7,23 | 0,758 |
| 303 | 0,695 | 1054 | 1149 | 164,8 | 6,97 | 0,758 |
| 313 | 0,705 | 1108 | 1187 | 176,4 | 6,73 | 0,755 |
| 323 | 0,715 | 1162 | 1225 | 188,2 | 6,51 | 0,754 |
| 333 | 0,725 | 1217 | 1264 | 200,6 | 6,30 | 0,753 |
| 343 | 0,734 | 1271 | 1302 | 213,1 | 6,11 | 0,752 |
| 353 | 0,743 | 1325 | 1340 | 226,0 | 5,93 | 0,751 |
| 363 | 0,751 | 1380 | 1378 | 239,2 | 5,76 | 0,750 |
| 373 | 0,759 | 1434 | 1416 | 252,9 | 5,60 | 0,751 |
| 383 | 0,766 | 1488 | 1453 | 267,1 | 5,44 | 0,748 |
| 393 | 0,774 | 1542 | 1491 | 281,3 | 5,30 | 0,748 |
| 403 | 0,781 | 1596 | 1529 | 296,1 | 5,16 | 0,748 |
| 413 | 0,787 | 1650 | 1568 | 311,1 | 5,04 | 0,748 |
| 423 | 0,794 | 1704 | 1602 | 326,3 | 4,91 | 0,746 |
| 433 | 0,800 | 1759 | 1639 | 341,5 | 4,80 | 0,745 |
| 443 | 0,807 | 1813 | 1674 | 357,9 | 4,68 | 0,745 |
| 453 | 0,813 | 1867 | 1711 | 373,6 | 4,58 | 0,745 |
| 463 | 0,819 | 1922 | 1747 | 389,9 | 4,48 | 0,744 |

Теплофизические свойства хладагента R115

| T, K | $c_p,$ кДж/(кг·К) | $\lambda \cdot 10^5,$ Вт/(м·К) | $\eta \cdot 10^8,$ Па·с | $\nu \cdot 10^8,$ м ² /с | $\rho,$ кг/м ³ | Pr |
|---------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|--|------------------------------|-------|
| 233 | 0,615 | 770 | 973 | 115,3 | 8,44 | 0,777 |
| 243 | 0,633 | 826 | 1016 | 127,8 | 7,95 | 0,779 |
| 253 | 0,649 | 884 | 1058 | 140,1 | 7,55 | 0,777 |
| 263 | 0,666 | 942 | 1100 | 152,4 | 7,22 | 0,778 |
| 273 | 0,681 | 1002 | 1143 | 164,7 | 6,94 | 0,777 |
| 283 | 0,696 | 1062 | 1185 | 177,1 | 6,69 | 0,777 |
| 293 | 0,711 | 1124 | 1227 | 189,9 | 6,46 | 0,776 |
| 303 | 0,724 | 1186 | 1269 | 203,4 | 6,24 | 0,775 |
| 313 | 0,737 | 1249 | 1310 | 217,2 | 6,03 | 0,773 |
| 323 | 0,750 | 1312 | 1352 | 231,5 | 5,84 | 0,773 |
| 333 | 0,763 | 1377 | 1393 | 246,1 | 5,66 | 0,772 |
| 343 | 0,776 | 1441 | 1434 | 261,7 | 5,48 | 0,772 |
| 353 | 0,787 | 1506 | 1475 | 277,3 | 5,32 | 0,771 |
| 363 | 0,798 | 1571 | 1516 | 293,2 | 5,17 | 0,770 |
| 373 | 0,809 | 1637 | 1556 | 309,3 | 5,03 | 0,769 |
| 383 | 0,819 | 1702 | 1596 | 326,4 | 4,89 | 0,768 |
| 393 | 0,828 | 1768 | 1636 | 343,7 | 4,76 | 0,766 |
| 403 | 0,837 | 1833 | 1675 | 361,0 | 4,64 | 0,765 |
| 413 | 0,845 | 1899 | 1714 | 378,4 | 4,53 | 0,763 |
| 423 | 0,852 | 1964 | 1752 | 396,4 | 4,42 | 0,760 |
| 433 | 0,859 | 2029 | 1790 | 415,3 | 4,31 | 0,758 |

Теплофизические свойства хладагента R12B1

| T, K | $c_p,$ кДж/(кг·К) | $\lambda \cdot 10^5,$ Вт/(м·К) | $\eta \cdot 10^8,$ Па·с | $\nu \cdot 10^8,$ м ² /с | $\rho,$ кг/м ³ | Pr |
|--------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|--|------------------------------|-------|
| 273 | 0,439 | 744 | 1202 | 161,1 | 7,46 | 0,709 |
| 283 | 0,446 | 788 | 1246 | 173,5 | 7,18 | 0,705 |
| 293 | 0,452 | 832 | 1290 | 186,4 | 6,92 | 0,701 |
| 303 | 0,459 | 875 | 1334 | 199,7 | 6,68 | 0,700 |
| 313 | 0,465 | 918 | 1378 | 213,3 | 6,46 | 0,698 |
| 323 | 0,471 | 962 | 1421 | 227,4 | 6,25 | 0,696 |
| 333 | 0,477 | 1007 | 1464 | 242,0 | 6,05 | 0,693 |
| 343 | 0,483 | 1052 | 1507 | 256,7 | 5,87 | 0,692 |
| 353 | 0,488 | 1098 | 1550 | 271,9 | 5,70 | 0,689 |
| 363 | 0,493 | 1143 | 1592 | 297,0 | 5,36 | 0,687 |
| 373 | 0,498 | 1188 | 1634 | 303,7 | 5,38 | 0,685 |
| 383 | 0,503 | 1231 | 1675 | 319,7 | 5,24 | 0,684 |
| 393 | 0,507 | 1275 | 1716 | 336,5 | 5,10 | 0,682 |
| 403 | 0,514 | 1320 | 1757 | 353,5 | 4,97 | 0,680 |
| 413 | 0,515 | 1365 | 1798 | 370,7 | 4,85 | 0,678 |
| 423 | 0,519 | 1410 | 1838 | 388,6 | 4,73 | 0,676 |
| 433 | 0,523 | 1454 | 1877 | 406,3 | 4,62 | 0,675 |
| 443 | 0,527 | 1498 | 1916 | 423,9 | 4,52 | 0,674 |
| 453 | 0,530 | 1544 | 1955 | 443,3 | 4,41 | 0,671 |
| 463 | 0,534 | 1589 | 1993 | 461,3 | 4,32 | 0,670 |
| 473 | 0,537 | 1635 | 2031 | 481,3 | 4,22 | 0,667 |
| 483 | 0,541 | 1680 | 2069 | 499,8 | 4,14 | 0,666 |
| 493 | 0,544 | 1725 | 2107 | 520,2 | 4,05 | 0,664 |

Теплофизические свойства хладагента R13B1

| T, K | $c_p,$ кДж/(кг·К) | $\lambda \cdot 10^5,$ Вт/(м·К) | $\eta \cdot 10^8,$ Па·с | $\nu \cdot 10^8,$ м ² /с | $\rho,$ кг/м ³ | Pr |
|--------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|--|------------------------------|-------|
| 213 | 0,398 | 541 | 1108 | 128,2 | 8,64 | 0,815 |
| 223 | 0,407 | 580 | 1161 | 141,2 | 8,22 | 0,815 |
| 233 | 0,415 | 622 | 1213 | 154,5 | 7,85 | 0,809 |
| 243 | 0,423 | 665 | 1266 | 168,6 | 7,51 | 0,805 |
| 253 | 0,432 | 710 | 1317 | 182,9 | 7,20 | 0,801 |
| 263 | 0,440 | 756 | 1369 | 198,1 | 6,91 | 0,797 |
| 273 | 0,448 | 802 | 1420 | 213,5 | 6,65 | 0,793 |
| 283 | 0,456 | 848 | 1471 | 229,5 | 6,41 | 0,791 |
| 293 | 0,464 | 894 | 1520 | 246,0 | 6,18 | 0,789 |
| 303 | 0,471 | 940 | 1571 | 263,1 | 5,97 | 0,787 |
| 313 | 0,479 | 987 | 1619 | 280,6 | 5,77 | 0,786 |
| 323 | 0,486 | 1035 | 1669 | 298,6 | 5,59 | 0,784 |
| 333 | 0,493 | 1085 | 1717 | 316,8 | 5,42 | 0,780 |
| 343 | 0,500 | 1132 | 1764 | 335,4 | 5,26 | 0,789 |
| 353 | 0,506 | 1180 | 1810 | 354,2 | 5,11 | 0,776 |
| 363 | 0,512 | 1228 | 1858 | 374,6 | 4,96 | 0,775 |
| 373 | 0,518 | 1275 | 1903 | 394,0 | 4,83 | 0,773 |
| 383 | 0,524 | 1323 | 1949 | 414,7 | 4,70 | 0,772 |
| 393 | 0,529 | 1370 | 1994 | 435,4 | 4,58 | 0,770 |
| 403 | 0,534 | 1414 | 2038 | 457,0 | 4,46 | 0,770 |
| 413 | 0,538 | 1458 | 2083 | 478,9 | 4,35 | 0,769 |
| 423 | 0,543 | 1503 | 2126 | 500,2 | 4,25 | 0,768 |
| 433 | 0,547 | 1550 | 2167 | 522,2 | 4,15 | 0,765 |
| 443 | 0,551 | 1597 | 2211 | 544,6 | 4,06 | 0,763 |
| 453 | 0,554 | 1643 | 2254 | 567,8 | 3,97 | 0,760 |

Теплофизические свойства хладагента R318

| T, K | $c_p,$ кДж/(кг·К) | $\lambda \cdot 10^5,$ Вт/(м·К) | $\eta \cdot 10^8,$ Па·с | $\nu \cdot 10^8,$ м ² /с | $\rho,$ кг/м ³ | Pr |
|--------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|--|------------------------------|-------|
| 273 | 0,761 | 1015 | 1092 | 118,6 | 9,21 | 0,819 |
| 283 | 0,773 | 1078 | 1128 | 127,7 | 8,83 | 0,809 |
| 293 | 0,786 | 1142 | 1163 | 137,0 | 8,49 | 0,800 |
| 303 | 0,800 | 1207 | 1197 | 146,3 | 8,18 | 0,793 |
| 313 | 0,814 | 1273 | 1231 | 156,0 | 7,89 | 0,787 |
| 323 | 0,828 | 1341 | 1265 | 165,9 | 7,63 | 0,781 |
| 333 | 0,843 | 1408 | 1298 | 175,9 | 7,38 | 0,777 |
| 343 | 0,856 | 1477 | 1330 | 186,1 | 7,15 | 0,771 |
| 353 | 0,870 | 1547 | 1362 | 196,4 | 6,93 | 0,766 |
| 363 | 0,883 | 1617 | 1394 | 207,1 | 6,73 | 0,761 |
| 373 | 0,897 | 1687 | 1425 | 217,9 | 6,54 | 0,758 |
| 383 | 0,909 | 1759 | 1456 | 228,9 | 6,36 | 0,752 |
| 393 | 0,922 | 1830 | 1486 | 239,9 | 6,19 | 0,749 |
| 403 | 0,934 | 1902 | 1516 | 251,3 | 6,03 | 0,744 |
| 413 | 0,946 | 1974 | 1546 | 262,9 | 5,88 | 0,741 |
| 423 | 0,958 | 2046 | 1575 | 274,3 | 5,74 | 0,738 |
| 433 | 0,969 | 2119 | 1605 | 286,6 | 5,60 | 0,734 |
| 443 | 0,980 | 2191 | 1633 | 298,5 | 5,47 | 0,730 |
| 453 | 0,991 | 2264 | 1662 | 310,9 | 5,35 | 0,728 |
| 463 | 1,002 | 2336 | 1690 | 323,4 | 5,23 | 0,725 |
| 473 | 1,012 | 2408 | 1718 | 335,9 | 5,11 | 0,722 |

Теплофизические свойства хладагента R50 (метан)

| T, K | $c_p,$ кДж/(кг·К) | $\lambda \cdot 10^5,$ Вт/(м·К) | $\eta \cdot 10^8,$ Па·с | $\nu \cdot 10^8,$ м ² /с | $\rho,$ кг/м ³ | Pr |
|--------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|--|------------------------------|-------|
| 113 | 2,213 | 1209 | 432 | 242,7 | 1,78 | 0,791 |
| 123 | 2,182 | 1319 | 471 | 292,5 | 1,61 | 0,779 |
| 133 | 2,156 | 1428 | 510 | 344,6 | 1,48 | 0,770 |
| 143 | 2,136 | 1539 | 549 | 400,7 | 1,37 | 0,762 |
| 153 | 2,122 | 1649 | 588 | 459,4 | 1,28 | 0,757 |
| 163 | 2,112 | 1760 | 627 | 522,5 | 1,20 | 0,752 |
| 173 | 2,108 | 1870 | 665 | 588,5 | 1,13 | 0,750 |
| 183 | 2,105 | 1982 | 704 | 664,2 | 1,06 | 0,748 |
| 193 | 2,105 | 2094 | 742 | 734,7 | 1,01 | 0,746 |
| 203 | 2,107 | 2206 | 780 | 812,5 | 0,96 | 0,745 |
| 213 | 2,111 | 2320 | 817 | 897,8 | 0,91 | 0,743 |
| 223 | 2,118 | 2434 | 853 | 980,5 | 0,87 | 0,742 |
| 233 | 2,126 | 2551 | 890 | 1072,3 | 0,83 | 0,742 |
| 243 | 2,137 | 2670 | 925 | 1156,2 | 0,80 | 0,740 |
| 253 | 1,150 | 2791 | 960 | 1246,8 | 0,77 | 0,740 |
| 263 | 2,164 | 2916 | 995 | 1344,6 | 0,74 | 0,738 |
| 273 | 2,181 | 3043 | 1029 | 1449,2 | 0,71 | 0,738 |
| 283 | 2,200 | 3174 | 1063 | 1563,2 | 0,68 | 0,737 |
| 293 | 2,221 | 3308 | 1095 | 1659,1 | 0,66 | 0,735 |
| 303 | 2,244 | 3446 | 1128 | 1762,5 | 0,64 | 0,734 |
| 313 | 2,268 | 3588 | 1160 | 1901,6 | 0,61 | 0,733 |
| 323 | 2,293 | 3732 | 1192 | 1969,5 | 0,59 | 0,732 |
| 333 | 2,320 | 3881 | 1223 | 2145,6 | 0,57 | 0,731 |
| 343 | 2,348 | 4032 | 1254 | 2239,3 | 0,56 | 0,730 |
| 353 | 2,379 | 4186 | 1284 | 2377,8 | 0,54 | 0,729 |
| 363 | 2,410 | 4342 | 1314 | 2479,2 | 0,53 | 0,729 |
| 373 | 2,442 | 4502 | 1344 | 2584,6 | 0,52 | 0,729 |
| 383 | 2,475 | 4663 | 1373 | 2746,0 | 0,50 | 0,729 |
| 393 | 2,509 | 4826 | 1402 | 2861,2 | 0,49 | 0,729 |
| 403 | 2,544 | 4991 | 1430 | 2979,2 | 0,48 | 0,729 |
| 413 | 2,580 | 5158 | 1458 | 3102,1 | 0,47 | 0,729 |
| 423 | 2,616 | 5326 | 1486 | 3230,4 | 0,46 | 0,730 |
| 433 | 2,653 | 5406 | 1513 | 3362,2 | 0,45 | 0,730 |
| 443 | 2,689 | 5668 | 1540 | 3500,0 | 0,44 | 0,731 |
| 453 | 2,724 | 5840 | 1567 | 3644,2 | 0,43 | 0,731 |

Теплофизические свойства хладагента R170 (этан)

| T, K | $c_p,$ кДж/(кг·К) | $\lambda \cdot 10^5,$ Вт/(м·К) | $\eta \cdot 10^8,$ Па·с | $\nu \cdot 10^8,$ м ² /с | $\rho,$ кг/м ³ | Pr |
|--------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|--|------------------------------|-------|
| 203 | 1,480 | 1074 | 633 | 345,9 | 1,83 | 0,872 |
| 213 | 1,495 | 1169 | 664 | 381,6 | 1,74 | 0,849 |
| 223 | 1,518 | 1267 | 696 | 421,8 | 1,65 | 0,834 |
| 233 | 1,542 | 1370 | 728 | 460,8 | 1,58 | 0,819 |
| 243 | 1,568 | 1475 | 759 | 502,6 | 1,51 | 0,807 |
| 253 | 1,596 | 1584 | 790 | 544,8 | 1,45 | 0,796 |
| 263 | 1,630 | 1696 | 821 | 590,6 | 1,39 | 0,789 |
| 273 | 1,665 | 1812 | 852 | 635,8 | 1,34 | 0,783 |
| 283 | 1,700 | 1931 | 883 | 684,5 | 1,29 | 0,777 |
| 293 | 1,736 | 2053 | 913 | 736,3 | 1,24 | 0,772 |
| 303 | 1,775 | 2178 | 944 | 786,7 | 1,20 | 0,769 |
| 313 | 1,815 | 2307 | 973 | 838,8 | 1,16 | 0,766 |
| 323 | 1,855 | 2439 | 1003 | 895,5 | 1,12 | 0,763 |
| 333 | 1,895 | 2574 | 1032 | 946,8 | 1,09 | 0,760 |
| 343 | 1,937 | 2711 | 1061 | 1000,5 | 1,06 | 0,758 |
| 353 | 1,980 | 2852 | 1090 | 1058,3 | 1,03 | 0,757 |
| 363 | 2,025 | 2996 | 1118 | 1118,0 | 1,00 | 0,756 |
| 373 | 2,067 | 3143 | 1147 | 1170,4 | 0,98 | 0,754 |
| 383 | 2,109 | 3293 | 1174 | 1235,8 | 0,95 | 0,752 |
| 393 | 2,150 | 3447 | 1202 | 1293,5 | 0,93 | 0,750 |
| 403 | 1,191 | 3601 | 1230 | 1365,6 | 0,90 | 0,746 |
| 413 | 2,235 | 3759 | 1259 | 1430,7 | 0,88 | 0,747 |
| 423 | 2,278 | 3920 | 1283 | 1491,9 | 0,86 | 0,746 |
| 433 | 2,320 | 4083 | 1309 | 1577,1 | 0,83 | 0,744 |
| 443 | 2,363 | 4249 | 1335 | 1648,1 | 0,81 | 0,742 |
| 453 | 2,405 | 4417 | 1361 | 1722,8 | 0,79 | 0,741 |
| 463 | 2,447 | 4588 | 1386 | 1776,9 | 0,78 | 0,739 |

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гиршфельдер Д., Кертис С., Берд Р.** Молекулярная теория газов и жидкостей. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. – 929 с.
2. **Ферцигер Д., Капер Г.** Математическая теория процессов переноса в газах. – М.: Мир, 1976. – 556 с.
3. **Кессельман П.М., Каменецкий В.Р., Якуб Е.С.** Свойства переноса реальных газов. – М.: Высш. шк., 1976. – 152 с.
4. **Цветков О.Б.** Теплопроводность холодильных агентов. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1984. – 220 с.
5. **Алтунин В.В.** Теплофизические свойства двуокиси углерода. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 546.
6. **Филиппов Л.П.** Подобие свойств веществ. – М.: Изд-во МГУ, 1978. – 256 с.
7. **Голубев И.Ф., Гнездилов Н.Е.** Вязкость газовых смесей. – М.: Изд-во стандартов, 1971. – 328 с.
8. **Шашков А.Г., Абраменко Т.Н.** Теплопроводность газовых смесей. – М.: Энергия, 1970. – 288 с.
9. Теплопроводность газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик, Л.П. Филиппов, А.А. Тарзиманов, Е.Е. Тоцкий. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 352 с.
10. Теплофизические свойства фреонов. Т. 1. Фреоны метанового ряда: Справ. данные / В.В. Алтунин, В.З. Геллер, Е.К. Петров и др. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 232 с.
11. Теплофизические свойства фреонов. Т. 2. Фреоны метанового ряда. Справ. данные / В.В. Алтунин, В.З. Геллер, Е.А. Кремневская и др.; Под ред. С.Л. Ривкина. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 264 с.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 3 |
| ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ | 4 |
| 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ | 5 |
| 2. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ МНОГОАТОМНЫХ ГАЗОВ | 23 |
| 3. ВЯЗКОСТЬ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ | 26 |
| 4. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ БИНАРНЫХ СМЕСЕЙ ГАЗОВ | 34 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ | 43 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 61 |

Цветков Олег Борисович
Лаптев Юрий Александрович
Волков Даниил Георгиевич

МЕТОДЫ РАСЧЕТА СВОЙСТВ ПЕРЕНОСА РАБОЧИХ ВЕЩЕСТВ ХОЛОДИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Учебно-методическое пособие

Ответственный редактор
Т.Г. Смирнова

Титульный редактор
Т.В. Белянкина

Компьютерная верстка
Н.В. Гуральник

Дизайн обложки
Н.А. Потехина

Печатается
в авторской редакции

Подписано в печать 19.04.2016. Формат 60x84 1/16
Усл. печ. л. 3,72. Печ. л. 4,0. Уч.-изд. л. 3,88
Тираж 100 экз. Заказ № С 17

Университет ИТМО. 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Издательско-информационный комплекс
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9